Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

Online ISSN: 2588-5146
Homepage: https://khu.ac.ir

Investigation and monitoring of atmospheric pollution over Iran using Sentinel 5 satellite

Kamal Omidvar[1]✉ | Rohollah Yousefi Ramandi[2] | Hajar Toofani Koopaei[3]

1. Corresponding author, Department of Climatology, Yazd University, Iran. E-mail: komidvar@yazd.ac.ir
2. Department of Climatology, Yazd University, Iran. E-mail: rohollah.19842023@gmail.com
3. Department of Climatology, Yazd University, Iran. E-mail: hajartoofani1376@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 February 2024
Accepted 22 September 2024
Published online 23 December 2024

Keywords:
Sustainable urban development,
Middle East,
justice,
Systematic review,
Environmental inequality.

ABSTRACT

Objective: Air pollution can have serious negative effects on human health, including cardiovascular and respiratory diseases. Monitoring and controlling air pollutants is very important to protect public health and the environment. Like many developing countries, Iran is facing air pollution, especially in its big cities and industrial cities. One of the powerful tools in air pollution monitoring is remote sensing methods. The aim of this study is to use relatively high-resolution satellite data to monitor air quality and air pollution using Sentinel-5 (Sentinel-5P) sensor images.

Methods In this study, a comprehensive monitoring based on the values of some of the most important air pollutants (including AI, O3, NO2, SO2, CH4 and CO) has been done using Sentinel-5 satellite images for Iran in 2019-2023.

Results: The results of this research showed that the emission of carbon monoxide and sulfur dioxide gases had a decreasing trend (in the months of June as an example of the examined month), but nitrogen dioxide gas, methane gas, ozone gas and aerosols had an increasing trend during the month. from June 2021 to 2023. In general, air pollution is more serious in the northern parts of the country, especially in big cities and several large urban gatherings. In this study, it was investigated how the levels of six air pollutants in Iran vary and differ from June 2019 to 2023. Another important result of this research is that the total amount of air pollution in 2020-2023 has faced an increasing trend compared to 2019. Also, the monitoring by Sentinel-5 satellite images shows that in recent years, Tehran has had the most polluted air in terms of carbon monoxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and suspended particles (dust). Also, changes in the concentration of pollutants do not follow a specific pattern. It was also found that the GEE system is able to process a large amount of data in a very short time with high accuracy.

Conclusions: Air pollutants (AI, O3, NO2, SO2, CH4, and CO) in Iran have significant spatial differences that should be considered in future planning to combat pollution.

Cite this article: Omidvar, K., Yousefi Ramandi, R., & Toofani Koopaei, H. (2024). Investigation and monitoring of atmospheric pollution over Iran using Sentinel 5 satellite. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 11 (3), 21-34. https://doi.org/10.61186/jsaeh.11.3.3

© The Author(s)
Publisher: Kharazmi University
DOI: https://doi.org/10.61186/jsaeh.11.3.3

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Air is a complex heterogeneous mixture of gases and particles, some of which are routinely monitored and are referred to as quality pollutants. These pollutants include gaseous pollutants such as nitrogen dioxide (NO2), sulfur oxides (SO2), and particulate matter PM10 (less than 10 μm) and PM2.5 (less than 2.5 μm). As air pollution has become a problem, air quality monitoring is essential. Monitoring must continue for a long time to record different atmospheric conditions. These monitoring data must be analyzed comprehensively to better understand air quality. Nowadays, satellite remote sensing data with wide spatial coverage and long time periods have become a promising tool for estimating surface air pollutants, and have shown potential to fill the gap left by ground-based monitors, especially in areas with sparse monitoring. Iran is among the ten countries with the highest air pollution. The origin of air pollutants in Iran today includes the high use of fossil fuels and fine dust resulting from long-term droughts in Iran and the Middle East. Therefore, studying and monitoring air pollution in Iran is of great importance. This goal can be achieved using remote sensing data with speed, accuracy, wide area and longer time periods. For this purpose, in this study, we have investigated the spatio-temporal characteristics and factors affecting the concentration of tropospheric pollutants over Iran between 2019 and 2023, due to the availability of satellite data and information from Sentinel-5. For this purpose, methane (CH4), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO2), ozone (O3), sulfur dioxide (SO2) and aerosol (AI) products of the TROPOMI sensor installed on the Sentinel-5P satellite have been used.

Methods

This research is considered applied research in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The geographical area of the study includes Iran. Iran is actually located in West Asia and in the Middle East region. Iran is located in the desert belt of the world. For this reason, dry and semi-arid climatic conditions prevail in most of Iran. Frequent droughts in Iran and the Middle East and the high use of fossil fuels in Iran have increased air pollution in Iran. The required data relied on Sentinel-5P TROPOMI NRTI data. For this purpose, the monthly average of tropospheric pollutant concentration images was extracted from January 2019 to December 2023. The required data relied on Sentinel-5P TROPOMI NRTI data. For this purpose, the monthly average of tropospheric pollutant concentration images was extracted from January 2019 to December 2023. These data were extracted and processed through the Google Earth Engine (GEE) platform and Python programming. Then, the maps obtained from the previous stage were analyzed in ArcMap software. This research is considered to be applied in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The geographical area of the study includes the country of Iran. Iran is actually located in West Asia and in the Middle East region. Iran is located in the desert belt of the world. For this reason, arid and semi-arid climatic conditions prevail in most of Iran. Frequent droughts in Iran and the Middle East and the high use of fossil fuels in Iran have increased air pollution in Iran. In this way, the average concentration of air pollutants was extracted using Sentinel 5P data and shown by maps and graphs.

Results

Carbon monoxide (CO) is another important trace gas that has a significant impact on environmental pollution. The analysis of the extracted maps and graphs clearly shows that the amount of carbon monoxide (CO) is decreasing and the distribution of regional concentrations

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

of carbon monoxide (CO) between 2020 and 2023 shows smaller ranges than in 2019. Nitrogen dioxide (NO2) also plays an important role in air pollution as a primary pollutant and as a precursor to the production of ozone and fine particles. Fossil fuel consumption, biomass burning and lightning are the primary sources of NO2 production. The analysis of the maps and graphs shows that the amount of nitrogen dioxide concentration is increasing, especially in spatial areas related to metropolitan areas. In addition, the results of the studies show that O3 gas, another secondary pollutant formed by sunlight and its precursors such as nitrogen oxides (NOx) and volatile organic compounds (VOCs), has also been increasing. Sulfur dioxide (SO2) is also a dangerous environmental pollutant and is derived from fossil fuels. The results of the study show that although the production of this pollutant in Iran is high and widespread, it has had a decreasing trend during the period under study. The distribution of pollutant particles and aerosols also shows an increasing trend, but does not follow a specific pattern. The regional distribution of methane (CH4) also showed a sharp increase for the years 2020 to 2023 compared to 2019.

Conclusion

Based on the results of this study, it was found that the emissions of carbon monoxide and sulfur dioxide have decreased, but nitrogen dioxide, methane, ozone, and aerosols have increased during the months of June 2021 to 2023. The results show that these pollutants show distinct spatial and seasonal changes. In general, air pollution is much more serious in the northern parts of the country, especially in large cities and several large urban agglomerations. In the present study, it was examined how the levels of six air pollutants in Iran vary and differ from June 2019 to 2023. The results of the study also showed that the changes in the concentration of pollutants do not follow a specific pattern. Monitoring carried out by Sentinel-5 satellite images shows that in the year under study, Tehran had the most polluted air in terms of the total gases of carbon monoxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and suspended particles (dust). The results of this study confirm the findings of Ghanadi et al. 2022, Gharibi et al. 2021, and Mohammadnejad Arouqh 2020 regarding the high potential of remote sensing data in studying air pollution, especially over large geographical areas.

Author Contributions

All authors participated in data collection, preparation of the research report, and data analysis.

Data Availability Statement

Data is available upon request from the authors.

Acknowledgements

We would like to thank the esteemed referees for providing structural and scientific comments.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Funding

This article was prepared without financial support.

Conflict of interest

According to the declaration of the authors of this article, there is no conflict of interest.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: ۵۱۴۶– ۲۵۸۸

Homepage: https://khu.ac.ir

بررسی و پایش آلایندهای جوی بر روی ایران با استفاده از ماهواره سنتینل ۵

کمال امیدوار [۱] ✉| روح الله یوسفی رامندی [۲] | هاجر طوفانی کوپائی [۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه اقلیم شناسی، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: komidvar@yazd.ac.ir

۲. گروه اقلیم شناسی، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: rohollah.19842023@gmail.com

۳. گروه اقلیم شناسی، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: hajartoofani1376@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

کلیدواژه‌ها:
Sentinel-5P،
ازن (O3)،
آلاینده ها،
آلودگی،
دی اکسید گوگرد (SO2) و
آئروسل (AI)،
دی اکسید نیتروژن (NO2)،
متان (CH4)،
مونوکسید کربن (CO).

چکیده

هدف: آلودگی هوا می تواند اثرات منفی جدی بر سلامت انسان از جمله بیماری های قلبی عروقی و تنفسی داشته باشد. پایش و کنترل آلاینده های هوا برای حفاظت از سلامت عمومی و محیط زیست بسیار مهم است. کشور ایران مانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه با آلودگی هوا به ویژه در کلان شهرها و شهرهای صنعتی خود مواجه است. یکی از ابزارهای قدرتمند در پایش آلودگی هوا، روش های مبتنی بر سنجش از دور می باشد.هدف این مطالعه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح نسبتاً بالا برای پایش کیفیت هواو میزان آلودگی هوا با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۵ (Sentinel-5P) است.

روش پژوهش: در این مطالعه، پایشی جامع براساس مقادیر برخی از مهمترین آلاینده های هوا (از جمله AI،O3،NO2،CH4،SO2 و CO)، با استفاده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ برای کشور ایران در سالهای ۲۰۱۹ -۲۰۲۳ صورت گرفته است.

یافته‌ها: نتایج این تحقیق نشان داد که انتشار گاز های مونو اکسید کربن و دی اکسید گوگرد روند کاهشی (در ماه های ژوئن بعنوان نمونه ماه مورد بررسی) داشته، اما گاز دی اکسید نیتروژن،گاز متان، گاز ازن و آئروسلها روند افزایشی را طی ماه های ژوئن ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ داشته اند. به طور کلی، آلودگی هوا در بخش‌های شمالی کشور، به‌ویژه در شهرهای بزرگ و چند تجمع بزرگ شهری بسیار جدی‌تر است، در مطالعه حاضر، بررسی شد که چگونه سطح شش آلاینده هوا در کشور ایران در ماه های ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ متغیر و متفاوت هستند. از دیگر نتایج مهم این تحقیق این است که در مجموع میزان آلودگی هوا در سالهای ۲۰۲۰-۲۰۲۳ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ با روندی افزایشی مواجه شده است. همچنین پایش صورت گرفته بوسیله تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ نشان می دهد که در سال های اخیر، تهران آلوده ترین هوا را به لحاظ مجموع گازهای مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد و ذرات معلق (گرد و غبار) داشته است. همچنین تغییرات غلظت آلاینده ها از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند. همچنین مشخص شد سامانه GEE قادر است حجم زیادی از داده ها را در زمان بسیار اندک با دقت بالا پردازش کند.

نتیجه‌گیری: آلاینده های هوا (AI،O3،NO2،CH4،SO2 و CO)، در ایران دارای تفاوت های فضایی قابل توجهی است که باید در برنامه ریزی های آتی برای مقابله با آلودگی ها در نظر گرفته شوند.

استناد: امیدوار، کمال؛ یوسفی رامندی، روح الله؛ و طوفانی کوپائی، هاجر (۱۴۰۳). بررسی و پایش آلایندهای جوی بر روی ایران با استفاده از ماهواره سنتینل ۵. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۱ (۳)، ۲۱-۳۴. https://doi.org/10.61186/jsaeh.11.3.3

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]

[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

مقدمه

آلودگی هوا شامل مخلوط ناهمگن پیچیده ای از گازها و ذرات است که برخی از آنها به طور معمول پایش می شوند و به عنوان آلاینده های معیاری نامیده می شوند. این آلاینده‌ها شامل آلاینده‌های گازی مانند دی اکسید نیتروژن (NO2)، دی اکسید گوگرد (SO2)، ازن (O3) و ذرات PM10 (قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر) و PM2.5 (قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر) هستند. هیچ مدرکی دال بر آستانه بی اثری برای این آلاینده ها وجود ندارد (آدبایو–اوجو[1] و همکاران، ۲۰۲۲). آلودگی هوا و کیفیت نامطلوب هوا بر سلامت انسان در سطح جهان تأثیر می گذارد و عامل اصلی بیماری های تنفسی و قلبی عروقی و آسیب به سیستم های اندام انسان است. ایستگاه‌های پایش خودکار کیفیت هوا به طور مداوم غلظت آلاینده‌های موجود در هوا را ثبت می‌کنند، اما از نظر تعداد محدود هستند، نگهداری آنها پرهزینه است و نمی‌توانند تمام تنوع مکانی آلاینده‌های موجود در هوا را مستند کنند (نیپش[2] و همکاران، ۲۰۲۳). انجام تحقیقات با تراکم فضایی بالا را دشوار می‌کند (ژانگ[3] و همکاران، ۲۰۲۳). پایش آلودگی هوا یکی از موضوعات ضروری است که باید در پایش و مدیریت آلاینده های هوا در کلان شهرها و کشورها مورد توجه قرار گیرد. با این حال، نصب و نگهداری بسیاری از ایستگاه های نظارتی هزینه های زیادی را به شهرداری ها و دولت ها تحمیل می کند. علاوه بر این، آلودگی هوا در مکان و زمان به سرعت در حال تغییر است. به عبارت دیگر، این یک مشکل مکانی و زمانی است. در نتیجه، محققان به دنبال روشی برای نظارت همزمان، کیفیت هوا هستند که وضوح زمانی و مکانی بالا را پوشش دهد (ربیعی دستجردی و همکاران، ۲۰۲۲). از آنجایی که آلودگی هوا به یک مشکل تبدیل شده است، نظارت بر کیفیت هوا ضروری است. برای ثبت شرایط جوی مختلف، نظارت باید برای مدت طولانی ادامه داشته باشد (نگوین[4] و همکاران، ۲۰۲۳). این داده های نظارتی برای درک بهتر کیفیت هوا ، باید به طور جامع تجزیه و تحلیل شوند.سپس این آگاهیها می توانند اطلاعات مفیدی را برای مطالعات بیشتر کیفیت هوا و کنترل آلودگی هوا فراهم کند. اقدامات پیشگیرانه برای به حداقل رساندن قرار گرفتن در معرض آلاینده های هوا در افراد می تواند در صورتی انجام شود که کیفیت هوا و غلظت آلاینده های هوا در منطقه برای جامعه شناخته شده باشد. با این حال، همه کشورها داده‌های پایش منظم بلندمدت کیفیت هوا با فرکانس مکانی و زمانی مطلوب برای برقراری ارتباط، هشدار و محافظت از مردم را ندارند. این نشان می دهد که نیاز به تخمین غلظت آلاینده های هوا در مناطق یا کشورهایی که داده های پایش را ندارند وجود دارد (هون[5] و همکاران، ۲۰۲۲).

فناوری سنجش از راه دور ماهواره‌ای با پوشش مکانی و زمانی بالا، به ابزاری امیدوارکننده برای تخمین آلاینده‌های هوای سطحی تبدیل شده است، و پتانسیلی برای پر کردن شکاف باقی‌مانده از مانیتورهای ثابت زمین، به‌ویژه در مناطقی با نظارت پراکنده نشان داده است (کوپر[6] و همکاران، ۲۰۲۲). مشاهدات زمین مبتنی بر ماهواره می‌توانند اطلاعات عینی را در زمان واقعی در سطح جهانی جمع‌آوری کنند، از جمله مناطقی که جمع‌آوری داده‌های زمینی دشوار است (ایالونگو[7] و همکاران، ۲۰۲۳). داده‌های آلاینده‌های جوی که از طریق سنسورهای ماهواره‌ای بازیابی می‌شوند به طور مداوم برای ارزیابی تغییرات کیفیت هوا در پایین جو استفاده می‌شوند. در طول همه گیری کرونا، چندین مطالعه شروع به استفاده از اندازه گیری های ماهواره ای برای ارزیابی تغییرات کیفیت هوا در بسیاری از مناطق مختلف در سراسر جهان کردند (رودکه[8] و همکاران، ۲۰۲۳). کیفیت هوا با آلاینده‌های مختلف هوا مانند PM 2.5، PM 10، NO2، SO2، O3، CH4 و CO در هوا اندازه‌گیری می‌شود (هالدر[9] و همکاران،

[1] - Adebayo-Ojo
[2] - Niepsch
[3] - Zhang
[4] - Nguyen
[5] - Hon
[6] - Cooper
[7] - Ialongo
[8] - Rudke
[9] - Halder

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

۲۰۲۳). اخیراً، داده‌های سنجش از دور توانستند به‌عنوان یک ابزار جایگزین ارزشمند برای پایش آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرند و می‌توانند از تصمیم‌گیرندگان حمایت کنند، زیرا می‌توانند در بازیابی و نقشه‌برداری پارامترهای کیفیت هوا در یک پوشش سینوپتیک و چندزمانی در فواصل زمانی منظم و مقیاس دینامیکی به کار گرفته شوند.ماهواره سنتینل ۵ که توسط آژانس فضایی اروپا در سال ۲۰۱۷ پرتاب شد یک منبع داده قابل اعتماد برای نظارت بر کیفیت هوا است (وانگ[1] و همکاران، ۲۰۲۲). ماهواره Sentinel-5P تصاویری با وضوح بالا از آلاینده های جوی از جمله متان (CH4)، مونوکسید کربن (CO)، دی اکسید نیتروژن (NO2)، ازن (O3)، دی اکسید گوگرد (SO2)،آلاینده های آئروسل (AI) را فراهم می کند (حسن و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، از آنجایی که کیفیت هوا شامل چندین مؤلفه است و افراد با آلاینده‌های متعدد در موقعیت‌های زندگی واقعی مواجه می‌شوند، اثرات بالقوه مضر سلامتی آلاینده‌های هوا در زمینه چند آلاینده رخ می‌دهد. بنابراین، اثرات چند آلاینده باید با هم بررسی شود (نوری و همکاران، ۲۰۲۳).

بیشتر مطالعات در مورد اثرات آلودگی هوا بر سلامتی بر روی آلاینده‌های منفرد مانند ذرات معلق، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد، ازن و مونوکسید کربن متمرکز شده‌اند که هر کدام تأثیر مستقلی دارند. اما، در واقعیت اتمسفر هرگز با یک آلاینده واحد مواجه نمی شود، بلکه در واقع در زمان های مختلف روز و سال در معرض ترکیب پیچیده ای از آلاینده های مختلف قرار می گیرد. در نتیجه، افراد بیشتر در معرض مخلوطی از آلاینده‌ها قرار می‌گیرند تا در معرض یک ماده واحد، تأثیر ناشی از آن بر سلامت انسان می‌تواند بسیار متفاوت باشد (هان[2] و همکاران، ۲۰۱۸). غلظت بالای آلاینده های مختلف هوا اثرات متفاوتی بر سلامت انسان و محیط زیست دارد (ماندال[3] و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجایی که می تواند منجر به این شرایط پیچیده شود، قرار گرفتن در معرض آلودگی هوای چند آلاینده، مهم است و باید کمیت شود، به ویژه در کشورهای در حال توسعه که به سرعت در حال توسعه شهری هستند. مخلوطی از آلاینده ها رایج است. تجزیه و تحلیل آلاینده‌های گازی هوا، برای پایش کیفیت هوا به داده‌های وضوح مکانی و زمانی بالاتری نیاز دارد. داده های ایستگاه آلودگی هوا نمی تواند برای شناسایی توزیع کیفیت هوا در سطح کشور مناسب باشد، فناوری پایش سنجش از راه دور ماهواره‌ای دارای ویژگی‌های وضوح فضایی بالا، دامنه نظارت گسترده و پایش طولانی‌مدت زمان واقعی در همه شرایط آب و هوایی است که می‌تواند کمبود ایستگاه‌های پایش زمینی را جبران می کند. بنابراین از داده های سنجش از دور مبتنی بر ماهواره برای پایش آلاینده های هوا و غلظت شیمیایی هوا استفاده می شود. اندازه گیری آلاینده هوا برای ارزیابی اثرات زیست محیطی ضروری تر است. اندازه گیری آلاینده هوا در مقیاس بزرگ به دلیل مساحت بزرگ بسیار حیاتی است (هالدر[4] و همکاران، ۲۰۲۳). در این تحقیق، ویژگی‌های مکانی–زمانی و عوامل مؤثر بر غلظت آلاینده های تروپوسفری بر روی ایران را بین سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ ، بخاطر داشتن داده و اطلاعات ماهواره ای از سنتینل ۵ بررسی کرده ایم. برای این منظور، از محصولات متان (CH4)، مونوکسید کربن (CO)، دی اکسید نیتروژن (NO2)، ازن (O3)، دی اکسید گوگرد (SO2) و آئروسل (AI) داده‌های حسگر TROPOMI نصب شده بر روی ماهواره Sentinel-5P استفاده کردیم. در این میان، این مطالعه با سایر مطالعات متفاوت است. یکی اینکه، دوره های بررسی شده توسط سایر مطالعات نسبتاً کوتاه است، در حالی که این مطالعه روند تغییر ات آلاینده ها را از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ نشان داد. همچنین، شش آلاینده اصلی را در مقیاس کشوری (کشور ایران) مطالعه و بررسی شده است. و نیز، هیچ تحقیقی در جهان گازهای آلاینده براساس طبقه بندی شده انجام نداده هست که در این کار انجام شده است، علاوه براین به دلیل حجم زیاد داده ها و اطلاعات همه ماه های مورد مطالعه،ماه ژوئن بعنوان نمونه انتخاب و بررسی شده است (بخاطر کاهش حجم داده ها). در این پژوهش، از غلظت ماهانه آلاینده اتمسفر جمع‌آوری‌شده از داده‌های ماهواره Sentinel-5P استفاده شد است.

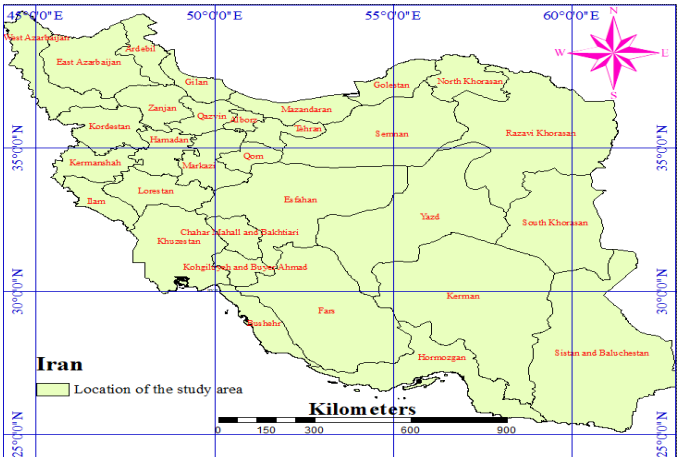
روش شناسی پژوهش

[1] - Wang
[2] - Han
[3] - Mandal
[4] - Halder

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

ایران کشوری است واقع در غرب آسیا و مرکز خاورمیانه با مساحت تقریبی ۱۶۶ میلیون هکتار که بین عرضهای ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی قرار گرفته است.آب و هوای کشور عمدتاً تحت پوشش آب و هوای خشک و نیمه خشک است و رشته کوه های زاگرس و البرز دارای محیطی نیمه خشک می باشد شکل (۱).



شکل ۱. منطقه مطالعاتی

۲. داده‌ها و روش کار

ایران مانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه با آلودگی هوا به ویژه در کلان شهرها و شهرهای صنعتی خود مواجه است. یکی از قوی ترین ماهواره ها در زمینه پایش و بررسی الاینده و آلودگی هوا تصاویر ماهواره ماهواره Sentinel-5 می باشد. این سنجنده یکی از پرکاربرد ترین سنجنده های دنیا است. تصاویر ماهواره سنتنیل ۵، پنجمین سری از ماهواره های اتحادیه اروپا می باشد که با هدف اصلی اندازه‌گیری تغییرات غلظت مختلف گازهای آلاینده در جو زمین طراحی و در مدار زمین قرار گرفته است. این ماهواره داری توان تفکیک مکانی ۱۱۱۳,۲ متری می باشد که دارای توان تفکیک زمانی ۱ تا ۲ روز می باشد. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی تغییرپذیری مکانی–زمانی آلاینده های مهم هوا با استفاده از حسگر تروپوسفر (TROPOMI) نصب شده بر روی ماهواره Sentinel-5P و پلت فرم Google Earth Engine (GEE) بر روی ایران می باشد.در این تحقیق، ما از پلت فرم GEE برای پیش پردازش و تجزیه و تحلیل میانگین ماهانه تصاویر غلظت آلاینده تروپوسفر از ژانویه ۲۰۱۹ تا دسامبر ۲۰۲۳ (بعلت داشتن اطلاعات تصاویر سنتینل ۵) استفاده شد. سپس با استفاده از پلت فرم GEE، تغییرات مکانی–زمانی آلاینده هوا را در ایران تخمین زدیم.داده‌های مورد استفاده برای مطالعه در ابتدا توسط یک ابزار TROPOMI (در ماهواره Sentinel 5P) از جمله اندازه‌گیری‌های متان (CH4)، مونوکسید کربن (CO)، دی اکسید نیتروژن (NO2)، ازن (O3)، دی اکسید گوگرد (SO2) و شاخص آئروسل(AI) جمع‌آوری می‌شوند. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از پلتفرم مبتنی بر ابر، Google Earth Engine، که داده‌های سطح سه را برای تجزیه و تحلیل مستقیم ارائه می‌کند، به‌دست آمدند. با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون در محیط برنامه GEE اقدام به فراخوانی محصولات مختلف مربوط به تصاویر آلاینده های متان (CH4)، مونوکسید کربن (CO)، دی اکسید نیتروژن (NO2)، ازن (O3)، دی اکسید گوگرد (SO2) حاصل از تصلویر ماهواره سنتینل ۵ در طول دوره زمانی ۵ سال اخیر (۲۰۱۹–۲۰۲۳) در مقیاس مکانی ایران جهت پایش آلاینده های جوی استفاده گردید. سپس نقشه مکانی میانگین غلظت آلاینده ها در نرم افزار Arc map مورد تحلیل قرار گرفت. در این مطالعه که در آن از محصول Sentinel-5P TROPOMI NRTI استفاده شد است. میانگین غلظت آلاینده های هوا از داده های Sentinel 5P استخراج شد و در نمودارها و نقشه ها نشان دادیم. در این پژوهش، از تعداد بالایی تصویر سطح سه که از طریق موتور گوگل ارث (Google Earth Engine) فراخوانی شده اند، استفاده شده است.

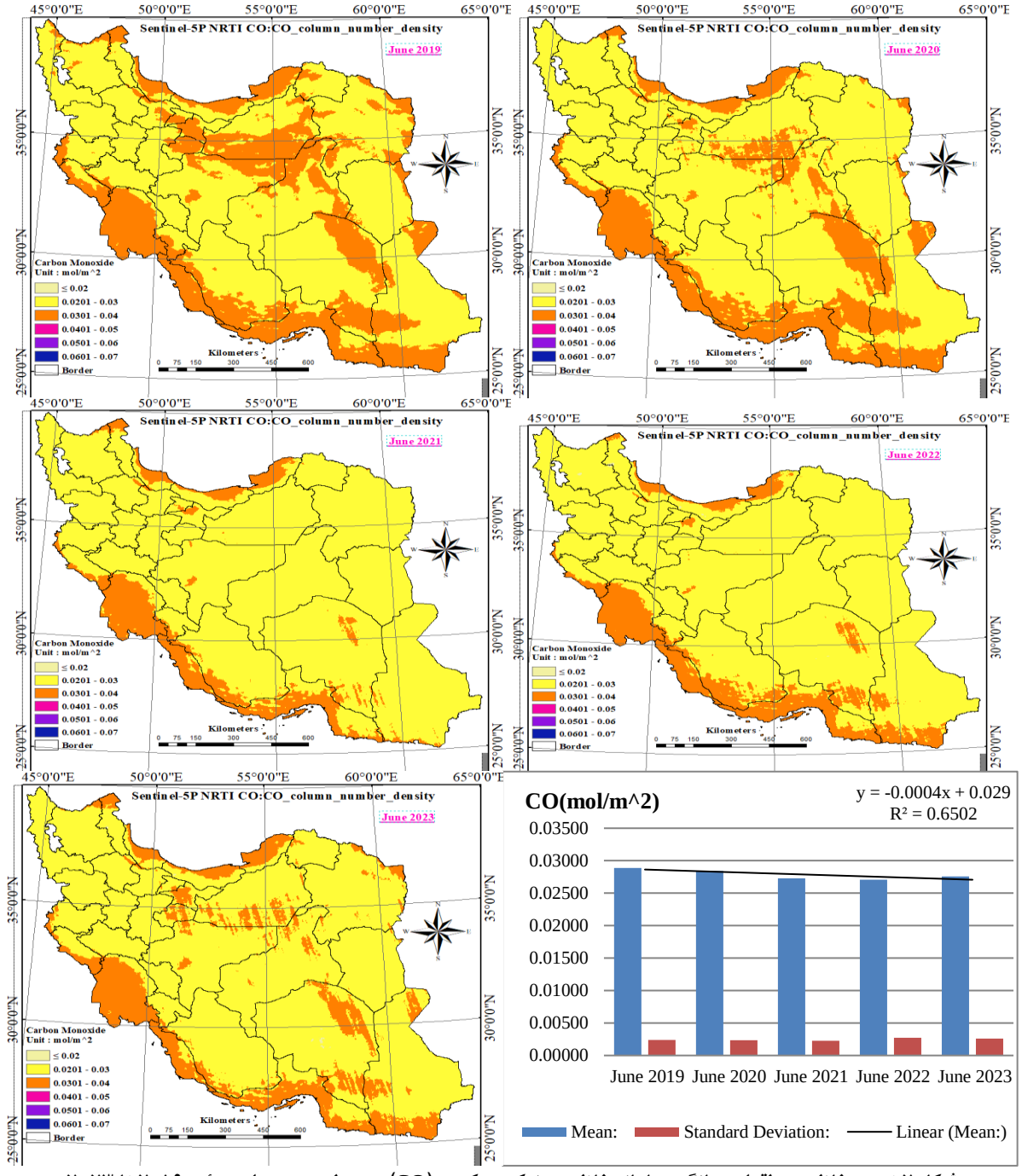
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

یافته‌های پژوهش

۱. داده‌های مونوکسید کربن (CO) بازیابی شده توسط ماهواره Sentinel-5P

مونوکسید کربن (CO) یکی دیگر از گازهای ردیابی مهم است که تأثیر زیادی در آلودگی محیط زیست دارد. بنابراین، تخمین ماهواره ای CO در مقیاس بزرگ برای فرضیه کیفیت هوای منطقه ای و جهانی آینده نگر است (رحمان، ۲۰۲۳).

تشریح نقشه ها و نمودار های ژوئن (۲۰۱۹–۲۰۲۳) در طی سالهای اخیر روند کاهشی را نشان می دهد، این گرافیک به صراحت نشان می دهد که مقدار مونوکسید کربن در حال کاهش است، توزیع غلظت منطقه‌ای مونوکسید کربن (CO) نیز برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۱۹ کاهش نشان می‌دهد (شکل۲).



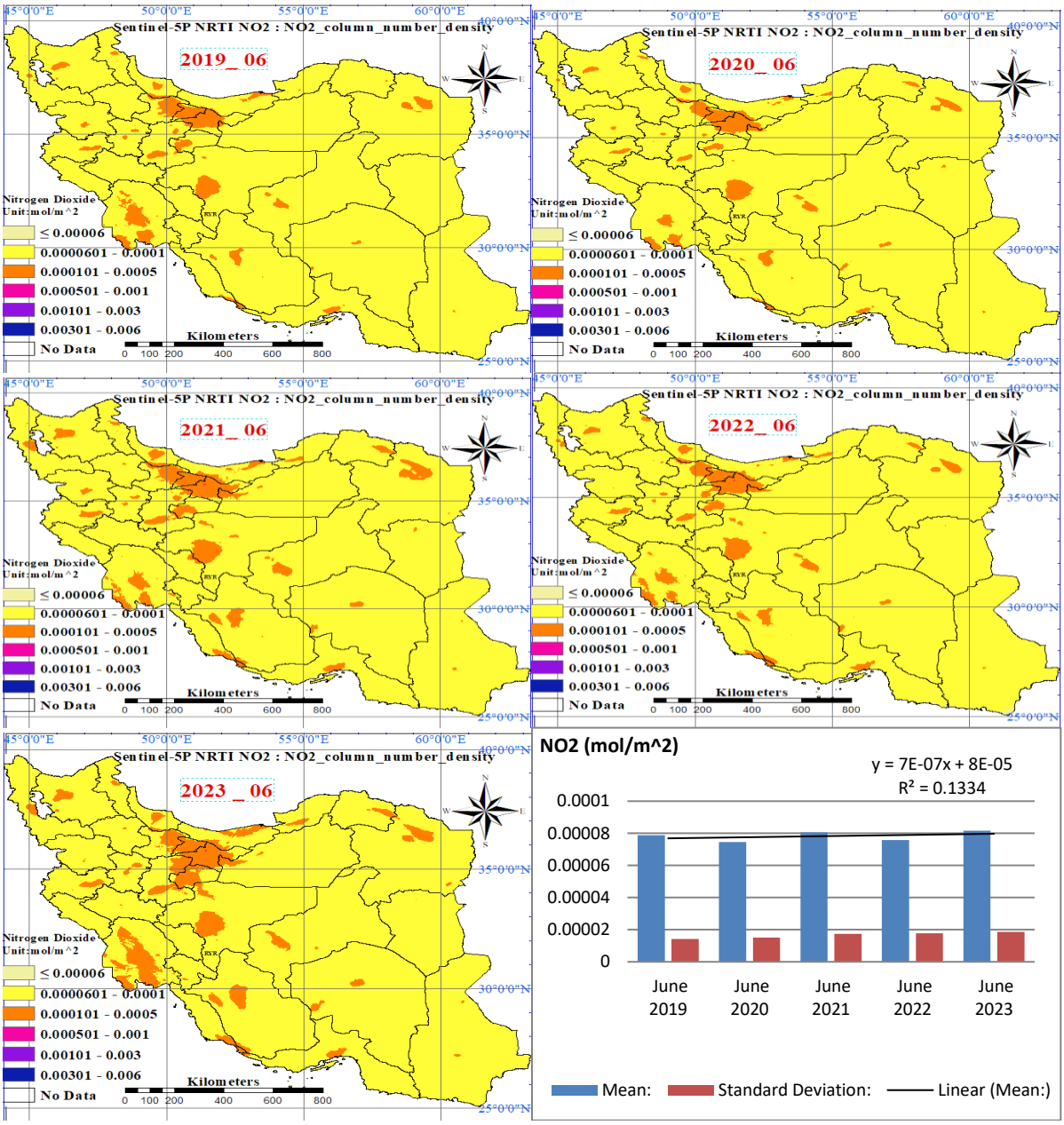
شکل ۲.توزیع غلظت منطقه‌ای میانگین ماهانه غلظت مونوکسید کربن (CO) در سطح زمین برای ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

۲. داده‌های دی اکسید نیتروژن (NO2) بازیابی شده توسط ماهواره Sentinel-5P

دی اکسید نیتروژن (NO2) به عنوان یک آلاینده اولیه و به عنوان پیش ساز تولید ازن و ذرات ریز نقش مهمی در آلودگی هوا دارد (کوپر[1] و همکاران، ۲۰۲۲). مصرف سوخت های فسیلی، سوزاندن زیست توده و رعد و برق منابع اولیه تولیدNO2 هستند (بوئرسما[2] و همکاران، ۲۰۰۴)، وسایل نقلیه، نیروگاه ها و صنایع منابع دیگری هستند که NO2 تولید می کنند (هیو[3] و همکاران، ۲۰۰۵). با این حال، نرخ تغییر غلظت NO2 از منطقه ای به منطقه دیگر متفاوت است.

تشریح نقشه ها و نمودار های ژوئن (۲۰۱۹–۲۰۲۳) در طی سالهای اخیر روند افزایشی را نشان می دهد، ما ابتدا روند کاهشی سپس افزایش غلظت را از سالهای ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ در ماه های ژوئن مشاهده کردیم، این گرافیک به صراحت نشان می دهد که مقدار غلظت دی اکسید نیتروژن تا حدودی در حال افزایش است (شکل ۳).



[1] - Cooper

[2] - Boersma

[3] - Heue

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

شکل ۳. توزیع منطقه ای میانگین ماهانه غلظت دی اکسید نیتروژن (NO2) در سطح زمین برای ماههای ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳

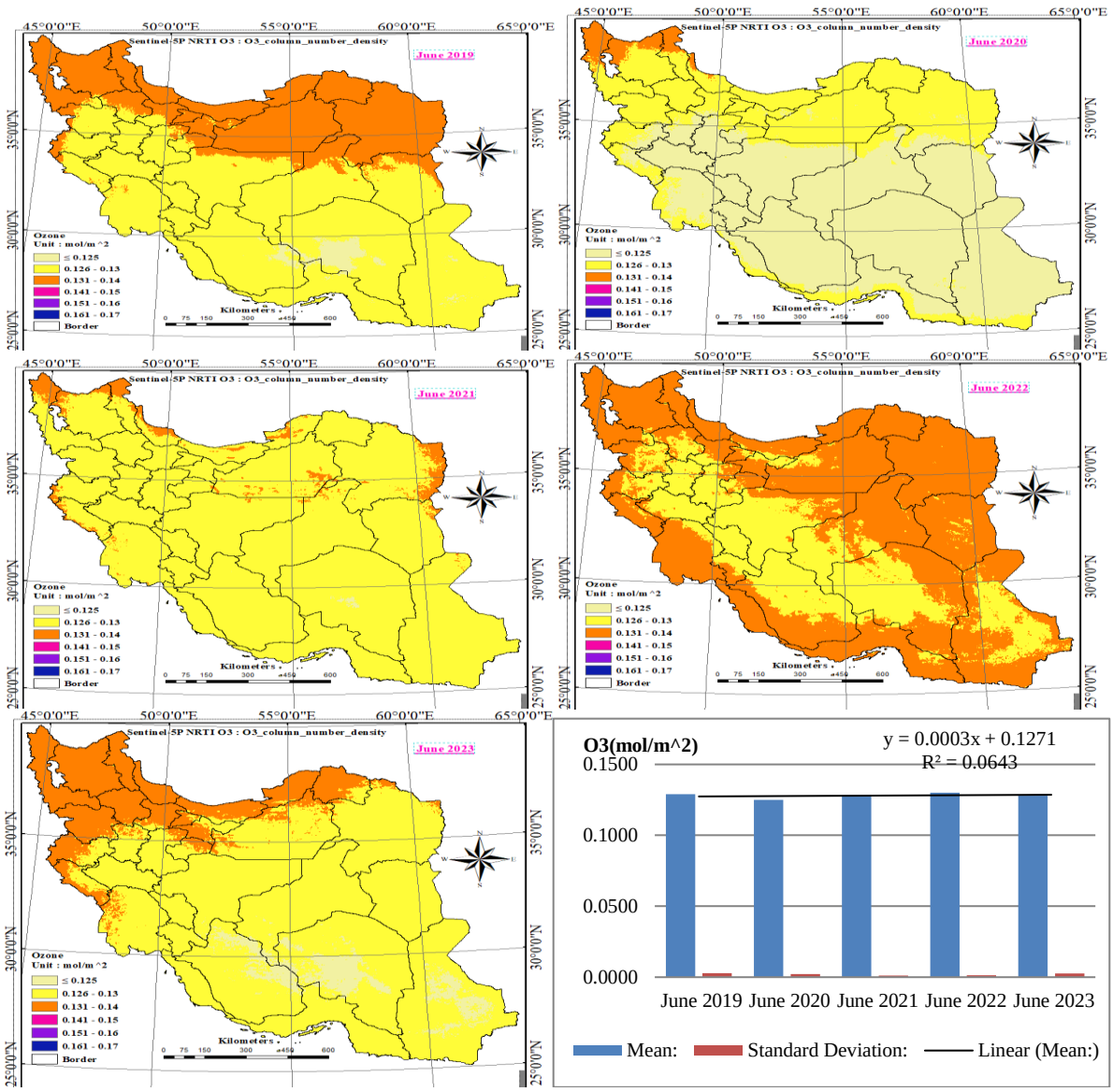
۳. داده‌های ازن (O3) بازیابی شده توسط ماهواره Sentinel-5P

O3 یک آلاینده ثانویه است که در حضور نور خورشید و پیش سازهای آن مانند اکسیدهای نیتروژن (NOx) و ترکیبات آلی فرار (VOCs) تشکیل می شود (سینگ[1] و همکاران، ۲۰۲۰). درک تغییرپذیری مکانی و زمانی تشکیل ازن در مقیاس محلی برای کاهش موثر بسیار مهم است (تائو[2] و همکاران، ۲۰۲۲). ازن (O3) در هوایی که تنفس می کنیم ممکن است برای سلامتی ما مضر باشد، به خصوص در روزهای گرم و روشن که سطح ازن می تواند به سطوح خطرناکی نزدیک شود. حتی مقادیر کم ازن می تواند برای سلامتی مضر باشد (چاکرابورتی[3] و همکاران، ۲۰۲۳).

تشریح نقشه ها و نمودار های ژوئن (۲۰۱۹–۲۰۲۳) در طی سالهای اخیر افزایشی را نشان می دهد، این گرافیک به نشان می دهد که مقدار ازن در حال افزایش است . ما ابتدا روند کاهش سپس افزایش غلظت را از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ در ژوئن مشاهده کردیم،همچنین توزیع منطقه‌ای ازن (O3) نیز برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۲۰ روند افزایشی را نشان می‌دهد تغییرات غلظت از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند (شکل ۴).

[1] - Singh
[2] - Tao
[3] - Chakrabortty

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]



شکل ٤. نقشه توزیع فضایی و نمودار تغییرات میانگین ماهانه آلاینده O3 در طول سالهای ۲۰۲۳-۲۰۱۹ برای ماههای ژوئن

۴. داده‌های دی اکسید گوگرد (SO2) بازیابی شده توسط ماهواره Sentinel-5P

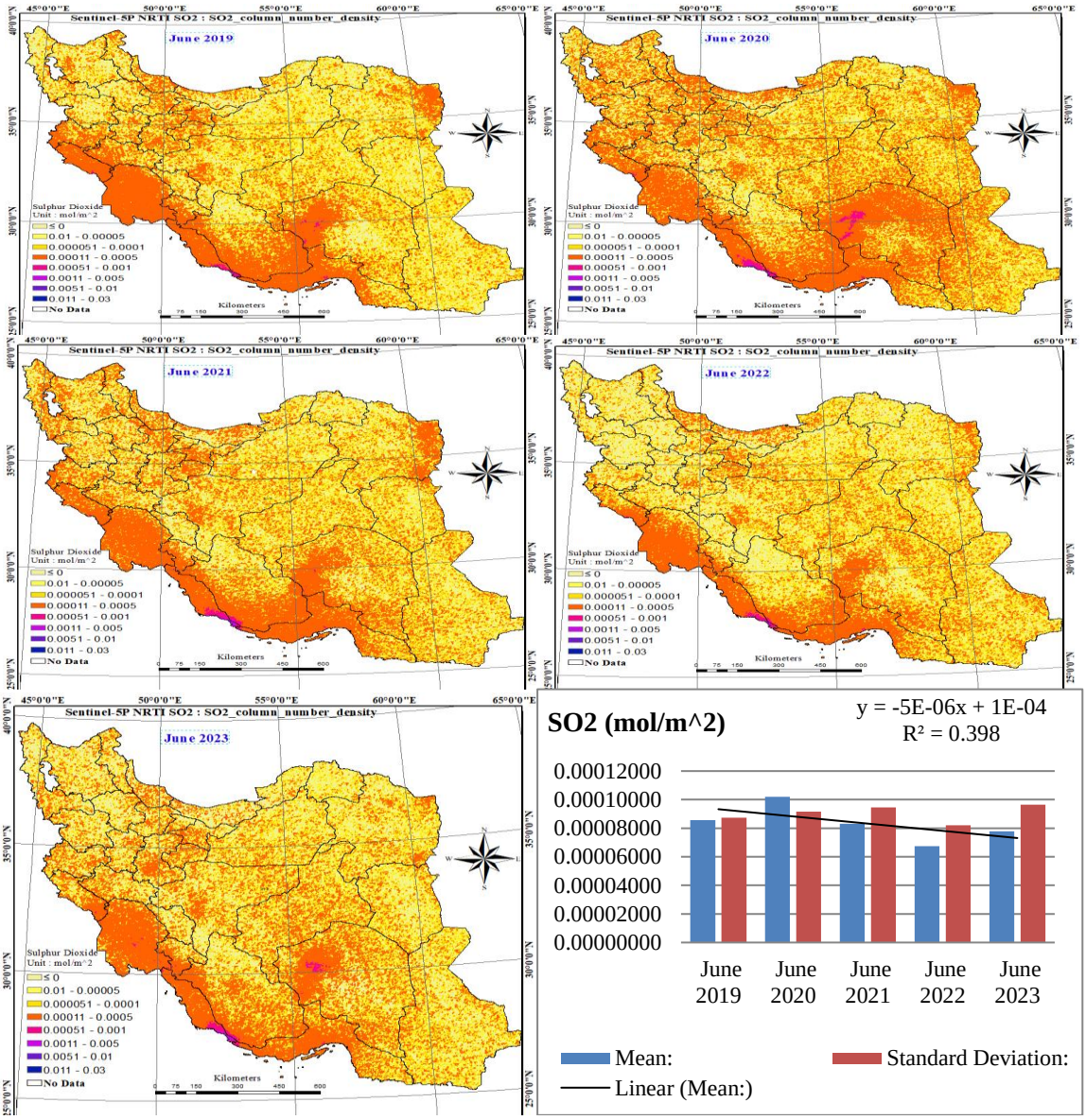
دی اکسید گوگرد یک گاز بی رنگ، سمی و غیر آلی است که در غلظت های پایین هیچ بویی ندارد. اما در غلظت های بسیار بالا بوی تند و نامطبوعی دارد. این اثر تحریک کننده بر روی غشاهای مخاطی دستگاه تنفسی و چشم انسان دارد. در طبیعت از فتوسنتز گیاهان جلوگیری می کند (کولکوا[1] و همکاران، ۲۰۲۳). گاز SO2 از سوزاندن منابع نفتی و سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود (طاها[2] و همکاران، ۲۰۲۳). دی اکسید گوگرد (SO2) یک آلاینده خطرناک زیست محیطی است. و قرار گرفتن در معرض کوتاه مدت می تواند به چشم، گلو و دستگاه تنفسی آسیب برساند. منبع اصلی انسانی SO2 اتمسفر، احتراق سوخت‌های فسیلی توسط نیروگاه‌ها، تأسیسات صنعتی و اگزوز خودروها است (کریم و راپنگ گلوک[3]، ۲۰۲۳). شکل ۹ توزیع فضایی میانگین غلظت ماهانه (ماه های ژوئن) گاز دی اکسید گوگرد را از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ در ایران نشان می‌دهد. علاوه بر این، توزیع منطقه‌ای غلظت SO2 نیز برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۲۰ روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۵).

[1] - Culková

[2] - Taha

[3] - Karim & Rappenglück

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]



شکل ۵. توزیع منطقه ای میانگین ماهانه غلظت دی اکسید گوگرد (SO2) در سطح زمین برای ماههای ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳

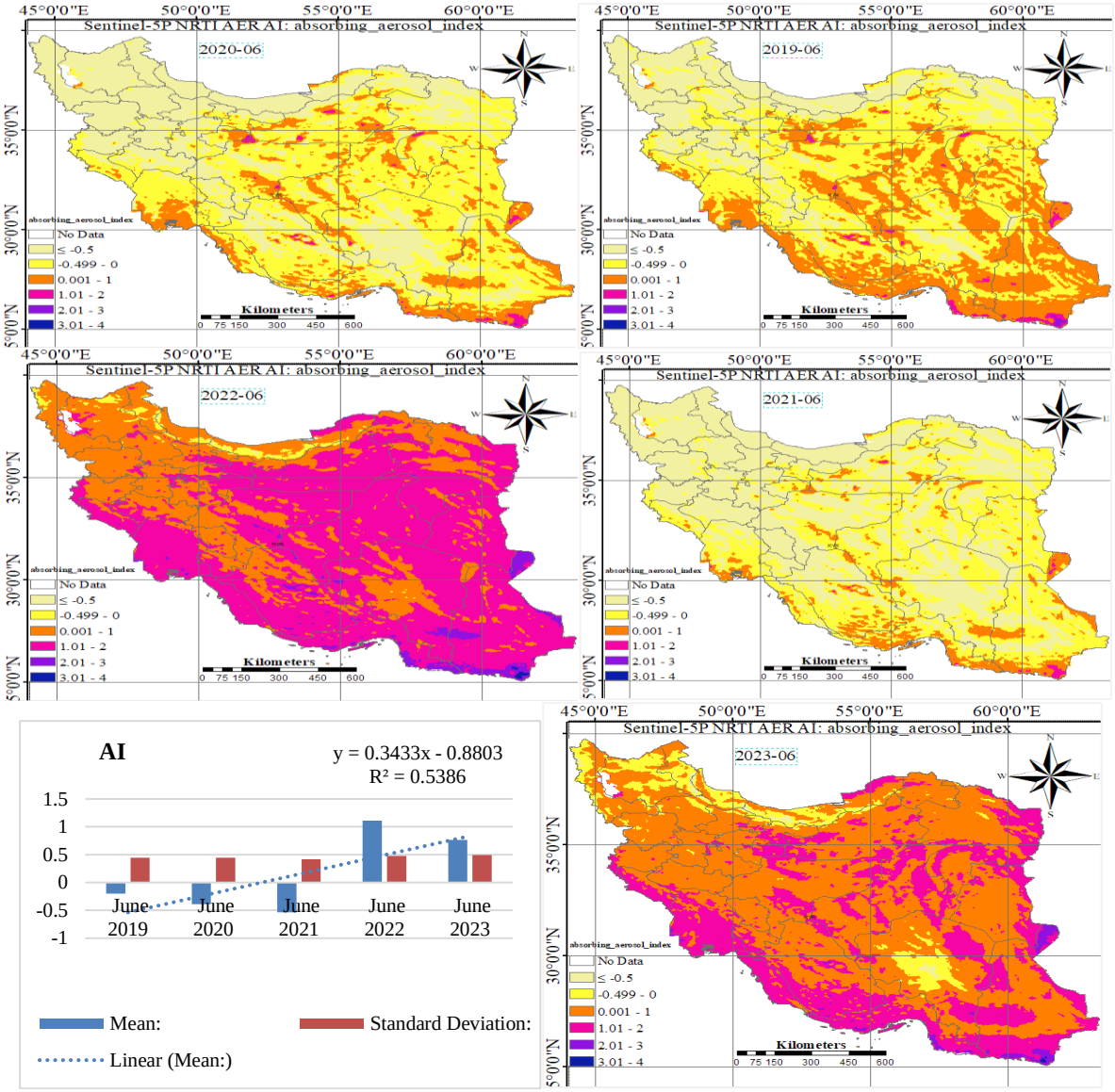
۵. داده‌های ذرات معلق (AI) بازیابی شده توسط ماهواره Sentinel-5P

ذرات معلق در هوا جزء ضروری اتمسفر هستند که از طریق دو نوع نیروی تابشی بر جو تأثیر می‌گذارند: نیروی تابشی مستقیم که میزان تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین را از طریق جذب و پراکندگی تغییر می‌دهد و نیروی تابشی غیرمستقیم که خواص تابشی را تغییر می‌دهد (کائو[1] و همکاران، ۲۰۲۳). بزرگی AI توسط عمق نوری ذرات معلق در هوا، نوع آئروسل یعنی ترکیب و منشاء و ارتفاع لایه آئروسل و زاویه دید کنترل می شود. ذرات دود و گرد و غبار صحرا که ذرات معلق در هوا را جذب می کنند مقادیر مثبت AI را نشان می دهند در حالی که آئروسل های پراکنده دارای مقادیر منفی هستند. با این حال، مقادیر AI همچنین ممکن است به دلیل عوامل دیگری مانند ابرهای ارتفاع بالا و تغییرات در بازتاب سطح منفی باشد. تشریح نقشه ها و نمودار های ژوئن (۲۰۱۹–۲۰۲۳) در طی سالهای اخیر، ما ابتدا روند کاهشی سپس افزایش غلظت را از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ در ژوئن مشاهده کردیم. این گرافیک به صراحت نشان می دهد که مقدار در آئروسلها در ماه های ژوئن روبه افزایش است. توزیع منطقه‌ای

[1] - Cao

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

آئروسل (AI) نیز برای سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۲۱ روند افزایشی شدیدی را نشان می‌دهد، علاوه بر این، افزایش قابل توجهی در AI در اکثر مناطق ایران مشاهده شد تغییرات غلظت از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند (شکل ۶).



شکل ٦. توزیع منطقه ای میانگین ماهانه غلظت شاخص آئورسل (AI) در سطح زمین برای ماههای ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳

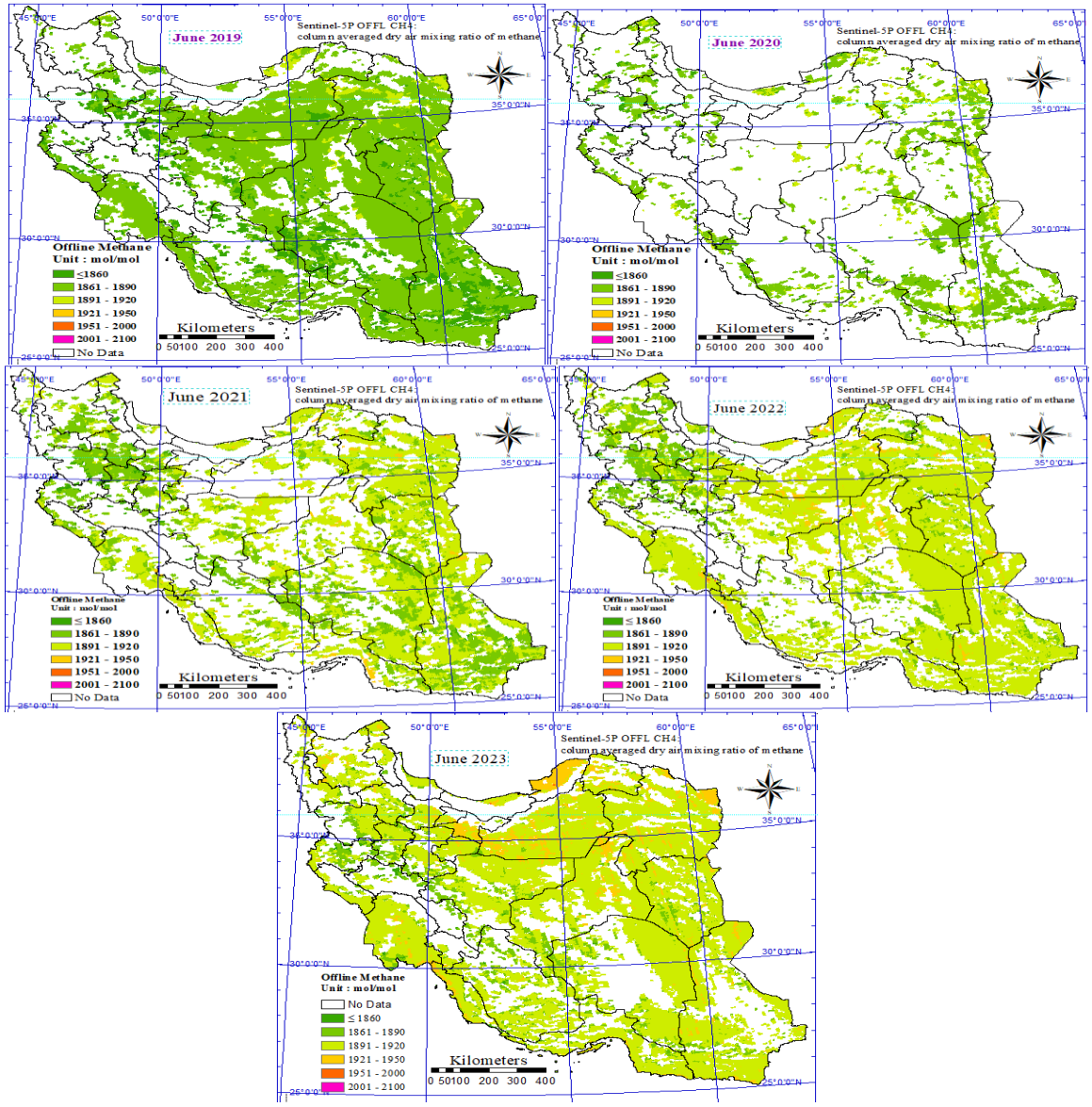
۶. داده‌های گاز متان (CH4) بازیابی شده توسط ماهواره Sentinel-5P

متان دومین عامل اصلی تغییرات آب و هوایی است که پتانسیل گرم شدن آن به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از دی اکسید کربن است. کاهش انتشار متان برای دستیابی به اهداف آب و هوایی بسیار مهم است (چادویک[1] و همکاران، ۲۰۲۳). متان از منابع مختلف طبیعی و انسانی (به عنوان مثال، کشاورزی، تالاب ها، فعالیت های نفت و گاز، استخراج زغال سنگ و غیره) منتشر می شود و دومین گاز گلخانه ای مهم (GHG) پس از دی اکسید کربن (CO_2) است که در تقریباً نیم درجه گرمایش امروزی (و ۱/۳ کل گرمایش ناشی از گاز های گلخانه ای) (مک دافی[2] و همکاران، ۲۰۲۳). تشریح نقشه های(۲۰۱۹-۲۰۲۳) در طی سالهای(ماه های ژوئن) اخیر روند خاصی را نشان می دهد، روند افزایشی را از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ مشاهده شد. این گرافیک به

[1] - Chadwick
[2] - McDuffie

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

صراحت نشان می دهد که مقدار متان در حال افزایش است. توزیع منطقه‌ای متان (CH4) نیز برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۱۹ روند افزایشی شدیدی را نشان داد، علاوه بر این، افزایش قابل توجهی در CH4 در اکثر مناطق ایران مشاهده شد. (شکل ۷).



شکل ۷. توزیع منطقه ای میانگین ماهانه غلظت متان (CH4) در سطح زمین برای ماههای ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، پایش آلودگی هوای کشور ایران با استفاده از داده های ماهواره سنتینل– ۵ انجام شد. به این منظور، داده های ماهواره فوق در محیط ابری google earth engine مورد پردازش قرار گرفت و تغییرات آلاینده‌ها (SO2,CH4،NO2،O3،AI و CO) در ایران در بازه زمانی اول ژانویه ۲۰۱۹ تا ۳۰ دسامبر ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت.

این مطالعه یک اندازه گیری پنج ساله آلاینده هوا در کشور ایران را با کمک Sentinel-5p و پلت فرم GEE ایجاد می کند. در این پژوهش، از تعداد بالایی تصویر سطح سه که از طریق GEE فراخوانی شده اند، استفاده شده است. از پلت فرم GEE برای پیش پردازش و تجزیه و تحلیل میانگین ماهانه تصاویر غلظت ستون آلاینده هوا تروپوسفراستفاده شد. به منظور تجزیه و تحلیل روند آلاینده ها، از میانگین ماهانه غلظت شش آلاینده هوا (SO2,CH4،NO2،O3،AI و CO) استفاده شد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

بنابراین، شکل های (۲ تا ۷) توزیع منطقه‌ای میانگین غلظت ماهانه همه آلاینده‌ها را برای ماه ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. این ماه به عنوان یک دوره مرجع برای مطالعه سال های ۲۰۱۹– ۲۰۲۳ عمل می کند، جایی که مناطق کم و زیاد این آلاینده ها در سطح زمین ظاهر می شوند. گرافیک ماهانه نیز برای اکثر مناطق ایران تولید شده است که امکان تجسم گازهای آلاینده را بر کیفیت هوا فراهم می کند. نمودارهای ماهانه تفاوت قابل توجهی را در غلظت این آلاینده ها در ایران برای ژوئن ۲۰۲۰،۲۰۲۱،۲۰۲۲،۲۰۲۳در مقایسه با ژوئن ۲۰۱۹ نشان می دهد. با توجه به میانگین غلظت ماهانه شش آلاینده جوی در ایران از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳، محققان تغییرات ماهانه آلاینده ها را ترسیم کردند. براساس نتایج این تحقیق، مشخص شد که انتشار گاز مونو اکسید کربن و دی اکسید گوگرد روند کاهشی داشته، اما گاز دی اکسید نیتروژن،گاز متان، گاز ازن و آئروسلها روند افزایشی در طی ماه های ژوئن ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ داشته اند.نتایج نشان می دهد که این آلاینده ها تغییرات مکانی و فصلی مشخصی را نشان می دهند. به طور کلی، آلودگی هوا در بخش‌های شمالی کشور، به‌ویژه در شهرهای بزرگ و چند تجمع بزرگ شهری بسیار جدی‌تر است، در مطالعه حاضر ، بررسی شد که چگونه سطح شش آلاینده هوا در کشور ایران در ماه های ژوئن ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ متغیر و متفاوت است. همچنین تغییرات غلظت آلاینده ها از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند (غریبی و همکاران،۱۴۰۰). پایش صورت گرفته بوسیله تصویرهای ماهواره سنتینل–۵ نشان می دهد که در سال مورد مطالعه، تهران آلوده ترین هوا را به لحاظ مجموع گازهای مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد و ذرات معلق (گرد و غبار) داشته است که با تحقیقات صورت گرفته همخوانی دارد (قنادی و همکاران،۱۴۰۱). همچنین مشخص شد سامانه GEE قادر است حجم زیادی از داده ها را در زمان بسیار اندک با دقت بالا پردازش کند (محمدنژاد آروق، ۱۳۹۹).

آلاینده های هوا (AI،O3،NO2،CH4،SO2 و CO)، در ایران دارای تفاوت های فضایی قابل توجهی است که باید در برنامه ریزی های آتی برای مقابله با آلودگی ها در نظر گرفته شوند. کاملاً آگاه هستیم که این مقاله محدودیت ها و کاستی ها را دارد، منجمله این محدودیت‌ها می‌توان نداشتن آمار طولانی مدت تصاویرآلاینده ها ماهواره ای اشاره کرد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در جمع‌آوری داده‌ها، تهیه گزارش پژوهش و تحلیل داده‌ها مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر بدون حمایت مالی انجام شده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

غریبی، شیوا؛ و شایسته، کامران؛ (۱۴۰۰). کاربرد تصاویر ماهواره ای سنتینل ۵ در شناسایی کانون‌های آلاینده‌های هوا در ایران. *سامانه نشریات علمی*، ۸(۳)، ۱۲۳–۱۳۸.

قنادی، محمدامین؛ 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، https://doi.org/10.52547/envs.2022.1026

محمدنژاد آروق، وحید؛ (۱۳۹۹). شناسایی اراضی شهری با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۱ و ۲ بر پایه سامانه گوگل ارث انجین (GEE). *پژوهش های جغرافیای برنامه ریزی شهری*، ۸(۳)، ۶۱۳–۶۳۰، https://sid.ir/paper/1063348/fa

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

References

Adebayo-Ojo, T. C., Wichmann, J., Arowosegbe, O. O., Probst-Hensch, N., Schindler, C., & Künzli, N. (2022). Short-Term Effects of PM10, NO2, SO2 and O3 on Cardio-Respiratory Mortality in Cape Town, South Africa, 2006-2015. *International journal of environmental research and public health*, 19(13), 8078. https://doi.org/10.3390/ijerph19138078

Boersma, K. F., Eskes, H. J., & Brinksma, E. J. (2004). Error analysis for tropospheric NO2 retrieval from space. *Journal of Geophysical Research*: Atmospheres, 109(D4).

Cao, Z., Luan, K., Zhou, P., Shen, W., Wang, Z., Zhu, W., Qiu, Z., & Wang, J. (2023). *Evaluation and Comparison of Multi-Satellite Aerosol Optical Depth Products over East Asia Ocean*. Toxics, 11(10), 813. https://doi.org/10.3390/toxics11100813.

Chadwick, G. L., Joiner, A. M. N., Ramesh, S., Mitchell, D. A., & Nayak, D. D. (2023). *McrD binds asymmetrically to methyl-coenzyme M reductase improving active-site accessibility during assembly*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 120(25), e2302815120. https://doi.org/10.1073/pnas.2302815120.

Chakrabortty, R., Pal, S. C., Ghosh, M., Arabameri, A., Saha, A., Roy, P., Pradhan, B., Mondal, A., Ngo, P. T. T., Chowdhuri, I., Yunus, A. P., Sahana, M., Malik, S., & Das, B. (2023). *Weather indicators and improving air quality in association with COVID-19 pandemic in India*. Soft computing, 27(6), 3367–3388. https://doi.org/10.1073/pnas.2302815120.

Cooper, M. J., Martin, R. V., Hammer, M. S., Levelt, P. F., Veefkind, P., Lamsal, L. N., ... & McLinden, C. A. (2022). *Global fine-scale changes in ambient NO2 during COVID-19 lockdowns*. Nature, 601(7893), 380-387.

Culková, E., Lukáčová-Chomisteková, Z., Bellová, R., Rievaj, M., Švancarová-Laštincová, J., & Tomčík, P. (2023). An Interference-Free Voltammetric Method for the Detection of Sulfur Dioxide in Wine Based on a Boron-Doped Diamond Electrode and Reaction Electrochemistry. *International journal of molecular sciences*, 24(16), 12875. https://doi.org/10.3390/ijms241612875.

Halder, B., Ahmadianfar, I., Heddam, S., Mussa, Z. H., Goliatt, L., Tan, M. L., Sa'adi, Z., Al-Khafaji, Z., Al-Ansari, N., Jawad, A. H., & Yaseen, Z. M. (2023). Machine learning-based country-level annual air pollutants exploration using Sentinel-5P and Google Earth Engine. *Scientific reports*, 13(1), 7968. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34774-23

Han, L., Zhou, W., Pickett, S. T., Li, W., & Qian, Y. (2018). Multicontaminant air pollution in Chinese cities. *Bulletin of the World Health Organization*, 96(4), 233–242E. https://doi.org/10.2471/BLT.17.195560

Hassaan, M. A., Abdallah, S. M., Shalaby, E. A., & Ibrahim, A. A. (2023). Assessing vulnerability of densely populated areas to air pollution using Sentinel-5P imageries: a case study of the Nile Delta, Egypt. *Scientific reports*, 13(1), 17406. https://doi.org/10.1038/s41598-023-44186-36.

Heue, K. P., Richter, A., Bruns, M., Burrows, J. P., Platt, U., Pundt, I., & Wagner, T. (2005). Validation of SCIAMACHY tropospheric NO 2-columns with AMAXDOAS measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(4), 1039-1051.

Hong, W. Y., Koh, D., & Yu, L. E. (2022). Development and Evaluation of Statistical Models Based on Machine Learning Techniques for Estimating Particulate Matter (PM2.5 and PM10) Concentrations. *International journal of environmental research and public health*, 19(13), 7728. https://doi.org/10.3390/ijerph19137728

Hosseini, V., & Shahbazi, H. (2016). Urban air pollution in Iran. Iranian Studies, 49(6), 1029-1046.

Ialongo, I., Bun, R., Hakkarainen, J., Virta, H., & Oda, T. (2023). Satellites capture socioeconomic disruptions during the 2022 full-scale war in Ukraine. *Scientific reports*, 13(1), 14954. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42118-w.

Karim, I., & Rappenglück, B. (2023). *Impact of Covid-19 lockdown regulations on PM2.5 and trace gases (NO2, SO2, CH4, HCHO, C2H2O2 and O3) over Lahore*, Pakistan. Atmospheric environment (Oxford, England: 1994), 303, 119746. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119746.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]

Mandal, J., Samanta, S., Chanda, A., & Halder, S. (2021). *Effects of COVID-19 pandemic on the air quality of three megacities in India. Atmospheric research*, 259, 105659. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105659

McDuffie, E. E., Sarofim, M. C., Raich, W., Jackson, M., Roman, H., Seltzer, K., Henderson, B. H., Shindell, D. T., Collins, M., Anderton, J., Barr, S., & Fann, N. (2023). The Social Cost of Ozone-Related Mortality Impacts From Methane Emissions. *Earth's future*, 11(9), 10.1029/2023ef003853. https://doi.org/10.1029/2023ef003853.

Nguyen, T. P. M., Bui, T. H., Nguyen, M. K., Nguyen, T. H., Vu, V. T., & Pham, H. L. (2021). Impact of COVID-19 partial lockdown on PM 2.5, SO 2, NO 2, O 3, and trace elements in PM 2.5 in Hanoi, Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.

Niepsch, D., Clarke, L. J., Newton, J., Tzoulas, K., & Cavan, G. (2023). High spatial resolution assessment of air quality in urban centres using lichen carbon, nitrogen and sulfur contents and stable-isotope-ratio signatures. *Environmental science and pollution research international*, 30(20), 58731–58754. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26652-8.

Nouri, F., Taheri, M., Ziaddini, M., Najafian, J., Rabiei, K., Pourmoghadas, A., Shariful Islam, S. M., & Sarrafzadegan, N. (2023). Effects of sulfur dioxide and particulate matter pollution on hospital admissions for hypertensive cardiovascular disease: A time series analysis. *Frontiers in physiology*, 14, 1124967. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1124967.

Rabiei-Dastjerdi, H., Mohammadi, S., Saber, M., Amini, S., & McArdle, G. (2022). Spatiotemporal analysis of NO2 production using TROPOMI time-series images and Google Earth Engine in a middle eastern country. *Remote Sensing*, 14(7), 1725.

Rahman M. M. (2023). Recommendations on the measurement techniques of atmospheric pollutants from in situ and satellite observations: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5), 326. https://doi.org/10.1007/s12517-023-11410-118.

Rudke, A. P., Martins, J. A., Hallak, R., Martins, L. D., de Almeida, D. S., Beal, A., Freitas, E. D., Andrade, M. F., Koutrakis, P., & Albuquerque, T. T. A. (2023). Evaluating TROPOMI and MODIS performance to capture the dynamic of air pollution in São Paulo state: A case study during the COVID-19 outbreak. *Remote sensing of environment*, 289, 113514. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113514.

Singh, V., Singh, S., Biswal, A., Kesarkar, A. P., Mor, S., & Ravindra, K. (2020). Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India. *Environmental Pollution*, 266, 115368.

Tao, M., Fiore, A. M., Jin, X., Schiferl, L. D., Commane, R., Judd, L. M., ... & Tian, Y. (2022). Investigating changes in ozone formation chemistry during summertime pollution events over the Northeastern United States. *Environmental Science & Technology*, 56(22), 15312.-15327.

Taha, R. A., Shalabi, A. S., Assem, M. M., & Soliman, K. A. (2023). DFT study of adsorbing SO2, NO2, and NH3 gases based on pristine and carbon-doped Al24N24 nanocages. *Journal of molecular modeling*, 29(5), 140. https://doi.org/10.1007/s00894-023-05547-y.

Wang, C., Wang, T., & Wang, P. (2019). The spatial–temporal variation of tropospheric NO2 over China during 2005 to 2018. *Atmosphere*, 10(8), 444.

Zhang, Q., Yin, Z., Lu, X., Gong, J., Lei, Y., Cai, B., Cai, C., Chai, Q., Chen, H., Dai, H., Dong, Z., Geng, G., Guan, D., Hu, J., Huang, C., Kang, J., Li, T., Li, W., Lin, Y., Liu, J., … He, K. (2023). Synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China. *Environmental science and ecotechnology*, 16, 100280. https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.10028.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1403.11.3.2.6]
[DOI: 10.61186/jsaeh.11.3.3]