



Spatiotemporal Variations and Identification of Critical SO₂ Pollution Hotspots on the Southern Slopes of the Central Alborz Using Satellite Data

Mohammad Naji¹, Ghasem Azizi^{2*}, Mostafa Karimi²

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

² Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 02 May 2026

Revised: 15 August 2026

Accepted: 19 August 2026

Available Online:

19 August 2026

Keywords:

Air Quality

Sulfur Dioxide (SO₂)

Spatiotemporal Analysis

Satellite Remote Sensing

Pollution Hotspots

ABSTRACT

Sulfur dioxide is an atmospheric pollutant emitted primarily through the combustion of fossil fuels in power plants and industrial facilities. This pollutant is present across the industrial Tehran–Karaj–Qazvin corridor. This study aimed to analyze the spatiotemporal pattern of SO₂ and identify areas, with emphasis on power plants and industrial centers, during 2018–2022. Total vertical column SO₂ was retrieved from TROPOMI observations aboard Sentinel-5P. Data processing was conducted in Google Earth Engine, while spatial analyses were performed in ArcGIS. Annual, seasonal, and monthly variations, as well as the five-year mean, were examined, and Hot Spot Analysis was applied. The results showed that the highest SO₂ concentrations were concentrated in industrial areas of Qazvin Province, southern Tehran, and eastern Alborz. Hot Spot Analysis revealed spatial clustering along the Tehran–Qazvin industrial corridor, where industrial zones, thermal power plants, and heavy freight traffic contribute to emissions. Areas surrounding power plants such as Shahid Rajaei were identified as SO₂ hotspots. In contrast, elevated and northern areas exhibited lower concentrations due to better atmospheric ventilation and limited emission sources. Annual SO₂ concentrations showed an increasing trend, reaching a maximum in 2021. Global Moran's I confirmed strong and significant spatial autocorrelation, indicating clustered pollution patterns and the influence of emission sources. The highest concentrations occurred during the cold season, particularly in January and February, whereas July and August showed lower values. The findings suggest that industrial decentralization, fuel-use reform, and emission control can contribute to SO₂ management.

* Corresponding author: Ghasem Azizi

E-mail address: ghazizi@ut.ac.ir

How to cite this article: Naji, M., Azizi, Gh., & Karimi, M. (2026). Spatiotemporal Variations and Identification of Critical SO₂ Pollution Hotspots on the Southern Slopes of the Central Alborz Using Satellite Data. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoeht.2026.98532.1664>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Air pollution is one of the most pressing environmental challenges in urban and industrial areas and has become a global concern alongside rapid urbanization and the expansion of industrial activities. Among atmospheric pollutants, sulfur dioxide (SO₂) is of particular importance due to its widespread occurrence and substantial environmental and health impacts. It is primarily emitted through the combustion of fossil fuels in power plants, industrial facilities, and oil refineries. Exposure to elevated concentrations of SO₂ can adversely affect human health, particularly by contributing to respiratory disorders, cardiovascular complications, and overall deterioration of air quality. Consequently, understanding the spatiotemporal distribution of SO₂ has become an important priority for environmental researchers and policymakers worldwide. Iran, like many developing countries, faces persistent challenges associated with SO₂ pollution, particularly in densely populated and industrialized regions. The southern slopes of the Central Alborz, encompassing the metropolitan areas of Tehran, Karaj, and Qazvin, constitute one of the country's major population and industrial centers and are therefore highly susceptible to air pollution. However, comprehensive assessment of SO₂ pollution in this region is constrained by the limited spatial coverage and temporal continuity of ground-based air quality monitoring stations, particularly in Karaj and Qazvin. Station-based observations are often characterized by spatial gaps and temporal discontinuities, limiting their ability to provide a consistent basis for long-term and spatially comprehensive assessments. In this context, satellite remote sensing provides an effective complementary approach for monitoring atmospheric pollutants over extensive areas and overcoming some of the limitations associated with conventional ground-based observations. In particular, Sentinel-5 satellite observations offer valuable capabilities for investigating the spatial and temporal variability of atmospheric SO₂ at regional scales. Accordingly, the present study employs Sentinel-5 observations to investigate the spatiotemporal distribution of SO₂ across the metropolitan areas of Tehran, Karaj, and Qazvin. The analysis focuses on the five-year mean concentration during 2018–2022, together with annual, seasonal, and monthly variations, to characterize the temporal behavior of the pollutant and identify areas with elevated SO₂ concentrations. Particular attention is given to the spatial correspondence between SO₂ hotspots and major emission sources, including power plants and industrial centers.

Material and Methods

Sentinel-5P/TROPOMI satellite observations were used to investigate the spatiotemporal variability of sulfur dioxide (SO₂) over the metropolitan areas of Tehran, Karaj, and Qazvin during 2018–2022. The analysis employed the Copernicus Sentinel-5P OFFL Level-3 SO₂ product (COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2), which provides total vertical column SO₂ measurements derived from TROPOMI observations. Unlike conventional ground-based monitoring, which is constrained by the limited spatial coverage and temporal continuity of monitoring stations, satellite observations provide spatially continuous measurements over broad areas, making them particularly suitable for assessing regional-scale patterns and temporal variability of atmospheric SO₂. The TROPOMI instrument, aboard Sentinel-5P since its launch in October 2017, provides high-resolution observations of atmospheric trace gases and enables consistent monitoring of SO₂ over the study area. The satellite data were processed using JavaScript within the Google Earth Engine (GEE) platform. Monthly, seasonal, annual, and five-year mean SO₂ fields were derived from the TROPOMI observations for 2018–2022, and annual means were subsequently used to assess temporal changes in SO₂ concentrations. The processed raster outputs were exported from GEE and analyzed in ArcMap to generate spatial distribution and classification maps. To identify statistically significant spatial concentrations of elevated and low SO₂ values, the Getis-Ord Gi* Hot Spot Analysis was applied after converting the raster observations into point features. In addition, Global Moran's I was calculated to evaluate the overall degree of spatial autocorrelation and determine whether the observed SO₂ distribution exhibited clustered, random, or dispersed spatial patterns. The

satellite product reports SO₂ as total vertical column density (mol m⁻²); therefore, the retrieved values were interpreted as column amounts rather than near-surface concentrations and were not directly compared with ambient air-quality standards expressed in units such as µg m⁻³ or ppb.

Results and Discussion

The spatial distribution of SO₂ during 2018–2022 revealed pronounced heterogeneity across the Tehran–Karaj–Qazvin metropolitan corridor, with the highest concentrations concentrated in industrial areas of Qazvin, southern Tehran, and eastern Alborz. These areas largely coincide with major industrial zones, thermal power plants, cement industries, and high-traffic corridors, indicating the dominant contribution of combustion-related and stationary sources to regional SO₂ loading. In contrast, the Alborz highlands, northern Tehran, and southern Qazvin generally exhibited lower SO₂ values, which can be associated with lower population and industrial densities and more favorable atmospheric ventilation. The Getis-Ord Gi* analysis further confirmed this spatial differentiation, identifying statistically significant hot spots at the 99% confidence level in northeastern Qazvin and central Tehran. Several of these hot spots spatially corresponded with major emission sources, including the Shahid Rajaei, Montazeri Qaim, Ba'ath, Parand, Rey, and Pakdasht power plants. Conversely, significant cold spots were predominantly detected over the Alborz mountain range, northern Tehran, and southern Qazvin, reinforcing the role of topography, emission-source density, and atmospheric ventilation in shaping the spatial distribution of SO₂. The Global Moran's I results likewise indicated a non-random spatial structure, demonstrating that SO₂ concentrations tend to form spatially clustered patterns rather than being randomly distributed across the study area. Temporal analysis revealed substantial variability in SO₂ concentrations throughout the study period. Annual concentrations increased from 2019 and reached their highest levels in 2020, followed by a relative decline in 2021. This temporal variability likely reflects the combined influence of emission intensity, fossil-fuel consumption, atmospheric conditions, and changes in energy use and emission-control practices. In particular, periods characterized by atmospheric stability and temperature inversions can suppress vertical dispersion and promote the accumulation of SO₂ within the lower troposphere. The seasonal analysis showed that winter consistently recorded the highest SO₂ concentrations, whereas spring and summer generally exhibited lower values. The winter maximum can be attributed to increased fuel consumption for heating, greater reliance on fossil fuels, and the frequent occurrence of stable atmospheric conditions and temperature inversions. The use of higher-sulfur fuels, including fuel oil (mazut) during periods of natural-gas shortages, may further intensify SO₂ emissions from thermal power plants. Despite the generally lower concentrations during summer, elevated values persisted around major industrial sources, particularly the Shahid Rajaei power plant, highlighting the sustained influence of stationary emission sources independent of seasonal meteorological variability. The monthly analysis revealed a clear seasonal cycle, with SO₂ concentrations beginning to increase from September and reaching their maximum in January, followed by a gradual decline toward spring and summer. Concentrations remained comparatively low from approximately April to August, coinciding with stronger atmospheric mixing, more effective ventilation, and reduced heating-related fuel demand. The spatial distribution of hot spots remained relatively stable across seasons, with a persistent concentration of significant hot spots along the industrial corridor between Tehran and Qazvin. However, the number and extent of 99% confidence-level hot spots were comparatively lower during winter, which may reflect the broader regional accumulation of SO₂ under stagnant atmospheric conditions and consequently a reduction in the spatial contrast between highly polluted and less polluted areas. Overall, the consistent spatial correspondence between SO₂ hot spots and major industrial and power-generation facilities, together with the observed seasonal cycle, indicates that both emission sources and atmospheric dispersion conditions play complementary roles in controlling the regional distribution of SO₂. These findings demonstrate the value of Sentinel-5P/TROPOMI observations combined with spatial statistical techniques for identifying persistent pollution hotspots and characterizing regional-scale patterns that may not be adequately captured by the limited spatial coverage of ground-based monitoring networks.

Conclusion

The findings demonstrate that SO₂ distribution across the Tehran–Karaj–Qazvin metropolitan corridor is strongly associated with industrial activities, thermal power plants, and other combustion-related emission sources. Significant hot spots were consistently concentrated around major industrial and power-generation centers, particularly in southern Tehran and Qazvin, whereas mountainous and less industrialized areas generally exhibited lower concentrations. The pronounced seasonal cycle, characterized by maximum SO₂ levels in winter and January and lower concentrations during spring and summer, reflects the combined effects of increased fuel consumption, temperature inversions, and reduced atmospheric ventilation during the cold season. Overall, the integration of Sentinel-5P/TROPOMI observations with Getis-Ord Gi* and spatial autocorrelation analysis provides an effective framework for identifying persistent SO₂ hotspots and improving understanding of its regional spatiotemporal variability. The results can support more targeted air-quality monitoring and emission-control strategies, particularly around major industrial and power-generation sources and during periods of unfavorable atmospheric conditions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

The satellite-based sulfur dioxide (SO₂) data used in this study were obtained from the Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) mission, specifically the TROPOMI instrument, via the Google Earth Engine platform (<https://earthengine.google.com/>). These data are publicly available and can be accessed through the Earth Engine Data Catalog under the product ID COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_SO2. All data processing and analysis were performed using the Earth Engine Code Editor environment, and the procedures are reproducible based on the descriptions provided in the Methods section.

Acknowledgements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.



دسترسی آزاد

نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2026.98532.1664

مقاله پژوهشی



تغییرات فضایی - زمانی و شناسایی مناطق بحرانی آلاینده دی اکسید گوگرد در دامنه جنوبی البرز مرکزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

محمد ناجی^۱، قاسم عزیزی^{۲*}، مصطفی کریمی^۲^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران^۲ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸	دی اکسید گوگرد از آلاینده‌های جوی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها و صنایع است. این آلاینده در ناحیه صنعتی تهران-کرج-قزوین به‌طور قابل توجهی مشاهده می‌شود. این پژوهش با هدف تحلیل الگوی فضایی-زمانی SO_2 و شناسایی نواحی بحرانی، با تأکید بر نیروگاه‌ها و مراکز صنعتی، در دوره ۱۳۹۷-۱۴۰۱ انجام شد. برای استخراج ستون عمودی کل SO_2 از داده‌های سنجنده TROPOMI ماهواره Sentinel-5P استفاده شد. پردازش در Google Earth Engine و تحلیل‌های فضایی در ArcGIS انجام گرفت. تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه و میانگین پنج‌ساله بررسی و تحلیل لکه‌های داغ اجرا شد. نتایج نشان داد بیشترین غلظت SO_2 در مناطق صنعتی استان قزوین، نواحی جنوبی تهران و بخش‌هایی از شرق البرز متمرکز است. تحلیل لکه‌های داغ، خوشه‌بندی معنادار آلودگی را در محور صنعتی تهران-قزوین نشان داد که استقرار شهرک‌های صنعتی، نیروگاه‌های حرارتی و تردد وسایل نقلیه باری مؤثر هستند. نواحی پیرامون نیروگاه‌هایی مانند شهید رجایی از کانون‌های آلودگی شناسایی شدند. در مقابل، نواحی مرتفع و شمالی به دلیل تهویه طبیعی مناسب‌تر و محدودیت منابع انتشار، غلظت کمتری داشتند. روند سالانه SO_2 طی دوره مطالعه افزایشی بود و در سال ۱۴۰۰ به بیشینه رسید. شاخص موران جهانی خودهمبستگی فضایی قوی و معناداری را تأیید کرد که بیانگر خوشه‌ای بودن توزیع آلاینده و نقش منابع انتشار ثابت است. بیشترین غلظت در فصل سرد و به‌ویژه دی و بهمن مشاهده شد، درحالی‌که تیر و مرداد مقادیر پایین‌تری داشتند. نتایج نشان می‌دهد تمرکززدایی صنعتی، اصلاح الگوی سوخت و کنترل انتشار در مدیریت آلودگی SO_2 مؤثر است.
کلمات کلیدی: تحلیل فضایی-زمانی دی اکسید گوگرد سنجش از دور ماهواره‌ای کیفیت هوا نقاط داغ آلودگی	

مقدمه

با شکل‌گیری سکونتگاه‌های متمرکز انسانی، آلودگی هوا به‌عنوان یکی از چالش‌های زیست‌محیطی پدیدار شد (Naji, Azizi, 2025). گسترش شتابان شهرنشینی، این معضل را تشدید کرده و آن را به یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی کلان‌شهرهای جهان با پیامدهای گسترده تبدیل کرده است (Azizi, Naji & Karimi, 2024). کاهش کیفیت هوا به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی شهرهای جهان تبدیل شده است. در دهه گذشته، تشدید پیامدهای ناشی از این پدیده، توجه فزاینده جامعه علمی، دولت‌ها و سیاست‌گذاران را به خود جلب کرده و آلودگی هوا را به یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های جهانی در حوزه محیط‌زیست و سلامت انسان تبدیل کرده است (Mayer, 1999; Fan, Zhao & Yang, 2020).

یکی از پیامدهای صنعتی‌شدن، افزایش انتشار ترکیبات گوگردی به اتمسفر است (Asilian, Ghaneian & Ghanizadeh, 2007). اکسیدهای گوگرد به عنوان یکی از فراگیرترین آلاینده‌های جوی ناشی از فعالیت انسان، بیشترین توجه را در مطالعات علمی و پژوهش‌های مرتبط با آلودگی هوا به خود اختصاص داده‌اند (Geravandi et al., 2015). بیش از ۸۰ درصد دی‌اکسید گوگرد^۱ موجود در جو ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی است که توسط فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود (Ghozikali, 2015). در این میان، نیروگاه‌های تولید برق سهمی در حدود ۸۵ درصد از انتشار این گاز را به خود اختصاص داده‌اند، درحالی‌که سهم وسایل نقلیه موتوری تنها حدود ۲ درصد برآورد می‌شود (Gharoundi et al., 2016). دی‌اکسید گوگرد گازی بی‌رنگ و غیرقابل انفجار است که دارای بویی تند و خفه‌کننده بوده و تقریباً دو برابر سنگین‌تر از هوا است. این گاز با سطوح مختلف مواد جامد و ذرات معلق در جو واکنش شیمیایی انجام داده و در فرآیندهای زیست‌محیطی و شیمیایی اتمسفر نقش مهمی ایفا می‌کند (Mohammadi et al., 2016). برآوردها نشان می‌دهد که این آلاینده به‌طور میانگین بین ۲ تا ۴ روز در جو باقی می‌ماند (Rogers et al., 2000). از جمله منابع غیراحتراقی انتشار اکسیدهای گوگرد می‌توان به پالایشگاه‌های نفت، واحدهای ذوب مس و صنایع سیمان‌سازی اشاره کرد (Gharoundi et al., 2016). اکسیدهای گوگرد تأثیرات نامطلوبی بر سلامت انسان داشته و می‌توانند موجب تنگی مجاری تنفسی، اسپاسم برونش‌ها، تحریک و سوزش چشم و دستگاه تنفسی، کاهش ظرفیت و کارایی عملکرد ریوی، تنگی نفس، کاهش عمق تنفس و تضعیف سیستم دفاعی ریه شوند. در نهایت، مواجهه طولانی‌مدت با این آلاینده‌ها می‌تواند به تشدید بیماری‌های قلبی-عروقی و اختلالات تنفسی منجر شود (Kermani, 2016; Fallah Jokandan, Aghaei & Dowlati, 2016; Neisi et al., 2016).

ایران، همانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه، با چالش آلودگی ناشی از دی‌اکسید گوگرد مواجه بوده و از این معضل مستثنی نیست. بخش قابل‌توجهی از جمعیت ایران در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی، به‌ویژه در سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین، متمرکز شده‌اند. بر اساس آخرین سرشماری نفوس و مسکن، جمعیت ساکن در مناطق شهری این سه شهر بالغ بر ۱۵.۱۹۷.۱۱۶ نفر گزارش شده است (Statistical Center of Iran, 2016). با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی و ضرورت داشتن دید یکپارچه برای تحلیل زمانی-مکانی دی‌اکسید گوگرد، کمبود ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا یکی از چالش‌های اساسی محسوب می‌شود. این کمبود به‌ویژه در شهرهای کرج و قزوین مشهود است. افزون بر این، داده‌های موجود در ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا دارای نواقص و محدودیت‌های زمانی بوده که می‌تواند دقت و جامعیت تحلیل‌های مرتبط با آلودگی هوا را کاهش دهد؛ این محدودیت‌ها به‌طور خاص در مطالعات بلندمدت منجر به کاهش اعتبار نتایج و استنتاج‌های علمی می‌شود. اما فناوری سنجش از دور، آلودگی هوا را با دقت زمانی و مکانی بالاتری از روش‌های دیگر برآورد می‌کند (Saw, Dey, Kaushal & Lal, 2021).

این پژوهش به تحلیل توزیع فضایی و زمانی دی‌اکسید گوگرد در محدوده پرجمعیت و صنعتی سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین، با تأکید بر موقعیت نیروگاه‌ها و مراکز صنعتی، می‌پردازد. هدف اصلی مقاله، بررسی الگوی زمانی و مکانی میانگین پنج‌ساله (۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱) غلظت دی‌اکسید گوگرد و شناسایی مناطق بحرانی در محدوده مطالعه است. این تحلیل شامل بررسی تغییرات

سالانه، فصلی و ماهانه بوده و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ و رویکردی یکپارچه به منطقه انجام می‌شود. محاسبه میانگین پنج‌ساله، امکان ارزیابی دقیق‌تر و کاهش تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت را فراهم می‌کند، درحالی‌که تحلیل روند سالانه، الگوهای تغییرات تدریجی را نمایان می‌سازد. علاوه بر این، بررسی تغییرات فصلی و ماهانه می‌تواند در شناسایی عوامل مؤثر بر نوسانات دوره‌ای، نظیر شرایط جوی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، مؤثر باشد.

مطالعه تغییرات زمانی و مکانی آلودگی دی‌اکسید گوگرد همواره یکی از موضوعات مورد توجه محققان بوده است. کروتکوف و همکاران (Krotkov et al., 2016) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای OMI، تغییرات NO_2 و SO_2 را در مناطق صنعتی جهان طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ بررسی کردند. نتایج نشان داد که انتشار SO_2 در شرق ایالات متحده به دلیل پیشرفت‌های فناوریانه و اجرای مقررات سختگیرانه، ۸۰ درصدی کاهش یافته است، در حالی که در هند با افزایش نیروگاه‌های زغال‌سنگی، میزان SO_2 دو برابر شده است. علاوه بر این، نقاط داغ انتشار SO_2 در خلیج فارس، ناشی از فعالیت‌های نفت و گاز، شناسایی شد. شیائو و همکاران (Xiao, Wang, Wu, Fu & Zhu, 2018) ویژگی‌های مکانی-زمانی ۶ آلاینده از جمله SO_2 در شهر چنگدو واقع جنوب غربی چین با داده‌های ایستگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد میانگین سالانه SO_2 طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ کاهش یافته است. بیشترین غلظت SO_2 در مناطق شمالی چنگدو مشاهده شد که دلیل آن وجود صنایع و نیروگاه‌های زغال‌سنگی در این مناطق بود. ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2018) به بررسی روندها و الگوی انتشار دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد در مناطق شهری مغولستان پرداختند. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که غلظت SO_2 طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ روند افزایشی داشته، اما از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۶ به تدریج کاهش یافته است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که بالاترین غلظت این آلاینده در فصل زمستان رخ می‌دهد، در حالی که کمترین مقدار آن در فصل تابستان مشاهده می‌شود. آس و همکاران (Aas et al., 2019) تغییرات انتشار دی‌اکسید گوگرد در سطح جهانی طی سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۵ را بررسی کردند. نتایج، کاهش انتشار SO_2 در اروپا و آمریکای شمالی و افزایش آن در آسیا را نشان می‌دهد. گوا و همکاران (Guo, Umarova & Luan, 2020) ویژگی‌های مکانی و زمانی آلاینده‌های هوا در چین از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ با داده‌های سنجنده OMI بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که غلظت دی‌اکسید گوگرد در چین از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ روندی کاهشی داشته است. همچنین، تعداد شهرهایی که غلظت SO_2 آنها مطابق با سطح ۱ استاندارد کیفیت هوای محیطی چین بوده است، از ۱۵۷ شهر در سال ۲۰۱۵ به ۳۴۲ شهر در سال ۲۰۱۹ افزایش یافته است. یوسفیان و همکاران (Yousefian et al., 2020) به بررسی تغییرات زمانی آلاینده‌های هوای و تأثیرات پارامترهای هواشناسی بر غلظت آن‌ها در شهر تهران طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین میانگین غلظت سالانه SO_2 در سال ۱۳۹۱ و کمترین میزان آن در سال ۱۳۹۶ مشاهده شده است. همچنین غلظت SO_2 در فصل‌های سرد سال بیشتر از فصل‌های گرم بوده است. شکمبا و همکاران (Shikwambana, Mhangara & Mbatha, 2020) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵، روند تغییرات دی‌اکسید گوگرد را در آفریقای جنوبی طی دسامبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۱۹ بررسی کردند. نتایج نشان داد که الگوی فصلی این آلاینده‌ها تحت تأثیر باد قرار داشته و غلظت آن‌ها در زمستان افزایش و در تابستان کاهش می‌یابد.

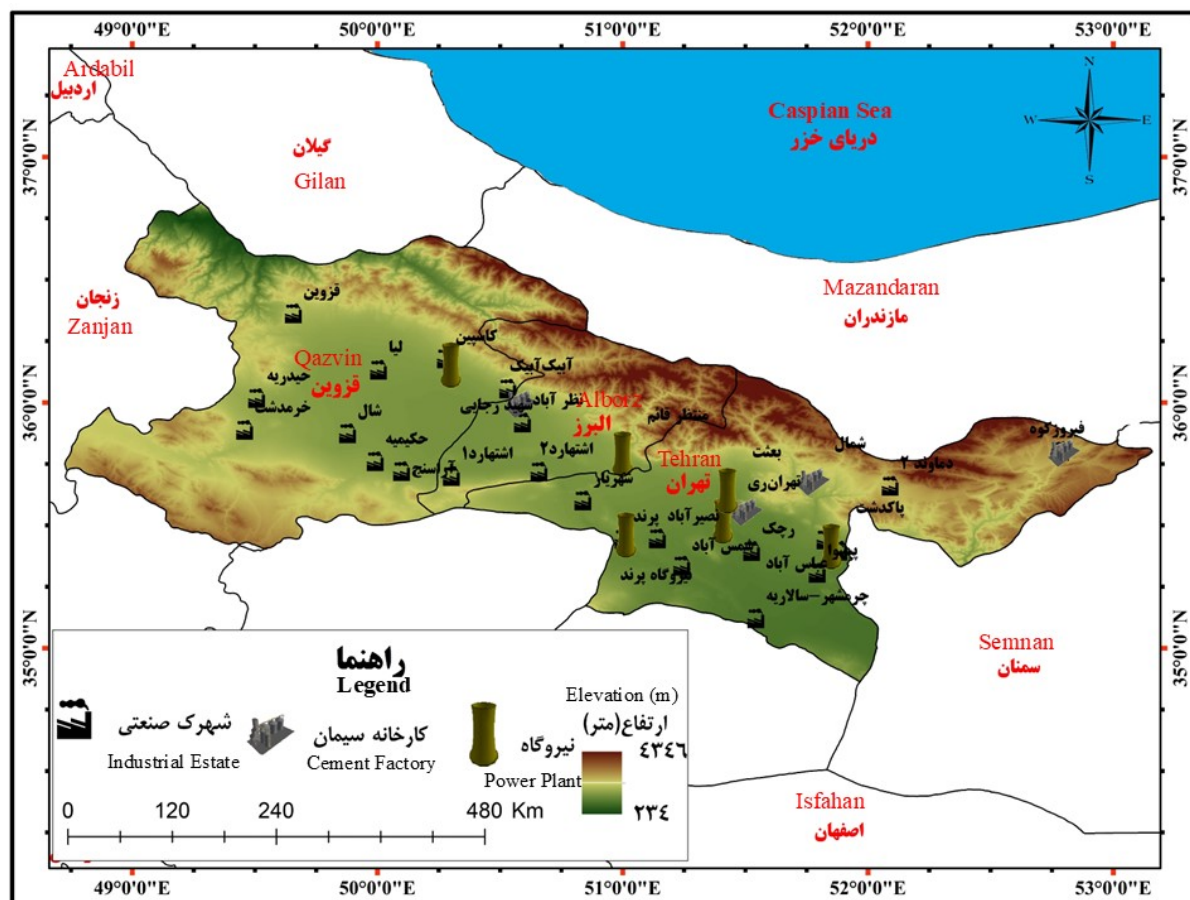
در ایران نیز شاه‌محمدی و همکاران (Shahmohammadi, Bayat & Mashhadizadeh Maleki, 2017) با استفاده از داده‌های سنجنده OMI، روند تغییرات دی‌اکسید نیتروژن در تهران را بررسی کردند. نتایج نشان داد بیشینه غلظت NO_2 در زمستان و کمینه آن در تابستان رخ می‌دهد. شاه‌محمدی و همکاران (Shahmohammadi Bayat & Mashhadizadeh Maleki, 2022) پژوهش دیگر با استفاده از داده‌های سنجنده OMI به تحلیل آلودگی هوای شهر اصفهان بر مبنای توزیع مکانی و زمانی دی‌اکسید نیتروژن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که غلظت NO_2 در ماه‌های گرم سال به حداقل مقدار خود می‌رسد، در حالی که در ماه‌های سرد سال بیشترین میزان آن ثبت شده است. قنادی و همکاران (Ghannadi, Shahri & Moradi, 2022) به پایش آلودگی هوا با استفاده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در سال، ۲۰۱۹ تهران آلوده‌ترین هوا را به لحاظ مجموع گازهای مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق داشته است. زینلی و همکاران (Zeynali, Malanouri & Safari, 2023) با بهره‌گیری از داده‌های سنجنده ماهواره‌ای سنتینل-۵، به تحلیل فضایی و زمانی آلاینده‌های جوی در استان آذربایجان شرقی پرداختند. یافته‌ها نشان داد که در فصول سرد سال، انتشار آلاینده‌های مونوکسید

کربن و دی اکسید نیتروژن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی افزایش یافته و مناطق گسترده‌تری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عبدالعظیمی و همکاران (Abdolazimi, Farhadi, Roosta & Mokhtari, 2023) به بررسی و پایش غلظت دی اکسید 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 دی اکسید نیتروژن در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ مربوط به فصل پاییز بود. در مطالعه پیشین، ناجی و همکاران (Naji et al., 2025) تغییرات زمانی و پراکنش مکانی شاخص ذرات معلق را در دامنه جنوبی البرز مرکزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بررسی کردند. با وجود اشتراک محدوده مطالعه، پژوهش حاضر بر دی اکسید گوگرد متمرکز است که از نظر منابع انتشار و رفتار فضایی-زمانی با ذرات معلق تفاوت دارد. همچنین، در این پژوهش با تأکید بر نیروگاه‌ها و مراکز صنعتی، تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه SO_2 و ساختار فضایی آن با استفاده از شاخص موران و شناسایی مناطق بحرانی بررسی می‌شود. از این‌رو، پژوهش حاضر تکرار مطالعه پیشین نیست، بلکه رویکردی مستقل برای تحلیل الگوی فضایی-زمانی و شناسایی کانون‌های بحرانی SO_2 ارائه می‌دهد.

با وجود انجام مطالعاتی درباره آلودگی هوا در دامنه جنوبی البرز مرکزی، از جمله مطالعه پیشین نویسندگان درباره شاخص ذرات معلق (Naji et al., 2025)، بررسی اختصاصی دی اکسید گوگرد در این منطقه از منظر الگوی فضایی-زمانی، ارتباط با منابع عمده انتشار و ساختار خودهمبستگی فضایی همچنان با خلأ پژوهشی مواجه است. مطالعه پیشین نویسندگان بر شاخص ذرات معلق متمرکز بود و هدف و ماهیت آلاینده مورد بررسی آن با پژوهش حاضر متفاوت است؛ از این‌رو، نتایج آن نمی‌تواند جایگزین ارزیابی مستقل SO_2 شود. به‌ویژه، تاکنون بررسی یکپارچه تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه SO_2 همراه با شناسایی کانون‌های بحرانی و ارزیابی ساختار فضایی آن با تأکید بر نیروگاه‌ها و مراکز صنعتی در محدوده تهران، کرج و قزوین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این منظر، پژوهش حاضر با تمرکز بر SO_2 ، ضمن تکمیل مطالعات پیشین، یک چارچوب مستقل برای شناخت الگوی فضایی-زمانی و تعیین مناطق بحرانی این آلاینده در دامنه جنوبی البرز مرکزی ارائه می‌کند.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی است که استان‌های تهران، البرز و قزوین را در بر می‌گیرد. این منطقه از سمت شمال به وسیله رشته‌کوه البرز محدود شده و به‌عنوان شمالی‌ترین فرونشست حوضه ایران مرکزی شناخته می‌شود (Azizi et al., 2024). موقعیت این محدوده، به‌ویژه به دلیل استقرار پایتخت سیاسی کشور، از اهمیت ژئوپلیتیکی و زیست‌محیطی بالایی برخوردار است. وسعت کلی این سه استان حدود ۴۰.۲۱۴ کیلومتر مربع بوده و محدوده جغرافیایی آن 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 امتداد دارد. ارتفاع میانگین استان‌های تهران، البرز و قزوین به ترتیب ۱۲۰۰، ۱۳۲۰ و ۱۲۷۰ متر از سطح دریاهای آزاد است و دامنه تغییرات ارتفاعی آن در منطقه مورد مطالعه به حدود ۴۶۰۰ متر می‌رسد (Naji et al., 2025؛ Nadian, Mirzaei & Soltani, 2017). بررسی نقشه‌های توپوگرافی (شکل ۱) نشان می‌دهد که شهرهای تهران و کرج از سمت شمال و شمال‌غرب توسط ارتفاعات البرز محصور شده‌اند. این موقعیت توپوگرافی تأثیر بسزایی بر الگوهای جریان جوی، به‌ویژه سرعت و جهت باد، دارد که به نوبه خود نقش مهمی در پراکندگی و تمرکز آلاینده‌های جوی ایفا می‌کند. در مقابل، بخش‌های مرکزی و شرقی استان قزوین عمدتاً از دشت‌های باز تشکیل شده است که شیب عمومی آن از شمال‌غرب به جنوب‌شرق امتداد دارد (Mansourmoghaddam, Naghipur, Roustae & Ghaffarian, 2022). از منظر آلاینده‌های زیست‌محیطی، این محدوده به دلیل استقرار ۲۳ شهرک صنعتی، ۴ کارخانه سیمان و ۶ نیروگاه حرارتی، یکی از کانون‌های انتشار آلاینده‌های هوا، به‌ویژه دی اکسید گوگرد، محسوب می‌شود که تأثیر چشمگیری بر کیفیت هوا و سلامت اکوسیستم‌های منطقه دارد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و موقعیت شهرک‌های صنعتی، کارخانه سیمان و نیروگاه

Fig. 1. Study Area and the Location of Industrial Parks, the Cement Plant, and the Power Plant

مواد و روش تحقیق

جهت بررسی تغییرات زمانی-مکانی دی اکسید گوگرد در منطقه مورد مطالعه از محصول^۱ ماهواره سنتینل-۵^۲ استفاده شد. ماهواره سنتینل ۵ به عنوان اولین ماهواره مأموریت کوپرنیکوس^۳ و یکی از ابزارهای قدرتمند در زمینه پایش 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. محصولات تولیدی این سنجنده در قالب داده‌های پیش‌پردازش شده ارائه می‌شوند که تصحیحات لازم رادیومتریکی و هندسی در آنها اعمال شده است؛ بنابراین، برای استفاده در تحلیل‌های علمی و کاربردی، نیازی به اصلاحات اولیه اضافی ندارند (Hassanzadeh, Hosseinjanizadeh & Honarmand, 2023). این سنجنده از باندهای ماوراءبنفش^۴ (۲۷۰-۳۲۰ نانومتر)، محدوده مرئی (۵۰۰-۳۱۰ نانومتر)، مادون قرمز نزدیک (۷۷۵-۶۷۵ نانومتر) و مادون قرمز طول موج کوتاه (۲۳۸۵-۲۳۰۵ نانومتر) پشتیبانی می‌کند. این ماهواره در مدار خورشید آهنگ با ارتفاع ۸۲۴ کیلومتر به نحو قابل قبولی غلظت کل ستون عمودی دی اکسید گوگرد را در جو اندازه‌گیری و پایش می‌کند (Veefkind et al., 2012؛ Gharibi & Shayesteh, 2021؛ Ghannadi et al., 2022). بر اساس نتایج مطالعات پیشین، داده‌های استخراج‌شده از سنجنده TROPOMI همبستگی بالایی با اندازه‌گیری‌های ایستگاهی زمینی داشته‌اند؛ به‌طوری‌که در اغلب موارد ضریب همبستگی بیش از $R=0.8$ گزارش شده است. این سطح از

1- Products
2- Sentinel-5
3- Copernicus
4- UV(Ultraviolet)

همبستگی نشان‌دهنده اعتبار و دقت بالای محصولات این سنجنده در پایش و ارزیابی آلاینده دی‌اکسید گوگرد می‌باشد (Savenets, Dvoretzka, Nadtochii & Zhemera, 2022؛ Lange et al., 2023؛ Hadian & Moradizadeh, 2023). برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی دی‌اکسید گوگرد و نحوه پراکنش آن‌ها، از محصول (COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2) استفاده شد. این تحلیل‌ها با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی جاوا اسکریپت^۱ و از طریق سامانه تحت وب گوگل ارث انجین^۲ 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 سنجنش از دور را مهیا کرده است (Farhadi & Najafzadeh, 2021). با استفاده از توابع برنامه‌نویسی در محیط Google Earth Engine، تصاویر میانگین غلظت دی‌اکسید گوگرد در مقیاس‌های زمانی مختلف شامل ماهانه، فصلی، سالانه و میانگین پنج‌ساله (۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱) به‌طور مستقیم از مجموعه داده‌های TROPOMI تولید شدند. همچنین، بر پایه میانگین‌های سالانه، روند تغییرات غلظت دی‌اکسید گوگرد در دوره مورد مطالعه بررسی شد. در ادامه، خروجی‌های رستری حاصل از پردازش در محیط Google Earth Engine استخراج و به نرم‌افزار ArcMap منتقل شدند. در این نرم‌افزار، نقشه‌های پراکنش مکانی میانگین غلظت دی‌اکسید گوگرد طبقه‌بندی و برای تحلیل الگوی فضایی این آلاینده در محدوده مورد مطالعه تهیه شدند.

جهت کشف دقیق‌تر از توزیع فضایی و شدت آلودگی دی‌اکسید گوگرد از لکه‌های داغ^۳ (خوشه مکانی با مقادیر زیاد) و لکه‌های سرد (خوشه مکانی با مقادیر کم) و آماره‌ی گتیس ارد جی^۴ 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 نشان‌دهد. برای انجام تحلیل لکه‌های داغ در نرم‌افزار 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. همچنین به‌منظور سنجنش و تحلیل الگوی فضایی آلاینده دی‌اکسید گوگرد، شاخص موران جهانی (Global Moran's I) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار ArcMap محاسبه شد. این شاخص با استفاده از ماتریس وزن‌های مکانی، میزان خودهمبستگی فضایی میان مقادیر غلظت در سلول‌های مجاور را بررسی می‌کند و نشان می‌دهد که توزیع مکانی آلاینده به‌صورت خوشه‌ای، تصادفی یا پراکنده است (Yuan, Sun, Chen & Xia, 2021). مقادیر بالای شاخص موران همراه با سطح معنی‌داری آماری، بیانگر وجود الگوی خوشه‌ای در پراکنش SO₂ بوده و بر تمرکز مکانی این آلاینده در نواحی خاصی که اغلب در مجاورت منابع اصلی انتشار قرار دارند، دلالت دارد. این روش آماری امکان تبیین دقیق‌تر روابط فضایی میان منابع آلاینده و تراکم آن‌ها در سطح منطقه را فراهم می‌سازد.

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش مقدار آلاینده‌ها را به‌صورت محتوای ستونی و در واحد mol/m^2 گزارش می‌کنند؛ این کمیت بیانگر مجموع آلاینده در کل ستون جو است و ماهیتاً با غلظت سطحی که در استانداردهای کیفیت هوا با واحدهایی مانند $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ یا ppb گزارش می‌شود، تفاوت بنیادی دارد. از این‌رو، مقایسه مستقیم مقدار ستونی با استانداردهای سطحی از نظر علمی معتبر نیست. تبدیل مقدار ستونی به غلظت سطحی نیازمند اطلاعات دقیق درباره پروفیل عمودی آلاینده، ضریب جرم نوری و ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای است که خود دارای عدم قطعیت‌های قابل توجه بوده و خارج از دامنه این مطالعه قرار می‌گیرد (Fioletov et al., 2016؛ Watson et al., 2025).

تحلیل نقاط داغ

در تحلیل فضایی، لکه‌های داغ به مناطقی اطلاق می‌شود که در آن‌ها تراکم بالایی از وقوع یک پدیده خاص مشاهده می‌شود. شناسایی این مناطق بر اساس الگوی توزیع فضایی داده‌ها و میزان تمرکز آن‌ها انجام شده و نقش کلیدی در مطالعات

1- JavaScript

2- Google Earth Engine (code.earthengine.google.com)

3- Hot Spot

4- Gi-Ord-Getis

زیست محیطی، اقتصادی، جرم‌شناسی و به‌ویژه پایش و مدیریت آلودگی هوا دارد. یکی از روش‌های استاندارد برای تحلیل لکه‌های داغ، استفاده از آماره گتیس-آرد جی است که به ارزیابی الگوهای خوشه‌بندی مقادیر بالا یا پایین در مجموعه داده‌ها می‌پردازد. این آماره مقدار هر عارضه را نسبت به همسایگانش بررسی کرده و مشخص می‌کند که آیا یک ناحیه دارای مقادیر بالا (نقاط داغ) یا پایین (نقاط سرد) است (Getis & Ord, 1992). میزان معناداری لکه‌های داغ با استفاده از امتیاز Z (Z-Score) و مقدار p -value سنجیده می‌شود. زمانی که مقدار Z برابر یا بیشتر از آستانه‌های مشخص باشد، سطح اطمینان لکه داغ تعیین می‌شود. اگر مقدار Z برابر یا بیشتر از ۱.۶۵ باشد، سطح اطمینان ۹۰ درصد، اگر برابر یا بیشتر از ۱.۹۶ باشد، سطح اطمینان ۹۵ درصد و در صورتی که این مقدار از ۲.۵۸ بیشتر باشد، سطح اطمینان ۹۹ درصد خواهد بود. به‌طور کلی، مقادیر مثبت و بالا نشان‌دهنده خوشه‌بندی مقادیر زیاد (نقاط داغ) و مقادیر منفی و پایین نشان‌دهنده خوشه‌بندی مقادیر کم (نقاط سرد) هستند. این روش تحلیلی امکان شناسایی مناطق بحرانی از نظر تجمع آلاینده‌های جوی، الگوهای انتشار صنعتی و نقاط مستعد آلودگی بالا را فراهم می‌سازد. آماره گتیس-آرد جی بر اساس فرمول مشخصی محاسبه می‌شود که در آن مقدار آماره برای هر عارضه با توجه به مقادیر متغیر مورد بررسی در موقعیت‌های مختلف و وزن فضایی میان عوارض محاسبه می‌شود (رابطه ۱) (Asgari, 2011). با استفاده از این رویکرد، می‌توان کانون‌های انتشار آلودگی، تأثیرات شرایط جوی و نواحی مستعد آلودگی حاد را با دقت بالایی تعیین کرد.

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

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

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

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

خودهمبستگی فضایی (شاخص موران)

شاخص خودهمبستگی فضایی موران (Moran's I) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های آماری برای ارزیابی الگوهای فضایی داده‌ها بر اساس موقعیت مکانی و مقادیر ویژگی‌های مورد بررسی است. این شاخص مشخص می‌کند که آیا توزیع فضایی یک ویژگی خاص، مانند غلظت آلاینده‌ها، به‌صورت تصادفی، پراکنده یا خوشه‌ای در فضا توزیع شده است. در این روش، ساختار فضایی داده‌ها از طریق تحلیل هم‌زمان مقادیر مشاهده‌شده و موقعیت جغرافیایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Asgari, 2011). دامنه تغییرات شاخص موران بین -۱ تا +۱ است. مقادیر نزدیک به +۱ بیانگر وجود الگوی خوشه‌ای و خودهمبستگی فضایی مثبت هستند؛ به این معنا که مقادیر مشابه تمایل دارند در مجاورت یکدیگر قرار گیرند. در مقابل، مقادیر نزدیک به -۱ نشان‌دهنده الگوی پراکنده یا خودهمبستگی فضایی منفی بوده و بیانگر استقرار مقادیر نامشابه در کنار یکدیگر است. همچنین، مقادیر نزدیک به صفر حاکی از توزیع تصادفی داده‌ها در فضا هستند. برای ارزیابی معنی‌داری آماری شاخص موران، معمولاً از آماره Z-Score و P-Value استفاده می‌شود. به‌گونه‌ای که اگر مقدار Z-Score بزرگ و خارج از محدوده اطمینان و مقدار P-Value بسیار کوچک (نزدیک به صفر) باشد، الگوی فضایی مشاهده‌شده از نظر آماری معنادار بوده و احتمال وقوع آن به‌صورت تصادفی بسیار ناچیز خواهد بود. فرمول محاسبه شاخص موران به صورت زیر است (Moran, 1948).

$$I = \frac{n \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n w_{ij} z_i z_j}{S_0 \sum_{i=0}^n z_i^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، (z_i) بیانگر اختلاف مقدار ویژگی در عارضه (i) با میانگین کل داده‌ها $(\bar{x})$ است. همچنین، (w_{ij}) وزن فضایی بین عوارض (i) و (j) ، (n) تعداد کل عوارض جغرافیایی موجود در لایه مورد بررسی و (S_0) مجموع کل اوزان فضایی است. به‌منظور

ارزیابی معنی‌داری آماری شاخص موران، آماره استاندارد Z-Score بر اساس رابطه (۵) محاسبه شد (Wang & Fang, 2016; Nadian et al., 2018).

$$Z_i = \frac{I-E(I)}{SD(I)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

اعتبار سنجی

به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد داده‌های ماهواره‌ای دی‌اکسید گوگرد حاصل از سنجنده TROPOMI، مقایسه‌ای بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه زمینی انجام شد. در این راستا، داده‌های ماهانه غلظت دی‌اکسید گوگرد ایستگاه پایش کیفیت هوا دانشگاه صنعتی شریف در شهر تهران طی دوره مورد مطالعه استخراج و با میانگین ماهانه داده‌های TROPOMI در موقعیت مکانی متناظر مقایسه گردید. با توجه به تفاوت ماهیت اندازه‌گیری‌ها، به گونه‌ای که داده‌های ایستگاهی بیانگر غلظت سطحی آلاینده و داده‌های TROPOMI نشان‌دهنده چگالی ستونی عمودی دی‌اکسید گوگرد در ستون جو هستند، انتظار تطابق کامل بین این دو مجموعه داده وجود ندارد. با این حال، نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که بین تغییرات زمانی داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد ($R^2=0.38$, $R=0.62$)، که بیانگر توانایی داده‌های TROPOMI در بازنمایی الگوی تغییرات زمانی دی‌اکسید گوگرد در منطقه مورد مطالعه است.

نتایج و بحث

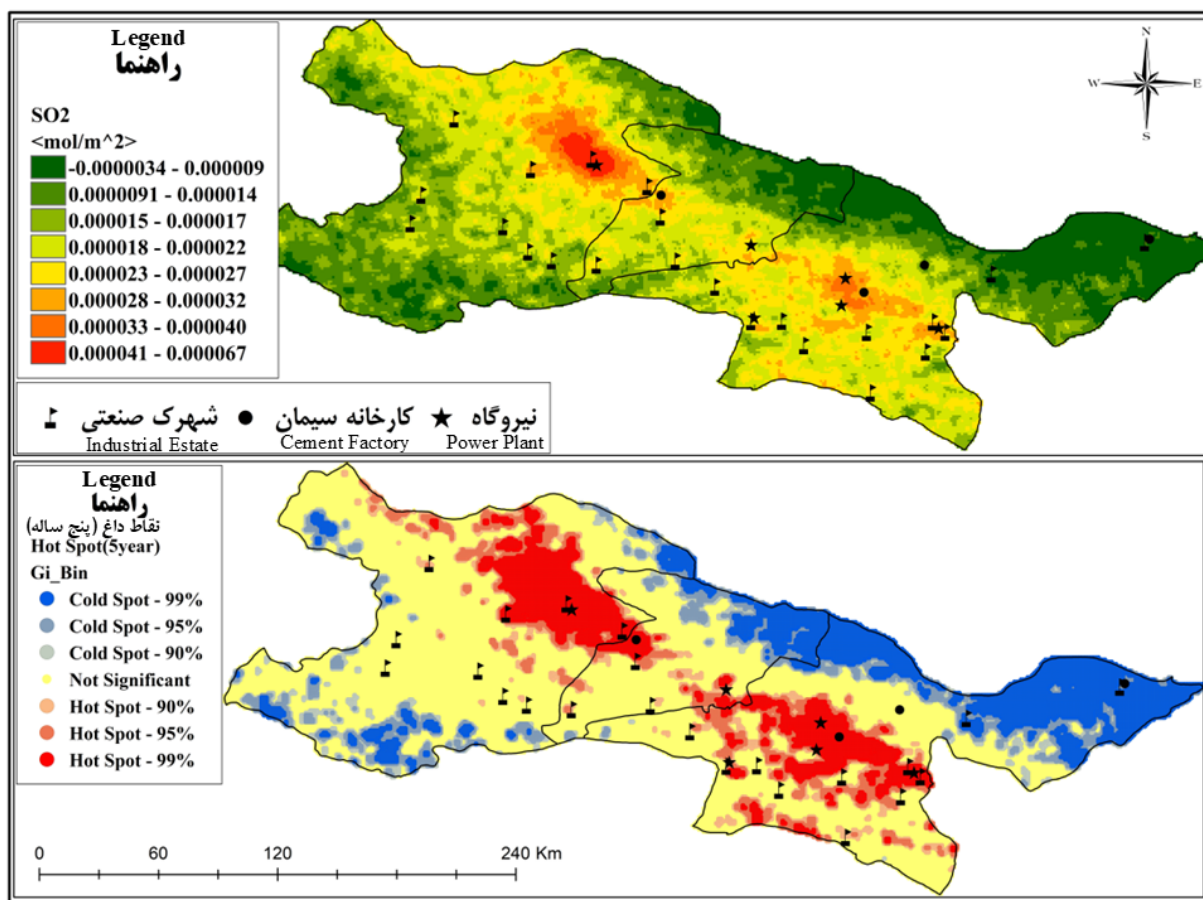
پراکنش مکانی میانگین ۵ ساله (۱۳۹۷-۱۴۰۱) دی‌اکسید گوگرد

در این مطالعه، توزیع مکانی و الگوی خوشه‌ای دی‌اکسید گوگرد در استان‌های تهران، البرز و قزوین طی یک دوره پنج ساله مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۲). نتایج حاصل از بررسی توزیع مکانی این آلاینده نشان می‌دهد که بیشترین غلظت‌های ثبت شده در مناطق صنعتی استان قزوین، نواحی شهری و جنوب کلان شهر تهران و بخش‌هایی از شرق البرز مشاهده شده است. این توزیع نشان دهنده نقش قابل توجه منابع آلاینده ثابت، از جمله نیروگاه‌ها، کارخانه‌های سیمان و شهرک‌های صنعتی، در افزایش غلظت دی‌اکسید گوگرد در این مناطق است. در واقع کمربند صنعتی تهران-قزوین، که به‌طور عمده منطبق بر مسیر آزاد راه تهران-قزوین است، به‌عنوان یکی از مناطق با انتشار بالای دی‌اکسید گوگرد شناخته می‌شود. استقرار شهرک‌های صنعتی متعدد، واحدهای تولیدی با مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و نیروگاه‌های حرارتی در این ناحیه، منجر به افزایش بار آلودگی شده است. علاوه بر این، حجم بالای تردد وسایل نقلیه سبک و سنگین، به‌ویژه کامیون‌ها و وسایل حمل‌ونقل باری که عمدتاً از سوخت‌های دیزلی استفاده می‌کنند، سهم قابل توجهی در انتشار این آلاینده دارد. ترکیب این عوامل، موجب افزایش غلظت دی‌اکسید گوگرد و شکل‌گیری خوشه‌های آلاینده در امتداد این محور صنعتی-ترابری شده است. در مقابل، نواحی مرتفع منطقه مورد مطالعه، تحت تأثیر جریان‌های هوایی غالب و فرآیندهای تهویه طبیعی جو، از غلظت‌های کمتری از دی‌اکسید گوگرد برخوردارند. علاوه بر این، بخش‌های جنوبی استان قزوین، به دلیل تراکم جمعیتی پایین، فقدان مراکز صنعتی بزرگ و عدم استقرار نیروگاه‌های سوخت فسیلی، انتشار محدودی از این آلاینده را تجربه می‌کنند که منجر به کاهش قابل توجه سطح SO_2 در این نواحی شده است.

جهت کشف دقیق‌تر از توزیع فضایی و شناسایی مناطق بحرانی از تحلیل نقاط داغ (خوشه مکانی با مقادیر زیاد) و نقاط سرد (خوشه مکانی با مقادیر کم) از آماره‌ی گتیس ارد جی (Getis- Ord- Gi) استفاده شد. نتایج حاصل از این تحلیل به‌وضوح نشان‌دهنده الگوی خوشه‌ای توزیع دی‌اکسید گوگرد در منطقه مورد مطالعه است. بر اساس یافته‌ها، گسترده‌ترین لکه‌های داغ این آلاینده، با سطح اطمینان ۹۹ درصد، در محدوده شمال شرق استان قزوین و در نزدیکی مرز سیاسی استان‌های البرز و قزوین شناسایی شدند. علاوه بر این، دومین خوشه پرشدت از نقاط داغ در نواحی مرکزی استان تهران مشاهده شد که بیانگر تمرکز بالای انتشار دی‌اکسید گوگرد در این مناطق است. در واقع نتایج این تحلیل نشان داد که خوشه‌های داغ با سطح معناداری ۹۹ درصد به‌طور عمده در مناطق صنعتی و اطراف نیروگاه‌ها متمرکز شده‌اند. در این میان، نیروگاه‌های شهید رجایی، منتظر قائم، بعثت، پرند، ری و پاکدشت مستقر در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان مهم‌ترین مراکز انتشار دی‌اکسید گوگرد شناسایی شدند. این

یافته‌ها بر اهمیت نقش صنایع انرژی‌بر و فرآیندهای احتراقی در افزایش آلودگی هوا تأکید دارد. این نقاط داغ به‌عنوان مناطقی شناخته می‌شوند که غلظت دی‌اکسید گوگرد در آن‌ها به‌طور معناداری بالاتر از میانگین منطقه است و نشان‌دهنده شرایط بحرانی‌تر از نظر آلودگی هوا در این نواحی است.

نقاط سرد در سطح اطمینان ۹۹ درصد در ارتفاعات البرز، تهران و جنوب قزوین 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 به خوبی نشان می‌دهند که تراکم دی‌اکسید گوگرد و آلودگی هوا در بخش‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه بالاتر است. در مقابل، بخش‌های شمالی نقشه، دارای کیفیت هوای بهتری هستند و نقاط سرد از نظر آلودگی محسوب می‌شوند.



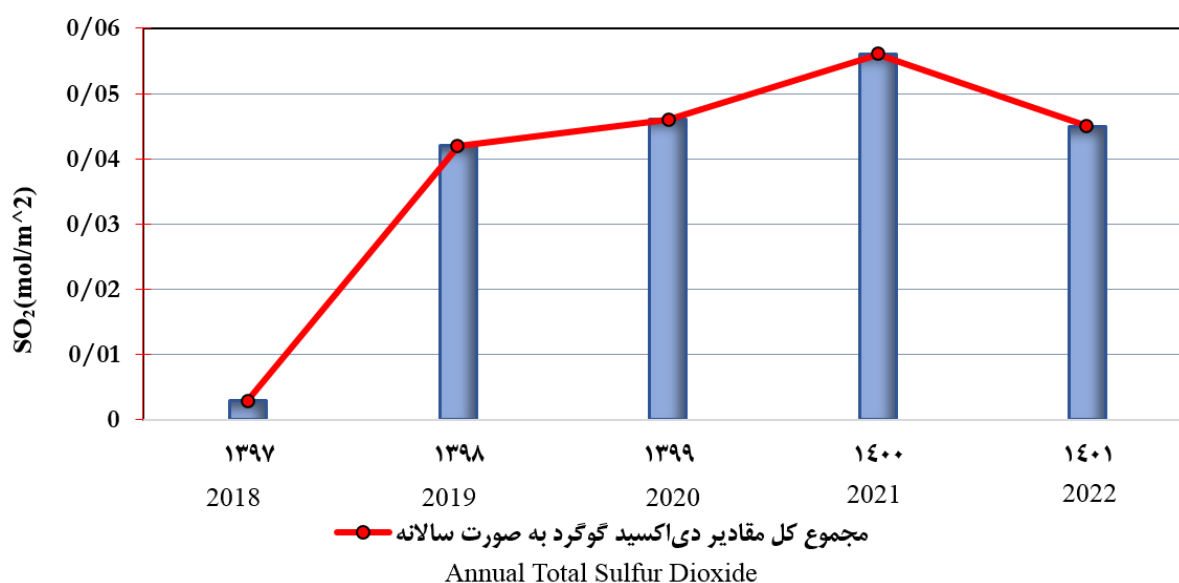
شکل ۲- (بالا) میانگین ۵ ساله پراکنش دی‌اکسید گوگرد و (پایین) تحلیل لکه‌های داغ (۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱)

Fig. 2. (Top) Five-Year Mean Distribution of Sulfur Dioxide (SO_2) and (Bottom) Hot Spot Analysis (2018–2022)

روندهای زمانی و مکانی سالانه دی‌اکسید گوگرد

شکل ۳ مجموع کل مقادیر دی‌اکسید گوگرد پایش شده در طول سال طی بازه زمانی ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱ نشان می‌دهد. این مقدار نشان‌دهنده تجمع کلی دی‌اکسید گوگرد در بازه زمانی مشخص (سالانه) است و مستقیماً میانگین غلظت را نشان نمی‌دهد، بلکه بیانگر کل بار آلودگی در این منطقه طی یک سال است. در ابتدا، مقدار دی‌اکسید گوگرد در سال ۱۳۹۷ بسیار پایین است، اما از سال ۱۳۹۸ روند افزایشی قابل توجهی مشاهده می‌شود. این افزایش می‌تواند ناشی از حاکمیت شرایط جوی پایدار، به‌ویژه ناشی از استقرار سامانه‌های واچرخندی در منطقه و کاهش تهویه جو و انباشت آلاینده‌ها باشد. از طرفی بر اساس اظهارات شرکت تولید نیروی برق حرارتی، میزان مصرف سوخت سنگین مازوت در سال ۱۳۹۷ حدود ۳.۵ میلیارد لیتر بوده است که این مقدار بنا بر گزارش‌ها در سال ۱۳۹۸ با افزایشی دو برابری همراه بوده است (Donya-e-Eqtesad, 2021). همچنین بر اساس داده‌های

منتشر شده توسط مرکز آمار ایران، میزان مصرف نفت کوره در استان قزوین طی سال ۱۳۹۷ برابر با ۱۹۰.۳۲۷ مترمکعب گزارش شده است که این مقدار در سال ۱۳۹۸ با افزایشی قابل توجه به ۵۰۱.۳۸۵ مترمکعب رسیده است (Iranian Statistical Center, 2021). شایان ذکر است که اطلاعات مربوط به میزان مصرف سوخت در استان تهران توسط نهادهای مسئول ارائه نشده است. از سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰، میزان انتشار دی‌اکسید گوگرد به‌طور پیوسته افزایش یافته و در سال ۱۴۰۰ به بیشترین مقدار خود در این دوره زمانی رسیده است. این اوج می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد، از جمله افزایش استفاده از منابع انرژی آلاینده، افزایش تردد وسایل نقلیه، یا وقوع شرایط جوی نامساعد مانند پایداری جو و وارونگی دما که منجر به انباشت آلودگی در لایه‌های پایین جو شده است. پس از رسیدن به حداکثر مقدار در سال ۱۴۰۰، میزان دی‌اکسید گوگرد در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته است. برای درک بهتر این روند، در ادامه تغییرات دی‌اکسید گوگرد را به‌صورت فصلی بررسی می‌شود تا مشخص شود که آیا فصول سرد، که معمولاً با افزایش وارونگی دما همراه هستند، تأثیر بیشتری بر افزایش میزان این آلاینده داشته‌اند یا خیر.



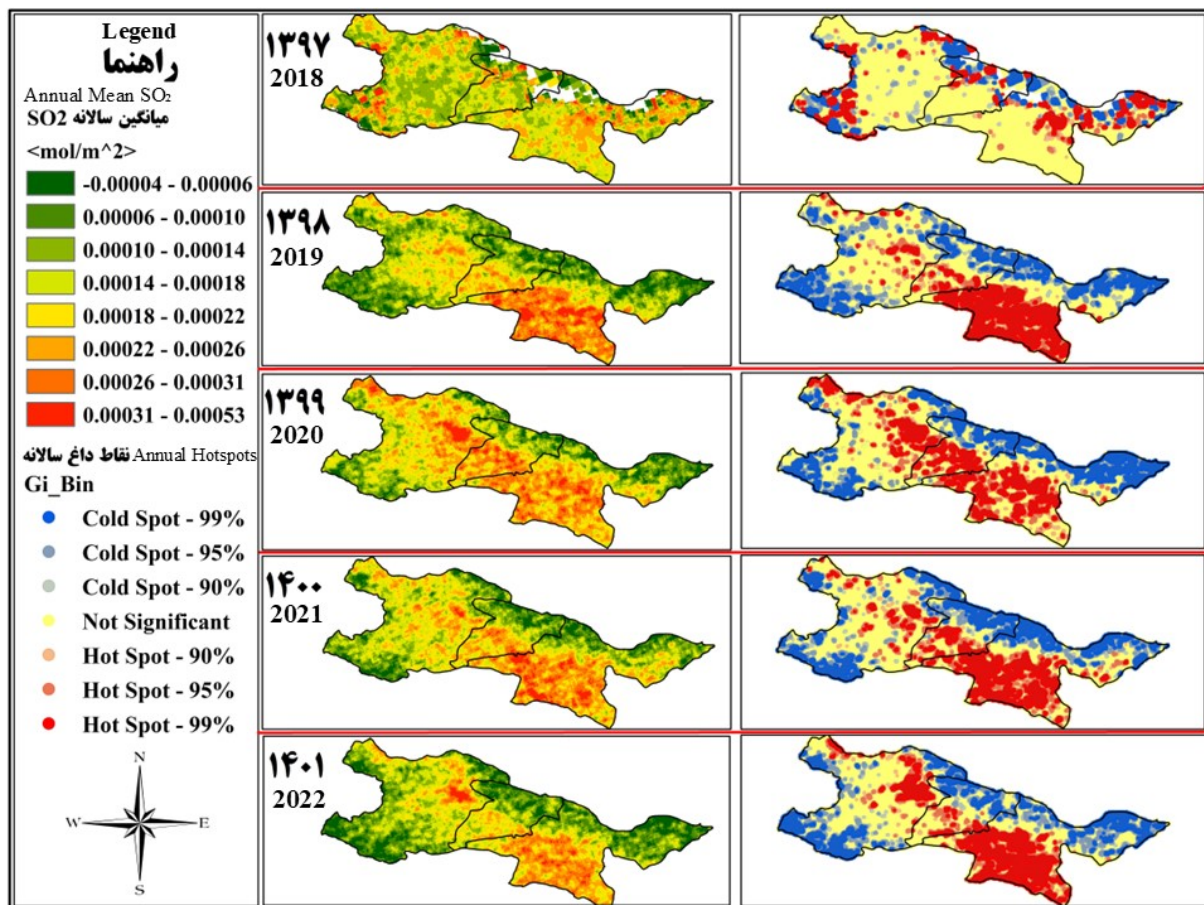
شکل ۳- مجموع کل مقادیر دی‌اکسید گوگرد پایش شده در طول سال طی بازه زمانی ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱

Fig. 3. Annual Total of Monitored Sulfur Dioxide over the Period 2018–2022

شکل ۴ روند تغییرات فضایی و زمانی دی‌اکسید گوگرد و تحلیل نقاط داغ را طی بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱ نمایش می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، طی بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰، میزان انتشار دی‌اکسید گوگرد روندی افزایشی داشته و در سال ۱۴۰۰ به حداکثر مقدار خود در این دوره رسیده است. بیشترین تراکم این آلاینده عمدتاً در نیمه جنوبی استان تهران و نواحی صنعتی، به‌ویژه در اطراف نیروگاه‌های حرارتی، از جمله نیروگاه شهید رجایی، مشاهده می‌شود. این الگوی پراکنش به‌صورت پیوسته از تهران به سمت کرج و قزوین توسعه یافته و با امتداد آزادراه تهران-قزوین هم‌راستا شده است. حضور مراکز صنعتی و نیروگاهی در امتداد این مسیر، همراه با تردد بالای وسایل نقلیه سنگین، می‌تواند در تشدید این روند نقش قابل توجهی ایفا کند. نکته حائز اهمیت آن است که در سال ۱۳۹۹، استان البرز نسبت به سایر سال‌ها گستره وسیع‌تری از آلودگی دی‌اکسید گوگرد را تجربه کرده است. علاوه بر این، در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۱، ناحیه پیرامونی نیروگاه شهید رجایی به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی انتشار، دارای غلظت بالایی از این آلاینده بوده است. از نظر توزیع فضایی، سال ۱۳۹۷ کمترین وسعت جغرافیایی تحت تأثیر دی‌اکسید گوگرد را نشان می‌دهد.

همچنین تحلیل سالانه لکه‌های داغ دی‌اکسید گوگرد طی بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱ با سطوح اطمینان ۹۵/۹۹ و ۹۰ درصد نمایش داده شده است (شکل ۴ سمت راست). این تحلیل به شناسایی نواحی با تراکم بالای دی‌اکسید گوگرد به صورت سالانه کمک کرده و مناطق بحرانی از نظر آلودگی هوا را آشکار می‌سازد. تحلیل الگوی سالانه توزیع لکه‌های داغ نشان می‌دهد که این

الگوها در طی دوره مورد مطالعه دستخوش تغییرات قابل توجهی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مساحت نواحی دارای خوشه‌های بحرانی آلودگی، به‌ویژه در سطح اطمینان ۹۹ درصد، در سال ۱۳۹۷ از مقدار کمتری برخوردار است. تحلیل الگوی توزیع لکه‌های داغ در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که این الگوها طی این دوره از ثبات نسبی برخوردار بوده‌اند. به بیان دیگر، تغییرات مکانی در تراکم دی‌اکسید گوگرد در این سال‌ها چندان قابل توجه نبوده و پراکنش فضایی این آلاینده روندی پایدار را نشان می‌دهد. در سطح اطمینان ۹۹ درصد، گسترده‌ترین لکه‌های داغ در نیمه جنوبی استان تهران، نواحی مرکزی استان البرز و محدوده نیروگاه شهید رجایی در استان قزوین مشاهده می‌شود. استمرار بالاترین غلظت‌های دی‌اکسید گوگرد در این مناطق طی دوره مذکور حاکی از پایداری منابع آلاینده، از جمله فعالیت‌های صنعتی، نیروگاه‌های حرارتی، و تردد بالای وسایل نقلیه سنگین است. این پدیده نشان‌دهنده آسیب‌پذیری مداوم کلان شهرهای تهران، کرج، و قزوین در برابر آلودگی هوا بوده است. نقاط سرد در سطح اطمینان ۹۹ درصد در شمال منطقه مورد مطالعه و جنوب غرب قزوین، به‌ویژه در ارتفاعات البرز و نواحی با تراکم جمعیتی کمتر، شناسایی شده‌اند. این نواحی به طور مشخص در مکان‌هایی قرار دارند که فعالیت‌های صنعتی محدودتری وجود دارد و جریان هوای بهتری را تجربه می‌کنند.



شکل ۴- سری زمانی میانگین سالانه پراکنش دی‌اکسید گوگرد (چپ) و الگوی فضایی لکه‌های داغ (راست) ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱

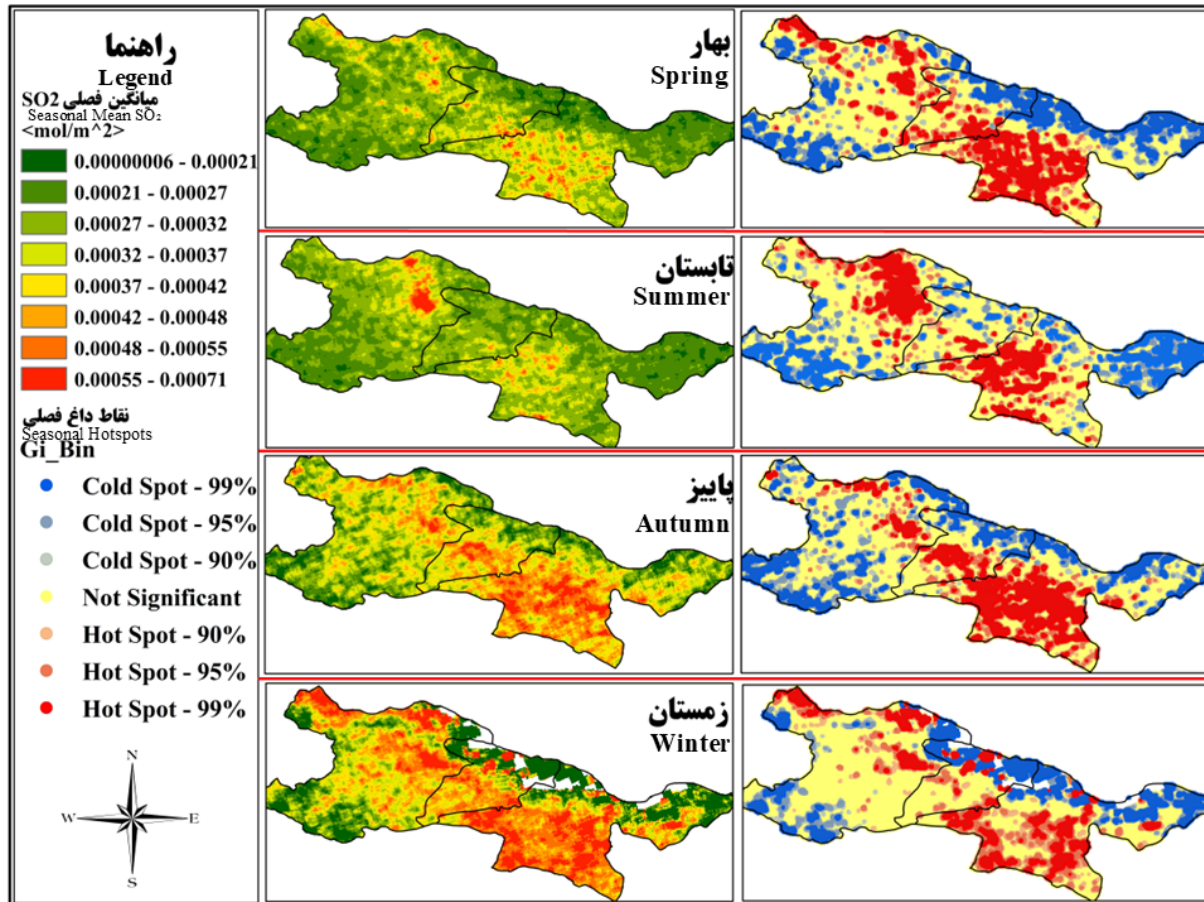
Fig. 4. Time Series of the Annual Mean Distribution of Sulfur Dioxide (SO₂) (Left) and Spatial Pattern of Hot Spots (Right), 2018–2022

تحلیل فصلی و پراکنش مکانی توزیع دی‌اکسید گوگرد

پراکنش و غلظت دی‌اکسید گوگرد 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 این آلاینده را به تفکیک فصول مختلف مورد بررسی قرار داده است. تحلیل‌های فصلی نشان می‌دهد که بیشترین غلظت دی‌اکسید گوگرد در فصل زمستان به ثبت رسیده است، که این امر تحت تأثیر شرایط اقلیمی خاص این فصل قرار دارد. در واقع، طی فصول پاییز و

زمستان، افزایش فراوانی و شدت وارونگی دما به عنوان یکی از مهم ترین عوامل مؤثر در انباشت آلاینده ها نقش بسزایی دارد. در مقابل، غلظت دی اکسید گوگرد در فصول بهار و تابستان به میزان قابل توجهی کمتر از پاییز و زمستان است. این کاهش را می توان به شرایط جوی مساعدتر در این فصول نسبت داد، از جمله افزایش دما و افزایش سرعت باد. در فصل تابستان، هسته اصلی تمرکز این آلاینده در اطراف نیروگاه شهید رجایی مشاهده می شود. این منطقه به عنوان کانون اصلی انتشار در این فصل شناخته می شود، که ممکن است ناشی از افزایش بار مصرفی نیروگاه به دلیل تقاضای بالای برق در تابستان باشد. در فصول سرد، به ویژه زمستان، غلظت بالای دی اکسید گوگرد بخش وسیعی از استان های تهران، البرز و نیمه شمالی استان قزوین را تحت تأثیر قرار می دهد. طی فصل مذکور، به دلیل افزایش مصرف سوخت های فسیلی برای گرمایش و فعالیت های صنعتی، غلظت دی اکسید گوگرد به طور چشمگیری افزایش می یابد. در واقع سوخت اصلی مصرفی این نیروگاه گاز طبیعی است اما با شروع فصل سرد (پاییز و زمستان)، به دلیل مصرف زیاد گاز در نتیجه کمبود گاز طبیعی در این سه کلان شهر از سوخت اضطراری یعنی مازوت استفاده می شود. الگوی فصلی تحلیل لکه های داغ طی فصول مختلف تا حدودی به یکدیگر شبیه است. اما در سطح اطمینان ۹۹ درصد، نقاط داغ در فصل زمستان از فراوانی کمتری برخوردار است. این بدان معنا نیست که غلظت دی اکسید گوگرد در زمستان نسبت به دیگر فصول کمتر است. همان گونه که بیان شد، غلظت دی اکسید گوگرد در زمستان از مقدار بالاتری نسبت به دیگر فصول برخوردار است. به خوبی آشکار است که محدوده صنعتی قزوین-تهران به عنوان یکی از کانون های اصلی انتشار دی اکسید گوگرد در منطقه شناخته می شود. این تمرکز عمدتاً ناشی از فعالیت نیروگاه های حرارتی بزرگ از جمله نیروگاه شهید رجایی در استان قزوین و نیروگاه های مستقر در نواحی جنوبی تهران است و در سطح اطمینان ۹۹ درصد به عنوان نقاط داغ انتشار دی اکسید گوگرد شناسایی شده اند. این الگوی انتشار در فصل تابستان به طور برجسته تری مشاهده می شود. نقاط سرد طی فصول مختلف در شمال منطقه مورد مطالعه، ارتفاعات البرز، جنوب غربی استان قزوین در نواحی با تراکم جمعیتی کمتر، فعالیت های صنعتی محدودتر و جریان هوای بهتر واقع شده اند.

جدول ۱ نتایج شاخص موران جهانی را برای میانگین ۵ ساله آلاینده دی اکسید گوگرد و میانگین های فصلی آن در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد. بررسی آماری شاخص موران (Moran's I) برای غلظت میانگین دی اکسید گوگرد در مقیاس میانگین ۵ ساله و چهار فصل سال نشان دهنده وجود الگوی قوی خوشه ای در توزیع مکانی این آلاینده است. مقدار شاخص موران در بازه ای بسیار بالا و نزدیک به ۱ قرار دارد که دلالت بر همبستگی فضایی مثبت و شدید میان نواحی مجاور دارد. بیشترین مقدار شاخص موران مربوط به میانگین کلی پنج ساله با عدد ۰/۹۸۵ است که همراه با z-score بسیار بالا (۲۵۹۳/۱۱) و p-value برابر با نزدیک به صفر است که این به وضوح نشان می دهد که توزیع مکانی SO₂ به طور معناداری تصادفی نبوده و در عوض، به صورت خوشه ای متمرکز شده است. در مقیاس فصلی نیز مقدار شاخص موران در تمامی فصول به صورت معناداری بالا است: در بهار ۰/۹۵۴، تابستان ۰/۹۶۱، پاییز ۰/۴۷۶ و زمستان ۰/۸۱۰ که همگی با z-score های بالاتر از ۲۴۵ و p-value نزدیک به صفر تأیید می شوند. این نتایج نشان می دهند که الگوی خوشه بندی آلاینده در تمام طول سال حفظ شده و نوسانات فصلی تأثیر چندانی در ساختار فضایی توزیع SO₂ نداشته اند. چنین الگوی خوشه ای قابل توجهی به وضوح بازتابی از استقرار جغرافیایی منابع عمده انتشار دی اکسید گوگرد است که شامل نیروگاه های حرارتی، پالایشگاه ها، کارخانه های سیمان و تردد بالای وسایل نقلیه سنگین هستند.



شکل ۵- میانگین فصلی پراکنش دی اکسید گوگرد (چپ) و تحلیل لکه های داغ (راست) ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱

Fig. 5. Seasonal Mean Distribution of Sulfur Dioxide (SO_2) (Left) and Hot Spot Analysis (Right), 2018–2022

جدول ۱- خودهمبستگی مکانی (شاخص موران جهانی) غلظت SO_2 : میانگین های فصلی و میانگین ۵ ساله

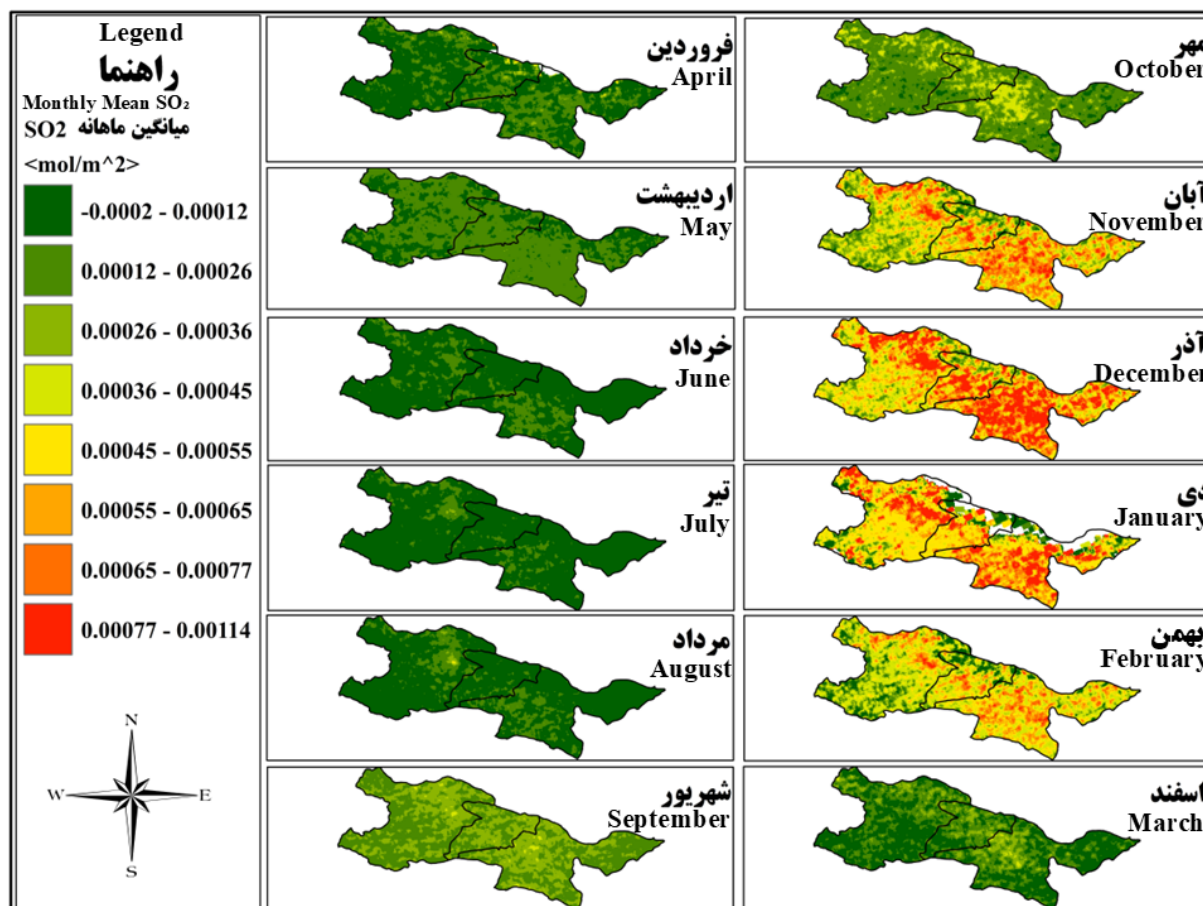
Table 1- Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) of SO_2 Concentration: Seasonal Means and Five-Year Mean

Season / Period فصل / دوره زمانی	Moran's Index شاخص موران	Expected Index شاخص مورد انتظار	Variance واریانس	z-score	p-value	Statistical Interpretation تفسیر آماری
میانگین ۵ ساله Mean 5 year	0.985014	-0.000029	0.000014	259.311	0.000000	Clustered خوشه ای
بهار Spring	0.954707	-0.000029	0.000014	251.334	0.000000	Clustered خوشه ای
تابستان Summer	0.961982	-0.000029	0.000014	253.258	0.000000	Clustered خوشه ای
پاییز Autumn	0.47601	-0.000029	0.000014	249.465	0.000000	Clustered خوشه ای
زمستان Winter	0.8101	-0.000030	0.000008	294.752	0.000005	Clustered خوشه ای

تغییرات ماهانه و پراکنش مکانی دی اکسید گوگرد

پراکنش و غلظت دی اکسید گوگرد به صورت میانگین ماهانه در طول دوره مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج تحلیل میانگین ماهانه غلظت دی اکسید گوگرد در استان های تهران، البرز و قزوین نشان دهنده نوسانات فصلی قابل توجهی در توزیع این آلاینده است. در ماه های گرم سال (فروردین تا شهریور)، غلظت دی اکسید گوگرد در سطح منطقه نسبتاً پایین بوده و پراکندگی آن محدود است. از ابتدای مهرماه به ویژه طی ماه های آبان و آذر، روندی افزایشی و تدریجی در غلظت آلاینده ها مشاهده می شود که این فرایند در دی ماه به بیشینه خود می رسد. این افزایش می تواند به افزایش فعالیت های گرمایشی، کاهش دما و تشدید پدیده وارونگی دما مرتبط باشد که منجر به انباشت آلاینده ها در لایه های پایین جو می شود. در ادامه، طی ماه های

بهمن و اسفند، غلظت دی‌اکسید گوگرد روند کاهشی خود را آغاز می‌کند. بیشترین تراکم این آلاینده در نواحی صنعتی و نیروگاهی، به‌ویژه جنوب تهران و نیروگاه شهید رجایی در قزوین، مشاهده شده است که این مناطق به‌عنوان مراکز اصلی انتشار دی‌اکسید گوگرد در منطقه شناخته می‌شوند. به‌طور کلی، الگوی ماهانه پراکنش دی‌اکسید گوگرد نشان می‌دهد که فصول سرد سال مستعد افزایش غلظت این آلاینده هستند، درحالی‌که در ماه‌های گرم، به دلیل شرایط جوی مساعدتر، غلظت آن در سطح پایین‌تری قرار دارد. این روند بر ضرورت پایش مستمر آلاینده دی‌اکسید گوگرد و اجرای راهکارهای کنترلی مؤثر، به‌ویژه در فصول سرد سال که شرایط جوی مستعد تجمع آلاینده‌ها است، تأکید می‌کند.



شکل ۶- الگوی پراکنش میانگین ماهانه دی‌اکسید گوگرد (۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱)

Fig. 6. Spatial Distribution Pattern of the Monthly Mean Sulfur Dioxide 2018–2022

پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوهای توزیع فضایی و زمانی آلودگی دی‌اکسید گوگرد در نواحی پرجمعیت و صنعتی محدوده سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین، با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۵ انجام شد. نکته‌ای که در پژوهش‌های پیشین کمتر به آن توجه شده است، عدم وجود یک دیدگاه یکپارچه نسبت به این سه کلان‌شهر است. در واقع اکثر مطالعات پیشین عمدتاً بر اساس داده‌های ایستگاه‌های زمینی محدود و محلی انجام شده‌اند، که این امر باعث شده تا تحلیل‌ها نتوانند به طور کامل وضعیت آلودگی و تغییرات فضایی و زمانی دی‌اکسید گوگرد را در سطح کلان منطقه‌ای مورد بررسی قرار دهند. نتایج این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که الگوی فضایی انتشار دی‌اکسید گوگرد در استان‌های تهران، البرز و قزوین به‌شدت تحت تأثیر فعالیت‌های صنعتی، نیروگاه‌های حرارتی، و تردد وسایل نقلیه سنگین قرار دارد. توزیع مکانی این آلاینده نشان‌دهنده تمرکز بالای آن در نواحی صنعتی و محورهای حمل‌ونقل اصلی، به‌ویژه در امتداد مسیر آزادراه تهران-قزوین، است. این امر تأکید می‌کند که ترکیب عوامل ثابت مانند نیروگاه‌ها و صنایع آلاینده با عوامل متحرک مانند وسایل نقلیه، منجر به شکل‌گیری لکه‌های داغ آلودگی در این منطقه شده است. از منظر تحلیل فضایی، یافته‌ها نشان دادند که گسترده‌ترین نقاط داغ دی‌اکسید گوگرد در محدوده

نیروگاه‌های شهید رجایی، منتظر قائم، بعثت، پرنده، ری و پاکدشت مشاهده شده است. این نقاط، که با سطح اطمینان ۹۹ درصد به‌عنوان مناطق بحرانی انتشار آلاینده شناخته شده‌اند، نقش کلیدی این واحدهای صنعتی در افزایش آلودگی را نشان می‌دهند. این نتایج با مطالعات پیشین از جمله پژوهش‌های عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2024)، غربی و شایسته (Gharibi & Shayesteh, 2021) و شهبازی و همکاران (Shahbazi, Taghvaei, Hosseini & Afshin, 2016) هم‌خوانی دارد که نیروگاه شهید رجایی و پالایشگاه نفت تهران در جنوب تهران و پاکدشت را به‌عنوان منابع اصلی انتشار آلاینده‌ها و مناطق بحرانی آلودگی شناسایی کرده‌اند. در مقابل، نواحی مرتفع البرز و جنوب استان قزوین به دلیل تهویه بهتر جوی و فقدان منابع آلاینده قابل‌توجه، به‌عنوان نقاط سرد آلودگی شناخته شدند.

بررسی روند تغییرات سالانه دی‌اکسید گوگرد نشان داد که طی بازه ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰، روندی افزایشی در میزان انتشار این آلاینده مشاهده شده که در سال ۱۴۰۰ به اوج خود رسیده است. بر اساس آمارهای منتشرشده از سوی مرکز آمار ایران (۱۴۰۰)، میزان مصرف نفت کوره در استان قزوین طی سال ۱۳۹۷ حدود ۱۹۰ هزار و ۳۲۷ مترمکعب بوده است (Iranian Statistical Center, 2021). این مقدار در سال ۱۳۹۸ با جهشی چشمگیر به بیش از ۵۰۱ هزار و ۳۸۵ مترمکعب افزایش یافته است. چنین افزایشی قابل توجه می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در الگوی مصرف انرژی باشد. با این حال، در سال ۱۴۰۱، کاهش نسبی غلظت این آلاینده ثبت شده که می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات در الگوی مصرف انرژی باشد. در تحلیل فصلی، نتایج نشان می‌دهند که بیشترین غلظت دی‌اکسید گوگرد در فصل زمستان مشاهده می‌شود. این افزایش عمدتاً ناشی از کمبود گاز طبیعی و استفاده از سوخت جایگزین مازوت در نیروگاه‌های منطقه است. علاوه بر این، پدیده وارونگی دما که در ماه‌های سرد سال تشدید می‌شود، با کاهش اختلاط عمودی هوا و افزایش پایداری جوی، به تجمع آلاینده‌ها در لایه‌های نزدیک به سطح زمین منجر می‌شود. مطالعات مختلفی همچون ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023)، لاندیم و همکاران (Landim et al., 2018)، پاپایانو و همکاران (Papaioannou, Viras, Nastos & Paliatsos, 2010) و رینور و همکاران (Raynor, Smith & Singer, 1974) این پدیده را تایید می‌کنند. در مقابل، در فصول بهار و تابستان به دلیل تهویه طبیعی بهتر و کاهش مصرف سوخت، میزان این آلاینده کاهش یافته است. نکته قابل توجه این است که در فصل تابستان، نیروگاه شهید رجایی به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی انتشار این آلاینده باقی مانده که می‌تواند ناشی از افزایش تقاضای برق در این فصل باشد. بررسی شاخص موران جهانی برای میانگین پنج‌ساله و میانگین‌های فصلی غلظت SO_2 نشان داد که این آلاینده در تمام مقیاس‌های زمانی دارای الگوی خوشه‌ای معنادار است. نتایج تغییرات ماهانه غلظت دی‌اکسید گوگرد نشان می‌دهد که غلظت این آلاینده از شهریور ماه به طور مداوم افزایش یافته و تا بهمن ماه ادامه دارد. بالاترین میزان این آلاینده در آذر ماه ثبت شده است، به‌طوری‌که مناطق وسیعی از منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات دی‌اکسید گوگرد در جو، ضروری است که غلظت و توزیع فضایی این آلاینده به‌طور منظم و در مقیاس جهانی مورد پایش قرار گیرد. دی‌اکسید گوگرد در جو به لحاظ زمانی و مکانی تغییرات قابل توجهی را تجربه می‌کند که این نوسانات، نظارت مستمر و دقیق بر آن را پیچیده می‌سازد (Koukouli et al., 2016). پایش این آلاینده از طریق ایستگاه‌های زمینی با چالش‌های متعدد مواجه است، زیرا این ایستگاه‌ها تنها قادر به ارائه داده‌های محدود و محلی هستند و نمی‌توانند تنوع وسیع مکانی و زمانی انتشار دی‌اکسید گوگرد را به‌طور کامل پوشش دهند. در چنین شرایطی، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور با بهره‌گیری از ماهواره‌ها و ابزارهای پیشرفته به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای پایش و تجزیه و تحلیل توزیع مکانی و زمانی دی‌اکسید گوگرد در جو شناخته می‌شود (Fioletov et al., 2013). بررسی زمانی و مکانی غلظت دی‌اکسید گوگرد از اهمیت بالایی برخوردار است. از جنبه زمانی، آلاینده‌ها در طول سال، فصل و حتی ساعت تغییر می‌کنند، به‌ویژه در ماه‌های سرد که تجمع آلاینده‌ها به دلیل شرایط جوی پایدار افزایش می‌یابد. از نظر مکانی، توزیع دی‌اکسید گوگرد به عوامل جغرافیایی، تراکم جمعیت و فعالیت‌های صنعتی وابسته است؛ مناطق شهری غلظت بالاتری دارند، در حالی که مناطق کم جمعیت و کوهستانی غلظت کمتری را تجربه می‌کنند. بنابراین، با توجه به نتایج این پژوهش، 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 غلظت دی‌اکسید گوگرد به

شمار می‌آیند. این رویکرد نه تنها امکان شناسایی نقاط بحرانی انتشار غلظت دی‌اکسید گوگرد را فراهم می‌سازد، بلکه به تحلیل دقیق‌تر روندهای فضایی و زمانی آلودگی هوا کمک می‌کند.

تعارض منافع

در این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سپاسگزاری

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

References

- Aas, W., Mortier, A., Bowersox, V., Cherian, R., Faluvegi, G., Fagerli, H., ... & Xu, X. (2019). Global and regional trends of atmospheric sulfur. *Scientific Reports*, 9(1), 953. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37304-0>
- 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. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.45267.1949>
- Asgari, A. (2011). *Spatial statistics analysis with ArcGIS* (1st ed.). Tehran Municipality Information and Communication Technology Organization Press. [In Persian]
- Asilian, H., Ghaneian, M. T., & Ghanizadeh, G. (2007). *Air pollution: Sources, control methods, laws and regulations, standards* (1st ed.). Tabesh Printing Press. [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. [In Persian] <https://doi.org/10.22126/ges.2024.10555.2752>
- Donya-e-Eqtesad. (2021, November 22). *Statistical response to the heavy fuel oil (mazut) burning rebuttal*. Retrieved from [In Persian] <https://www.magiran.com/article/4237896>
- 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, 117066. <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), 3115. <https://doi.org/10.3390/w13213115>
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Cede, A., Davies, J., Mihele, C., Natcheva, S., ... & O'Brien, J. (2016). Sulfur dioxide (SO₂) vertical column density measurements by Pandora spectrometer over the Canadian oil sands. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(7), 2961-2976. <https://doi.org/10.5194/amt-9-2961-2016>
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Krotkov, N., Yang, K., Loyola, D. G., Valks, P., ... & Martin, R. V. (2013). Application of OMI, SCIAMACHY, and GOME-2 satellite SO₂ retrievals for detection of large emission sources. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 11-399. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50826>
- Geravandi, S., Goudarzi, G., Soltani, F., Salmanzadeh, S., Ghomeishi, A., Zalaghi, E., ... & Mohammadi, M. J. (2015). The cardiovascular and respiratory deaths attributed to sulfur dioxide in Kermanshah. *Journal of Kermanshah University of Medical Sciences*, 19(6), 319-326. <https://doi.org/10.22110/jkums.v19i6.2770>
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189-206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- 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. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/envs.2022.1026>
- Gharibi, S., & Shayesteh, K. (2021). Application of Sentinel 5 satellite imagery in identifying air pollutants

- Hotspots in Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 8(3), 123–138. [In Persian] <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3117-en.html>
- Gharoundi, S., Goudarzi, G., Soltani, F., Dobaradaran, S., Salmanzadeh, S., Kamaei, S., ... & Mohammadi, M. (2016). Sulfur dioxide pollutant and its effects on disease incidence and death among the citizens of Bushehr city. *Iranian South Medical Journal*, 19(4), 598-607. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.ismj.19.4.598>
- Ghozikali, M. G., Mosaferi, M., Safari, G. H., & Jaafari, J. (2015). Effect of exposure to O₃, NO₂, and SO₂ on chronic obstructive pulmonary disease hospitalizations in Tabriz, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 2817-2823. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3512-5>
- Guo, P., Umarova, A. B., & Luan, Y. (2020). The spatiotemporal characteristics of the air pollutants in China from 2015 to 2019. *PLoS One*, 15(8), e0227469.
- Hadian, A., & Moradizadeh, M. (2024). Modeling the concentration distribution of NO₂ and O₃ pollutants with an appropriate spatial resolution by combining ground and satellite data. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 16(2), 85-104. [In Persian] <https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103726>
- Hassanzadeh, N., Hassanzadeh, R., Hosseinijanizadeh, M., & Honarmand, M. (2023). Evaluation of SO₂ and NO₂ concentration in the atmosphere of industrial areas using RS and GIS: Case study of Khatoonabad Copper Smelting Factory, Kerman, Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 32(125), 7-27. [In Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.559597.2896>
- Iranian Statistical Center. (2016). *Data and statistical information*. Retrieved from www.amar.org.ir
- Iranian Statistical Center. (2021). *Statistical Yearbook*. Retrieved from www.amar.org.ir
- Kermani, M., Fallah Jokandan, S., Aghaei, M., & Dowlati, M. (2016). Estimation of cardiovascular death, myocardial infarction and chronic obstructive pulmonary disease (COPD) attributed to PM and SO₂ in the air of Tehran metropolis. *Journal of Research in Environmental Health*, 2(2), 116-126. [In Persian] <https://doi.org/10.22038/jreh.2016.7576>
- Koukoulis, M. E., Balis, D. S., Theys, N., Hedelt, P., Richter, A., Krotkov, N., ... & Taylor, M. (2016). Anthropogenic sulphur dioxide load over China as observed from different satellite sensors. *Atmospheric Environment*, 145, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.007>
- Krotkov, N. A., McLinden, C. A., Li, C., Lamsal, L. N., Celarier, E. A., Marchenko, S. V., ... & Streets, D. G. (2016). Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(7), 4605-4629. <https://doi.org/10.5194/acp-16-4605-2016>
- Landim, A. A., Teixeira, E. C., Agudelo-Castañeda, D., Schneider, I., Silva, L. F., Wiegand, F., & Kumar, P. (2018). Spatio-temporal variations of sulfur dioxide concentrations in industrial and urban area via a new statistical approach. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 801-813. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0584-2>
- Lange, K., Richter, A., Schönhardt, A., Meier, A. C., Bösch, T., Seyler, A., ... & Burrows, J. P. (2023). Validation of Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO₂ products by comparison with NO₂ measurements from airborne imaging DOAS, ground-based stationary DOAS, and mobile car DOAS measurements during the SSP-VAL-DE-Ruhr campaign. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(5), 1357-1389. <https://doi.org/10.5194/amt-16-1357-2023>
- Mansourmoghaddam, M., Naghipur, N., Rousta, 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. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.548083.1372>
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 33(24), 4029–4037. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00144-2)
- Mohammadi, M. J., Goudarzi, G., Geravandi, S., Yari, A. R., Ghalani, B., Shirali, S., ... & Esmaili, M. (2016). Dispersion modeling of nitrogen dioxide in ambient air of Ahvaz city. *Health Scope*, 5(2). <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-32540>
- Moran, P. A. (1948). The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 10(2), 243-251. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1948.tb00012.x>

- Nadian, M., Mirzaei, R., & Soltani Mohammadi, S. (2018). Application of Moran's I Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant (A case Study: Tehran City). *Journal of Environmental Health Engineering*, 5(3), 197-213. <http://jehe.abzums.ac.ir/article-1-501-en.html> [In Persian]
- Naji, M. (2024). *Synoptic-Remote Sensing Analysis of Air Pollution in the Southern Slopes of the Central Alborz* (Master's thesis). Department of Synoptic Climatology, University of Tehran. [In Persian]
- Naji, M., Azizi, G. & Karimi, M. (2025). Temporal Changes and Spatial Distribution of Suspended Particulate Matter in the Southern Alborz Mountains Based on Satellite Data. *Physical Geography Research*, 57(2), 1-18. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.383803.1007845>
- Neisi, A., Goudarzi, G., Akbar Babaei, A., Vosoughi, M., Hashemzadeh, H., Naimabadi, A., ... & Hashemzadeh, B. (2016). Study of heavy metal levels in indoor dust and their health risk assessment in children of Ahvaz city, Iran. *Toxin Reviews*, 35(1-2), 16-23. <https://doi.org/10.1080/15569543.2016.1181656>
- Papaioannou, A. B., Viras, L. G., Nastos, P. T., & Paliatsos, A. G. (2010). Temporal evolution of sulfur dioxide and nitrogen oxides in the city of Volos, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 161, 485-494. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0762-7>
- Raynor, G. S., Smith, M. E., & Singer, I. A. (1974). Temporal and spatial variation in sulfur dioxide concentrations on suburban Long Island, New York. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 24(6), 586-590. <https://doi.org/10.1080/00022470.1974.10469945>
- Rogers, J. F., Thompson, S. J., Addy, C. L., McKeown, R. E., Cowen, D. J., & Decouflé, P. (2000). Association of very low birth weight with exposures to environmental sulfur dioxide and total suspended particulates. *American Journal of Epidemiology*, 151(6), 602-613. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a010248>
- Savenets, M., Dvoretzka, I., Nadtochii, L., & Zhemera, N. (2022). Comparison of TROPOMI NO₂, CO, HCHO, and SO₂ data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine. *Meteorological Applications*, 29(6), e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
- 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, 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>
- Shahmohammadi, A., Bayat, A., & Mashhadizadeh Maleki, S. (2017). Investigation of Behavior and Trend of Nitrogen Dioxide in Tehran Using OMI Satellite Sensor Measurements. *Iranian Journal of Astronomy and Astrophysics*, 4(2), 69-78. [In Persian]
- Shahmohammadi, A., Bayat, A., & Mashhadizadeh Maleki, S. (2022). Study of air pollution of Isfahan based on NO₂ measured data by OMI Satellite sensor. *Applied Research in Geographical Sciences (Geographical Sciences)*, 22(67), 41-55. [In Persian] <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3300-en.html>
- 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, 102130. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102130>
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., De Vries, J., Otter, G., ... & 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, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Wang, Z. B., & Fang, C. L. (2016). Spatial-temporal characteristics and determinants of PM_{2.5} in the Bohai Rim Urban Agglomeration. *Chemosphere*, 148, 148-162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.118>
- Watson, Z., Li, C., Liu, F., Freeman, S. W., Zhang, H., Wang, J., & Lee, S. H. (2025). Estimating surface sulfur dioxide concentrations from satellite data over eastern China: Using chemical transport models vs. machine learning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(20), 13527-13545. <https://doi.org/10.5194/acp-25-13527-2025>

- Xiao, K., Wang, Y., Wu, G., Fu, B., & Zhu, Y. (2018). Spatiotemporal characteristics of air pollutants (PM10, PM2.5, SO2, NO2, O3, and CO) in the inland basin city of Chengdu, southwest China. *Atmosphere*, 9(2), 74. <https://doi.org/10.3390/atmos9020074>
- Yousefian, F., Faridi, S., Azimi, F., Aghaei, M., Shamsipour, M., Yaghmaeian, K., & Hassanvand, M. S. (2020). Temporal variations of ambient air pollutants and meteorological influences on their concentrations in Tehran during 2012–2017. *Scientific Reports*, 10(1), 292. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56578-6>
- Yuan, W., Sun, H., Chen, Y., & Xia, X. (2021). Spatio-Temporal evolution and spatial heterogeneity of influencing factors of SO2 Emissions in Chinese cities: fresh evidence from MGWR. *Sustainability*, 13(21), 12059. <https://doi.org/10.3390/su132112059>
- Zeynali, B., Malanouri, E., & Safari, Sh. (2023). Temporal and spatial analysis of air pollutants in East Azerbaijan province. *Physical Geography*, 15(62), 89-104. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/jopg/Article/982904/FullText>
- Zhang, Q., Wang, Y., Liu, M., Zheng, M., Yuan, L., Liu, J., ... & Wang, X. (2023). Wintertime formation of large sulfate particles in China and implications for human health. *Environmental Science & Technology*, 57(48), 20010-20023. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05645>
- Zheng, C., Zhao, C., Li, Y., Wu, X., Zhang, K., Gao, J., ... & Chai, F. (2018). Spatial and temporal distribution of NO2 and SO2 in Inner Mongolia urban agglomeration obtained from satellite remote sensing and ground observations. *Atmospheric Environment*, 188, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.029>