



Spatio-temporal assessment of urban air pollution in Isfahan using ground monitoring and radar observations

Rahman Zandi¹, Hojat Sadeghi², Sara Ghaedi³

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: R.zandi@geo.ui.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: h.sadeghi@geo.ui.ac.ir
3. M.Sc. in Geographic Information Systems (GIS), Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: saghaedi97@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 2 September 2025

Revised: 6 December 2025

Accepted: 29 January 2026

Published: 29 April 2026

Keywords:

Air pollution,
Isfahan,
Remote sensing,
Sentinel-5P,
Spatiotemporal analysis.

ABSTRACT

Objective: Rapid urbanization and intensive industrial development have led to critical air pollution challenges in Iranian megacities, with Isfahan experiencing some of the most severe conditions. This study aims to analyze the spatiotemporal patterns of major air pollutants in Isfahan from 2018 to 2023.

Methods: Sentinel-5P (TROPOMI) satellite data were combined with ground-based monitoring stations to evaluate the spatial distribution and temporal trends of five key pollutants: nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂), fine particulate matter (PM_{2.5}), and the UV Aerosol Index (UAI). Spatial analyses were performed to identify concentration gradients and pollution hotspots across urban districts. **Results:** Concentrations of NO₂ and CO were consistently higher in the central and northern areas, decreasing toward the east and south. SO₂ exhibited fluctuating spatial patterns across the study period, while UAI levels were predominantly elevated in the eastern and northeastern districts. PM_{2.5} concentrations were also higher in central and northern zones. Temporally, a marked decline in NO₂, CO, PM_{2.5}, and UAI levels was observed in 2020—coinciding with COVID-19 restrictions—followed by an increase in subsequent years as human activities resumed.

Conclusions: The findings underscore the dominant influence of anthropogenic sources, particularly vehicular traffic and industrial activities, on Isfahan's air quality. The integration of satellite and ground-based data provides a robust framework for monitoring urban air pollution and supports the formulation of sustainable air quality management strategies for industrial megacities.

Cite this article: Zandi, R., Sadeghi, H., & Ghaedi, S. (2026). Spatio-temporal assessment of urban air pollution in Isfahan using ground monitoring and radar observations. *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 6 (19), 52-76. <http://doi.org/10.22034/rsgi.2026.68897.1146>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/rsgi.2026.68897.1146>

Publisher: University of Tabriz.



Introduction

Air pollution remains one of the most critical environmental challenges facing rapidly urbanizing regions around the world. In Iran, metropolitan areas such as Isfahan have experienced increasing levels of atmospheric pollutants due to accelerated industrial activities, vehicular emissions, and spatial expansion of urban infrastructure. These changes have contributed to a deteriorating air quality trend, posing serious threats to public health and ecological stability. Given the pressing need for effective environmental monitoring and urban air management, the present study seeks to investigate the spatial and temporal variations of five major atmospheric pollutants across the urban landscape of Isfahan between 2018 and 2023 (1397–1402 in the Iranian calendar). The pollutants studied include nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂), particulate matter smaller than 2.5 microns (PM_{2.5}), and the UV Aerosol Index (UAI). These pollutants were selected due to their prevalence in urban atmospheres and their adverse effects on human health and the environment.

The main objective of this research is to extract and analyze the distributional patterns and long-term trends of these pollutants using high-resolution satellite data from the TROPOMI sensor on the Sentinel-5P platform, supplemented by ground-based air quality monitoring stations in Isfahan. The study aims to determine high-concentration zones, examine pollutant intensity gradients across the city's fifteen districts, and identify critical spatial patterns that can inform air pollution mitigation policies.

Materials and Methods

In this study, the temporal trends and spatial distribution patterns of atmospheric pollutants in the metropolitan area of Isfahan during the period 2018 to 2023 were analyzed through the integration of remote sensing data and ground-based observations. Annual data on atmospheric pollutants, including NO₂, CO, SO₂, PM_{2.5}, and the UV Aerosol Index, were acquired from the TROPOMI sensor onboard the Sentinel-5P satellite. The data were extracted using the Google Earth Engine platform and processed within the ArcMap environment.

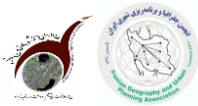
Simultaneously, ground-based air quality monitoring data were collected to validate and complement the satellite-based analysis. Annual distribution maps were generated in GIS based on point measurements from monitoring stations using appropriate interpolation techniques. The resulting maps allowed for the analysis of pollutant concentration patterns across the fifteen municipal districts of Isfahan. This enabled a spatial comparison based on geographical location, land use characteristics, and urban morphology, contributing to a comprehensive understanding of pollution dispersion in the city.

Results

The analysis of data derived from Sentinel-5P (TROPOMI sensor) and ground-based monitoring stations in the metropolitan area of Isfahan during the six-year period from 2018 to 2023 reveals distinct spatial patterns for four major air pollutants: nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂), and the UV Aerosol Index (UAI). The spatial distribution of nitrogen dioxide (NO₂) indicates that the highest concentrations have consistently been located in the central, northern, and northwestern districts of the city throughout the study period. Districts 1, 2, 3, 7, 8, and 12 exhibited elevated levels of NO₂, whereas southern and southeastern areas—particularly districts 4, 5, 6, 13, and 15—showed relatively better air quality. Accordingly, the spatial gradient of NO₂ concentrations generally decreases from the dense central core toward the southern and eastern peripheries.

Regarding carbon monoxide (CO), findings show that this pollutant has been most concentrated in the central and western parts of the city, especially in districts 1, 3, 8, 9, and 11. In contrast, peripheral districts such as 4, 5, 6, 12, and 15 have experienced comparatively lower concentrations. This reflects a declining gradient in CO levels from the city center outward toward suburban areas. In the case of sulfur dioxide (SO₂), the spatial distribution appears less uniform, with noticeable fluctuations in intensity and geographic spread over the years. Nonetheless, higher concentrations were generally observed in the northwestern, western, central, and some eastern areas of the city, including districts 5, 8, 9, 10, 12, and parts of districts 2 and 13. Meanwhile, southern and southeastern zones—namely districts 4, 6, 14, and 15—exhibited lower levels of SO₂. Thus, the pollutant tends to decrease in concentration from the northwest toward the southeast.

The distribution of the UV Aerosol Index (UAI) also reveals that higher aerosol concentrations were concentrated in the eastern, northeastern, and central districts, especially districts 10, 14, 15, 7, and 1. Cleaner air conditions were more prevalent in the southern and southwestern areas, particularly in districts 5, 6, 9, 13, and northern part of district 2. Therefore, the spatial gradient for aerosol content generally declines from the east

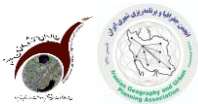


toward the south and southwest. In general, the temporal trend of pollutants during the study period indicates a marked reduction in concentrations of NO₂, CO, and UAI in the year 2020. This decline aligns with the COVID-19 outbreak, during which stringent public health measures—including lockdowns, industrial shutdowns, and reduced urban traffic—led to a temporary improvement in air quality. However, as restrictions were gradually lifted in 2021 and 2022, pollution levels began to rise again, with some areas recording their highest values within the entire study period by 2022.

Conclusion

The results obtained from the analysis of Sentinel-5 satellite data and ground monitoring stations in the metropolitan area of Isfahan during the period 2018 to 2023 indicate that air pollution, particularly for nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, and the aerosol index, was highly concentrated in the central, northern, and western parts of the city. The southern and southeastern regions consistently exhibited better air quality. The temporal trend of the data shows a significant decrease in pollutants in 2020, coinciding with the COVID-19 pandemic restrictions and a reduction in human and traffic activities. Following this, a gradual increase in pollutant levels was observed in 2021 and 2022, reflecting a partial return to pre-pandemic conditions and increased urban and industrial activities.

These findings highlight the importance of continuous air quality monitoring and the implementation of effective pollution control policies to strategically reduce regional pollution and improve public health. Furthermore, the integration of satellite data with ground observations provides a comprehensive and reliable approach for environmental analysis, which can be utilized in urban planning and resource management.



تحلیل مکانی-زمانی آلودگی هوا در شهر اصفهان با استفاده از داده‌های زمینی و راداری

رحمان زندی^۱، حجت صادقی^۲، سارا قانلی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: R.zandi@geo.ui.ac.ir

۲. استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: h.sadeghi@geo.ui.ac.ir

۳. کارشناس ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم جغرافیا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه:

saghaedi97@gmail.com

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|---|
| <p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹</p> | <p>با رشد فزاینده شهرنشینی و توسعه صنعتی، کلان‌شهرهای ایران با چالش‌های جدی ناشی از آلودگی هوا مواجه‌اند و اصفهان به‌عنوان یکی از قطب‌های صنعتی کشور در سال‌های اخیر شرایط بحرانی‌تری را تجربه کرده است. هدف پژوهش حاضر، تحلیل فضایی-زمانی آلاینده‌های اصلی هوا در کلان‌شهر اصفهان طی دوره ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (Sentinel-5P) سنجنده (TROPOMI) و داده‌های ایستگاه‌های سنجش زمینی است. در این مطالعه، توزیع مکانی و روند زمانی پنج آلاینده شامل دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، ذرات معلق کوچک‌تر از ۲٫۵ میکرون ($\text{PM}_{2.5}$) و شاخص UV Aerosol Index (UVAI) مورد بررسی قرار گرفت، به‌طوری‌که داده‌های آلاینده‌ها از ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوا و تصاویر ماهواره‌ای گردآوری شد. برای تحلیل و تلفیق داده‌ها از روش‌های درونیایی مکانی استفاده گردید و در ادامه به‌منظور بررسی روابط مکانی و الگوهای توزیع آلاینده‌ها از مدل‌های رگرسیون خطی معمولی (OLS) و رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) بهره گرفته شد.</p> <p>نتایج نشان داد که، آلاینده‌های NO_2 و CO بیشترین تمرکز را در مناطق مرکزی و شمالی شهر داشته و از مرکز به سمت شرق و جنوب کاهش یافته‌اند. غلظت SO_2 پراکنشی نوسانی و متغیر در سال‌های مختلف داشته، در حالی که مقادیر UVAI عمدتاً در شرق و شمال‌شرق شهر بالاتر بوده است. همچنین $\text{PM}_{2.5}$ در مناطق مرکزی و شمالی در سطوح بالاتری مشاهده شد. تحلیل روند زمانی نشان داد که در سال ۱۳۹۹ همزمان با اعمال محدودیت‌های کرونایی، کاهش معناداری در مقادیر آلاینده‌های NO_2، CO، $\text{PM}_{2.5}$ و UVAI رخ داد، اما از سال ۱۴۰۰ به بعد غلظت‌ها مجدداً افزایش یافته و به سطح پیش از همه‌گیری بازگشتند. همچنین این یافته‌ها نشان می‌دهد که، منابع انسان‌ساخت، به‌ویژه ترافیک و فعالیت‌های صنعتی، نقش اصلی در شکل‌گیری الگوهای آلودگی هوای اصفهان دارند. بهره‌گیری از داده‌های ترکیبی ماهواره‌ای و زمینی می‌تواند مبنای مناسبی برای سیاست‌گذاری محیط‌زیستی و برنامه‌ریزی جهت مدیریت پایدار کیفیت هوا در این کلان‌شهر فراهم آورد.</p> |
| <p>کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، تحلیل فضایی، سنجش از دور، سنتینل-5P، کلانشهر اصفهان.</p> | |

استناد: زندی، رحمان؛ صادقی، حجت و قانلی، سارا (۱۴۰۵). تحلیل مکانی-زمانی آلودگی هوا در شهر اصفهان با استفاده از داده‌های زمینی و راداری. کاربرد سنجش

از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، ۶ (۱۹)، ۷۶-۵۲

<http://doi.org/10.22034/rsgi.2026.68897.1146>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

با گسترش شهرنشینی و توسعه بی‌رویه صنعتی، بسیاری از کلان‌شهرهای جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با چالش‌های جدی زیست‌محیطی مانند آلودگی هوا مواجه شده‌اند (مام‌خضری، ۲۰۲۰). آلودگی هوا از جمله بحران‌هایی است که نه تنها سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند، بلکه اثرات منفی قابل‌توجهی بر ساختارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌بوم‌های شهری برجای می‌گذارد (لی، ۲۰۱۸). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که میزان خسارات اقتصادی ناشی از آلودگی هوا در برخی کشورها بسیار بالا بوده است؛ برای نمونه، در سال ۲۰۱۸ هزینه اقتصادی ناشی از آلودگی هوا در چین حدود ۹۰۰ میلیارد دلار و در آمریکا حدود ۶۰۰ میلیارد دلار برآورد شده است (لی، ۲۰۱۸). همچنین بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، آلودگی هوا از عوامل اصلی مرگ زودرس در جهان است (سازمان جهانی بهداشت، ۲۰۱۶).

در کنار پیامدهای اقتصادی و بهداشتی، رشد بی‌رویه جمعیت، تمرکز صنایع سنگین در مناطق شهری و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، منجر به افزایش غلظت آلاینده‌هایی همچون مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، ازن و ذرات معلق شده‌اند (کامپا و کستاناس، ۲۰۰۸؛ گولیا و همکاران، ۲۰۱۵). افزایش این آلاینده‌ها تأثیر مستقیمی بر کیفیت زندگی، افزایش نرخ بیماری‌های تنفسی و تغییرات اقلیمی شهری دارد (للی‌ولدو، کاستا، رومانو، ۲۰۱۵). به همین دلیل، در سال‌های اخیر بهره‌گیری از داده‌های ترکیبی ایستگاهی و سنجش‌ازدور به یکی از مهم‌ترین روش‌های پایش و تحلیل فضایی آلودگی هوا در سطح شهرها تبدیل شده است (لو، ۲۰۲۱). شهر اصفهان نیز به‌عنوان یکی از قطب‌های صنعتی ایران با تمرکز بالای فعالیت‌های صنعتی، مانند پالایشگاه، فولاد مبارکه و مراکز پتروشیمی، در سال‌های اخیر با سطوح نگران‌کننده‌ای از آلودگی هوا مواجه بوده است (سازمان حفاظت محیط‌زیست اصفهان، ۱۴۰۲). شبکه حمل‌ونقل سنگین، تراکم جمعیت بالا و قرار گرفتن در منطقه خشک مرکزی کشور، شرایط این شهر را بحرانی‌تر کرده است. این وضعیت، نیاز به پایش دقیق تغییرات مکانی - زمانی آلودگی هوا را دوچندان می‌کند. در این میان، داده‌های ماهواره‌ای مانند Sentinel-5P که برای پایش آلاینده‌هایی نظیر NO_2 ، SO_2 و CO طراحی شده‌اند، در کنار داده‌های ایستگاه‌های زمینی، ابزاری مؤثر برای تحلیل توزیع فضایی آلاینده‌ها به شمار می‌آیند (لو، ۲۰۲۱). این داده‌ها به دلیل وضوح طیفی مناسب، تکرار زمانی بالا و پوشش مکانی گسترده، امکان بررسی روندهای مکانی، نقاط داغ آلودگی و الگوهای فصلی را فراهم می‌آورند (لی و ونگ، ۲۰۱۱).

مطالعات متعددی در زمینه پایش و تحلیل آلودگی هوای شهری با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی انجام شده است. قنادی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-5 بازمیابی شده از موتور Google Earth Engine، آلاینده‌هایی نظیر دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ذرات معلق را در ۲۰ شهر صنعتی ایران پایش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که داده‌های Sentinel-5 همبستگی بالایی (حداقل ۰/۷۸) با مقادیر ثبت‌شده توسط ایستگاه‌های زمینی دارد و بنابراین این داده‌ها می‌توانند به عنوان ابزاری دقیق و در دسترس برای پایش آلودگی هوا در ایران مورد استفاده قرار گیرند. همچنین تهران به عنوان آلوده‌ترین شهر و زنجان به عنوان کم‌آلوده‌ترین شهر در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ معرفی شدند. در مطالعه‌ای دیگر، حسن‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل و سامانه Google Earth Engine، غلظت دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید سولفور را در محدوده ۵۰ کیلومتری کارخانه ذوب مس خاتون‌آباد در استان کرمان تحلیل کردند. آن‌ها با روش‌های آماری - مکانی لکه‌های داغ آلودگی را در بازه‌های زمانی مختلف بررسی کردند و نشان دادند که لکه‌های داغ در فصل سرد سال بیشتر در نزدیکی کارخانه متمرکز است و در بازه‌های بلندمدت‌تر به مناطق دورتر جابه‌جا می‌شود. مطالعات دیگری همچون آفریده و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی با عنوان تحلیل زمانی - مکانی شاخص کیفیت هوای شهر تهران در دوره ده ساله، به این نتیجه رسیدند که، در میان عوامل انسانی شامل حمل و نقل و وجود مراکز صنعتی تأثیر زیادی در گسترش زمانی - مکانی آلودگی هوا در شهر تهران دارند. وجود بزرگراه‌ها، آزادراه‌ها و معابر مهم و پرتردد شهری، کاربری‌های جاذب جمعیت که باعث افزایش تردد و رفت و آمد می‌شود و به دنبال آن مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی را موجب می‌شود،

وجود مراکز صنعتی و کارخانه‌ها در بخش غربی تهران، نبود خطوط و وسایل حمل و نقل عمومی در برخی مناطق شهر تهران، همگی، از جمله دلایل تاثیرات این عوامل در پراکنش آلودگی در بخش‌های مختلف شهر تهران است. خورشید دوست و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی با عنوان تحلیل زمانی- مکانی آلودگی‌های خطرناک شهر تبریز با تأکید بر (*PM10*)، نشان دادند که، نتایج حاصل از تحلیل فراوانی *PM10* در همهٔ ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین رخداد فراوانی *PM10* در تابستان (ماه اوت) بوده است و بی‌شک سیطرهٔ پُرفشار جنب حاره، به دلیل تشکیل لایه‌های حرارتی بر روی ایران، در افزایش آلودگی‌های خطرناک تابستانهٔ تبریز نقش مؤثری دارد. در فصل زمستان در بیشتر ایستگاه‌ها رخداد آلودگی‌های خطرناک *PM10* به کمترین مقدار خود رسیده است. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه باغشمال و آبرسان دارای بیشترین آلودگی خطرناک *PM10* هستند.

در پژوهشی دیگر جمشیدی و همکاران (۱۳۹۶) به مکان یابی و تحلیل آلودگی و منابع آلاینده‌های هوا در کلان شهر اصفهان با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (*GIS*) پرداخته و پیشنهاد دادند که، جهت کاهش آلودگی و افزایش سلامتی شهروندان و کاهش آلاینده‌ها در این مناطق استفاده کمتر از وسایل نقلیه شخصی و استفاده از وسایل نقلیه عمومی، کاشت درخت و افزایش فضای سبز و همکاری دولت جهت کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای پرداخته شود.

بهرامی پيچاقچی و همکاران (۱۴۰۳) بررسی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر توزیع زمانی آلودگی هوا با استفاده از داده‌های *Sentinel-5P* در استان مازندران پرداخته و نشان دادند که تعداد ساعات آفتابی با ضریب همبستگی بین ۰/۵ تا ۰/۸ کاراترین مؤلفه اقلیمی بر آلودگی هواست. در نتیجه عوامل هواشناختی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر پراکنش زمانی- مکانی آلودگی هوا اثر می‌گذارد.

ژانگ، لی و وانگ (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از داده‌های *Sentinel-5P* و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پراکنش فضایی آلاینده‌های SO_2 و NO_2 در مناطق شهری چین را تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های فضایی قادرند تغییرات زمانی و مکانی آلودگی را با دقت بالا پیش‌بینی کنند و استفاده از این مدل‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی مؤثر باشد. کیم و همکاران (۲۰۲۴) نیز در پژوهشی در کلانشهر سئول با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی، تأثیر فعالیت‌های صنعتی بر کیفیت هوا را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که داده‌های *Sentinel-5P* و مدل‌های تحلیل فضایی توانایی شناسایی منابع آلودگی و روندهای زمانی را در بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت دارند و این ابزارها می‌توانند به بهبود سیاست‌های محیط‌زیستی کمک کنند.

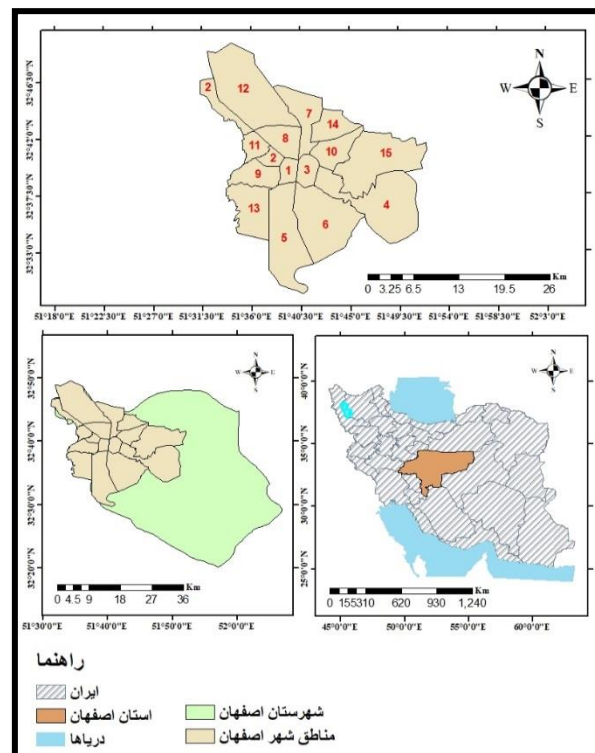
با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه پایش آلودگی هوا در کلان‌شهرهای ایران و جهان، همچنان در خصوص پراکنش مکانی- زمانی آلاینده‌ها در کلان‌شهر اصفهان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای جدید مانند *Sentinel-5P*، شکاف محسوسی وجود دارد. بیشتر مطالعات پیشین یا بر مقاطع زمانی کوتاه متمرکز بوده‌اند، یا صرفاً یک یا دو آلاینده خاص را بررسی کرده‌اند و کمتر به تحلیل هم‌زمان چند آلاینده در یک بازه چندساله پرداخته‌اند. این وضعیت موجب شده که تصویر جامع و قابل اتکایی از روند تغییرات و الگوهای فضایی آلودگی در اصفهان در دسترس نباشد. از این‌رو، مسئله اصلی پژوهش حاضر، نیاز به ارزیابی منسجم تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های اصلی هوا در بازه‌های چندساله و با بهره‌گیری از منابع داده‌ای مکمل است. نوآوری این پژوهش در آن است که با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای *Sentinel-5P* و داده‌های ایستگاهی کیفیت هوا، بدون اتکا به مدل‌های پیچیده و صرفاً بر پایه‌ی تحلیل‌های مکانی-زمانی، تصویری جامع و دقیق از وضعیت آلودگی هوای شهر اصفهان در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ (۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲) ارائه می‌دهد. در حالی که اغلب پژوهش‌های پیشین تنها از یکی از منابع داده (زمینی یا ماهواره‌ای) استفاده کرده‌اند، این مطالعه با رویکردی تلفیقی، توانسته است دقت مکانی تخمین آلاینده‌ها را افزایش دهد و الگوی پراکنش زمانی آن‌ها را در نواحی فاقد ایستگاه زمینی نیز مشخص کند. از این‌رو، پژوهش حاضر گامی نو در جهت یکپارچه‌سازی داده‌های سنجش‌ازدور و داده‌های زمینی برای پایش هوای شهری در ایران محسوب می‌شود این رویکرد می‌تواند

هم درک علمی از پویایی آلودگی در یکی از صنعتی‌ترین کلان‌شهرهای کشور را بهبود بخشد و هم مبنای مناسبی برای سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی فراهم آورد. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر تحلیل فضایی-زمانی آلاینده‌های هوا در کلان‌شهر اصفهان طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی است. این مطالعه تلاش دارد با ارائه تصویری دقیق از وضعیت کنونی و روندهای غالب آلودگی هوا، امکان تصمیم‌گیری علمی و تدوین سیاست‌های محیط‌زیستی مؤثر را برای مدیریت پایدار این کلان‌شهر فراهم سازد.

۲- روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر اصفهان سومین شهر بزرگ کشور پس از تهران و مشهد در مرکز ایران است. شهر اصفهان در طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه قرار دارد. بر اساس آخرین سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای جمعیت ۱،۹۶۰،۲۶۰ نفر است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۶). محدوده شهری اصفهان از غرب تا خمینی شهر و نجف‌آباد از جنوب تا کوه صفه و سپهان شهر از شمال تا شاهین شهر و از شرق تا دشت سگری امتداد می‌یابد (شکل ۱). بر اساس آخرین تقسیمات شهری در سال ۱۳۹۶، شهر اصفهان پانزده منطقه شهری دارد (شکل ۲-۳). شهر اصفهان بر اساس دستورالعمل وزارت کشور ساماندهی می‌شود که بر اساس آن شهر اصفهان در مجموع ۱۹۲ محله دارد که از این تعداد ۲۵ محله شهرک‌های الحاق شده به این شهر هستند (باقری، محمدی، کریمی، ۱۴۰۱).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

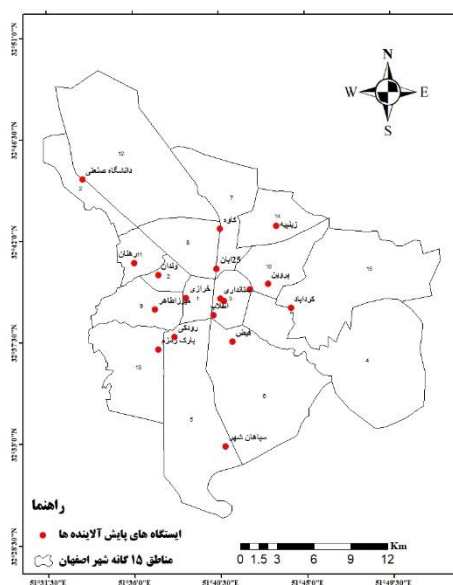
Fig. 1- Study Area

داده‌های مورد استفاده

برای انجام این پژوهش، از مجموعه‌ای از داده‌ها و منابع مختلف بهره گرفته شده است که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود:

۱) داده‌های روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه مربوط به آلاینده‌های جوی شامل ذرات معلق (PM2/5)، دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، دی‌اکسید نیتروژن (NO₂) و مونوکسید کربن (CO)، طی دوره زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ از طریق اداره پایش و کنترل کیفیت هوای شهرداری اصفهان و همچنین اداره کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان برای ۱۸ ایستگاه دریافت گردید. این داده‌ها به‌منظور تحلیل درون‌یابی آلودگی هوا و مقایسه آن در مناطق مختلف شهر مورد استفاده قرار گرفت.

۲) تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-5P سنجنده (TROPOMI) که حاوی غلظت آلاینده‌های گازی CO، NO₂، SO₂ و شاخص UVAI هستند، از طریق کد نویسی در سامانه Google Earth Engine استخراج شدند. وضوح مکانی این تصاویر تقریباً ۵/۵×۳/۵ کیلومتر است. داده‌های ماهواره‌ای پیش‌پردازش شدند تا پیکسل‌های دارای پوشش ابری بیش از ۰/۵ حذف گردند. سپس، داده‌ها به‌صورت میانگین فصلی (بهار، تابستان، پاییز، زمستان) تجمیع شدند تا با داده‌های ایستگاهی هماهنگ‌سازی شوند.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های پایش آلاینده‌ها
Fig. 2. Location of pollutant monitoring stations

روش تهیه نقشه‌های آلاینده‌ها با روش درونیابی (IDW)

این سری از نقشه‌ها با هدف تولید نقشه‌های پیوسته (Continuous Maps) برای نمایش توزیع فضایی غلظت آلاینده‌ها در کل سطح شهر، به‌ویژه مناطقی که فاقد ایستگاه پایش هستند، تهیه شده‌اند. برای تولید این نقشه‌ها، از روش درونیابی وزنی فاصله معکوس (IDW) در نرم‌افزار ArcMap استفاده شد این روش به دلیل دقت مناسب در داده‌های پراکنده، سادگی و کاربرد گسترده در مطالعات کیفیت هوا انتخاب گردید و تغییرات مکانی آلاینده‌ها را در سطح شهر نمایش داد (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۶).

در این روش، هر پیکسل ورودی ابتدا به یک نقطه مرجع تبدیل شد و سپس فرآیند درونیابی با اعمال وزن‌دهی معکوس بر اساس فاصله از نقاط شناخته شده (داده‌های ایستگاهی یا نقاط استخراج‌شده از تصاویر) صورت پذیرفت. اندازه پیکسل نقشه‌های نهایی IDW با اندازه پیکسل ورودی تعیین شد.

با توجه به بزرگ بودن پیکسل تصاویر ماهواره‌ای، هر پیکسل به یک نقطه تبدیل شد و سپس درونیابی صورت پذیرفت. نقشه‌های حاصل از درونیابی با روش Natural Breaks (Jenks) طبقه‌بندی شدند (خورشید دوست و همکاران، ۱۳۹۶)، تا مرز

بین کلاس‌ها بر اساس توزیع طبیعی داده‌ها تعیین گردد. نقشه‌های زون‌بندی برای هر آلاینده به صورت جداگانه از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P تولید شدند. لذا دو نوع نقشه دورنیایی تهیه شد تا از یک سو کیفیت تصاویر ماهواره‌ای افزایش یابد و از سوی دیگر قابلیت مقایسه بین داده‌های زمینی و ماهواره‌ای فراهم گردد.

روش تهیه نقشه‌های آلاینده‌ها با طبقه‌بندی نظارت‌شده (زون‌بندی)

این سری نقشه‌ها با هدف طبقه‌بندی و زون‌بندی نواحی شهری بر اساس شدت آلودگی و ایجاد پهنه‌های مجزا (مانند زون کم، متوسط، زیاد) تهیه شده‌اند. داده‌های ایستگاه‌های زمینی به‌عنوان نمونه‌های آموزشی (Training Samples) برای آموزش مدل استفاده شدند.

تقسیم‌بندی داده‌های آموزشی: از کل داده‌های ایستگاهی، ۳۰ درصد به عنوان نمونه آموزشی برای آموزش الگوریتم و ۷۰ درصد به عنوان نمونه صحت‌سنجی استفاده شد.

الگوریتم بیشترین احتمال (Maximum Likelihood): در این پژوهش، الگوریتم بیشترین احتمال برای طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم احتمال تعلق هر پیکسل به هر کلاس تعریف شده را بر اساس مفروضات توزیع نرمال چندمتغیره محاسبه کرده و آن را به کلاسی اختصاص می‌دهد که بالاترین احتمال تعلق را داشته باشد.

تولید نقشه‌های زون‌بندی نهایی: خروجی این فرآیند، نقشه‌های طبقه‌بندی شده (زون‌بندی شده) هستند. اندازه پیکسل نقشه‌های طبقه‌بندی شده برابر با اندازه پیکسل اولیه داده‌های ورودی ماهواره‌ای است (۵/۵×۳/۵ کیلومتر).

روش ارزیابی صحت نقشه‌ها

به منظور اعتبارسنجی و تعیین میزان کارایی هر یک از نقشه‌های تولیدی، مقایسه با داده‌های زمینی (۷۰ درصد نمونه‌های تست) صورت گرفت.

الف) صحت کلی (Overall Accuracy):

این معیار نسبت نمونه‌های به‌درستی تخصیص‌یافته به کل نمونه‌های صحت‌سنجی را نشان می‌دهد و بر اساس فرمول زیر محاسبه شد:

فرمول ۱- دقت کلی (ضیائیان و حسنی مقدم، ۱۳۹۷).
دقت کلی = نمونه درست طبقه‌بندی شده / کل نمونه‌ها

همچنین از شاخص کاپا جهت صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای استفاده گردید.

ب) ضریب کاپا (Kappa Coefficient):

برای ارزیابی دقیق‌تر توافق، ضریب کاپا (kappa) محاسبه شد که تصحیح‌شده برای توافق تصادفی است. این ضریب نشان‌دهنده میزان همبستگی بین نقشه استخراج‌شده و داده‌های زمینی است و بر اساس فرمول زیر محاسبه گردید:

فرمول ۲- شاخص کاپا (صادق بیگی و همکاران، ۱۳۹۹)
$$\kappa = (p_o - p_e) / (1 - p_e)$$

نتایج و بحث

پهنه بندی داده‌های زمینی

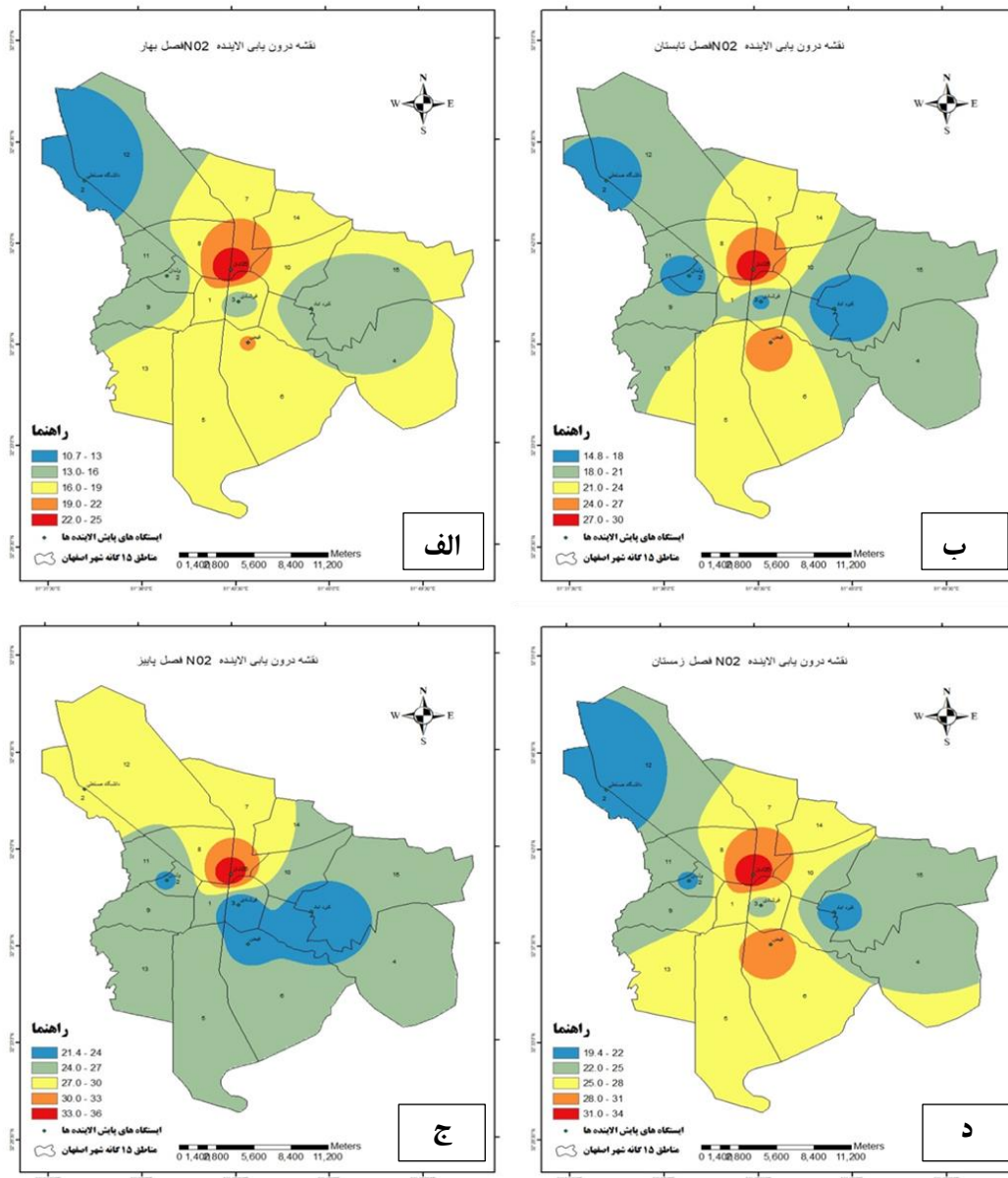
شکل ۳ توزیع مکانی دی‌اکسید نیتروژن را طی چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان به طور میانگین در سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.

توزیع مکانی غلظت دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) را در فصل بهار در سطح شهر اصفهان نمایش می‌دهد (شکل ۳-الف). مطابق نقشه، بیشترین غلظت NO_2 در نواحی مرکزی شهر، به‌ویژه در حوالی مناطق ۳ و ۸ مشاهده می‌شود؛ این مناطق که عمدتاً مرکز شهر و نواحی پرتردد را شامل می‌شوند، با رنگ‌های قرمز و نارنجی مشخص شده‌اند که بیانگر سطوح بالای آلاینده در بازه‌ی ۱۹ تا ۲۵ (ppb) هستند. دی‌اکسید نیتروژن عمدتاً از احتراق سوخت‌های فسیلی ناشی می‌شود و منابع اصلی آن شامل وسایل نقلیه موتوری (منابع متحرک) و صنایع یا نیروگاه‌ها (منابع ثابت) است (گورجار و همکاران، ۲۰۰۸). در مقابل، پایین‌ترین مقادیر غلظت NO_2 در نواحی پیرامونی شهر، به‌ویژه در محدوده‌ی شمال‌غرب (در حوالی دانشگاه صنعتی اصفهان) و جنوب‌شرق شهر مشاهده می‌شود.

توزیع مکانی غلظت دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) را در فصل تابستان در سطح شهر اصفهان نشان می‌دهد (شکل ۳-ب). مطابق نقشه، مشابه فصل بهار، نواحی مرکزی شهر همچنان دارای بیشترین غلظت NO_2 هستند. با این حال، مقدار این آلاینده در تابستان نسبت به بهار افزایش یافته و بیشترین غلظت در بازه‌ی ۲۶ تا ۲۹ واحد (ppb) قرار گرفته است. یکی از عوامل اصلی افزایش غلظت NO_2 در فصل تابستان، بالا رفتن دمای هوا و تشدید فعالیت منابع آلاینده است؛ از جمله تردد وسایل نقلیه، استفاده گسترده از کولرهای گازی و افزایش مصرف انرژی. در شهرهای گرم و خشک مانند اصفهان، مصرف بالای برق موجب افزایش بار نیروگاه‌ها می‌شود؛ نیروگاه‌هایی که اغلب از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند و در نتیجه، NO_2 بیشتری تولید می‌کنند (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۹).

توزیع مکانی غلظت دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) را در فصل پاییز در شهر اصفهان نشان می‌دهد (شکل ۳-ج). در این فصل، شدت آلودگی در مناطق ۷ و ۸ شهر به اوج خود می‌رسد، به‌گونه‌ای که مناطقی با غلظت ۳۳ تا ۳۶ (ppb) مشاهده می‌شوند. این افزایش قابل توجه می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی قرار داشته باشد. نخست، با شروع فصل پاییز و کاهش دمای هوا، مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش‌های حمل‌ونقل و صنایع افزایش می‌یابد که به تولید مقادیر بیشتری از NO_2 منجر می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، کاهش طول روز و شدت تابش خورشید در پاییز، باعث کاهش روند تجزیه فوتوشیمیایی NO_2 می‌شود و در نتیجه، این آلاینده برای مدت زمان بیشتری در جو باقی می‌ماند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

توزیع مکانی غلظت دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) را در فصل زمستان در شهر اصفهان نمایش می‌دهد (شکل ۳-د). در این فصل، بیشترین مقادیر NO_2 در نواحی مرکزی شهر، به‌ویژه در مناطق ۸، ۷ و بخش‌هایی از منطقه ۶ مشاهده می‌شود. این نواحی در بازه‌ای بالاتر از ۳۰ (ppb) قرار دارند و با رنگ‌های نارنجی تا قرمز در نقشه مشخص شده‌اند. تمرکز بالای این آلاینده در نواحی مرکزی شهر می‌تواند به عوامل متعددی وابسته باشد. نخست آن‌که، شرایط جوی زمستان با ویژگی‌هایی نظیر دمای پایین، پایداری اتمسفری بیشتر و کاهش سرعت باد همراه است که بستر مناسبی برای وقوع پدیده‌ی وارونگی دما فراهم می‌آورد. این پدیده مانع از صعود و پراکندگی عمودی آلاینده‌ها شده و باعث حبس آن‌ها در لایه‌های پایین جو می‌گردد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

شکل ۳. پهنه بندی آلاینده (NO_2)Fig. 3. Spatial zoning of (NO_2) pollutant

شکل ۴ توزیع مکانی دی‌اکسید گوگرد را طی چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.

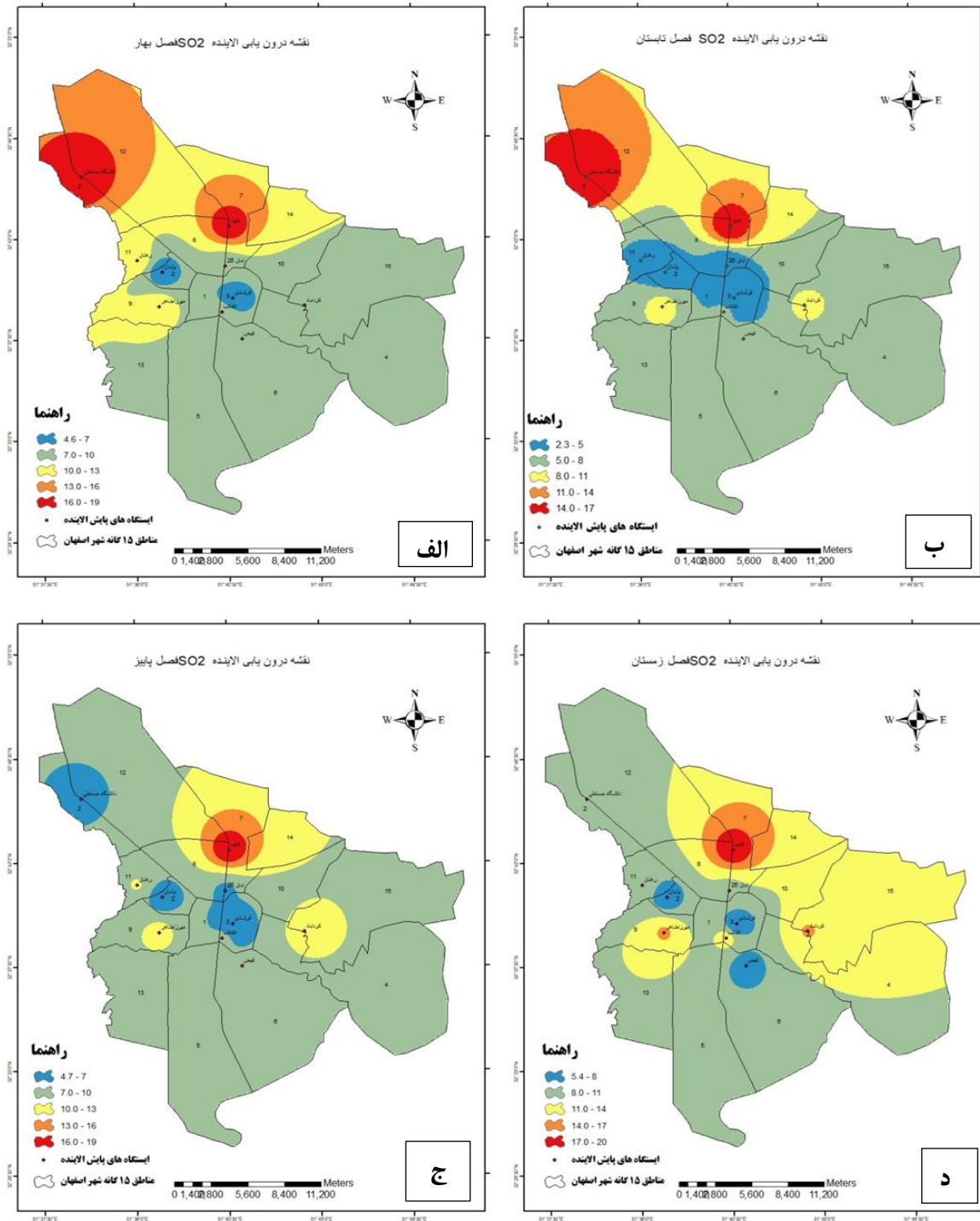
توزیع مکانی غلظت دی‌اکسید گوگرد (SO_2) را در فصل بهار در سطح شهر اصفهان نمایش می‌دهد (شکل ۴-الف). بر اساس این نقشه، بیشترین مقادیر SO_2 در منطقه ۱۲ و بخش‌هایی از منطقه ۷، به‌ویژه در نواحی شمال‌غربی شهر، قابل مشاهده است و در بازه‌های میان ۱۶ تا ۱۹ (ppb) قرار دارند. تمرکز بالای این آلاینده در این بخش از شهر را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد. یکی از مهم‌ترین عوامل، استقرار صنایع بزرگ و آلاینده در محدوده منطقه ۱۲ است؛ صنایعی نظیر پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و کارخانه‌های فلزی که عمدتاً از سوخت‌های فسیلی مانند نفت کوره یا زغال‌سنگ استفاده می‌کنند. دی‌اکسید گوگرد از جمله محصولات جانبی اصلی این نوع سوخت‌هاست و در مجاورت چنین واحدهایی، میزان انتشار آن به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد (ژو و همکاران، ۲۰۲۲). در نقطه‌ی مقابل، مناطق جنوبی، شرقی و جنوب‌شرقی شهر نظیر مناطق ۴، ۸، ۱۳ و ۱۵، به دلیل

تراکم صنعتی کمتر، سطوح پایین‌تری از دی‌اکسید گوگرد را تجربه می‌کنند؛ به طوری که در این نواحی، میزان غلظت در بازه‌ای میان ۴/۶ تا ۱۰ واحد مشاهده می‌شود. این اختلاف فضایی نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نوع کاربری زمین، شدت فعالیت‌های صنعتی و همچنین نقش بادهای غالب در انتقال و جابه‌جایی آلاینده‌ها در شکل‌گیری الگوی توزیع مکانی SO_2 در شهر اصفهان است (لی و همکاران، ۲۰۲۱).

توزیع مکانی غلظت آلاینده‌ی دی‌اکسید گوگرد (SO_2) را در فصل تابستان در سطح شهر اصفهان نمایش می‌دهد (شکل ۴-ب). مطابق نقشه، بیشترین تمرکز این آلاینده در مناطق ۱۲ و ۷ واقع در نیمه‌ی شمالی شهر دیده می‌شود؛ به‌ویژه در نواحی شمال‌غربی، که غلظت آلاینده در بازه‌ی ۱۵ تا ۱۸ میکروگرم بر مترمکعب قرار گرفته است. این مقدار، بالاترین سطح آلودگی ثبت‌شده در سطح شهر طی این فصل را نشان می‌دهد. در نقطه‌ی مقابل، پایین‌ترین میزان SO_2 به مناطق مرکزی و جنوبی نظیر مناطق ۲ و ۳ مربوط می‌شود که غلظتی در حدود ۳/۳ تا ۶ میکروگرم بر مترمکعب را نشان می‌دهند.

نقشه‌ی پهنه‌بندی آلاینده‌ی دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در فصل پاییز (شکل ۴-ج)، بیشترین میزان تمرکز این آلاینده در نواحی مرکزی و شمالی شهر اصفهان، به‌ویژه در مناطق ۷ و ۸ مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که میانگین غلظت SO_2 در این نواحی به بازه‌ی ۱۹-۱۶ (ppb) می‌رسد. این تمرکز بالا را می‌توان به عوامل متعددی از جمله تراکم صنایع، حجم بالای ترافیک، و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی در این نواحی نسبت داد (گودرزی، احمدی، رسولی، ۱۳۹۶).

پهنه‌بندی آلاینده‌ی دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در فصل زمستان نشان می‌دهد (شکل ۴-د)، که بیشترین غلظت این آلاینده در مناطق مرکزی و شمالی شهر اصفهان، به‌ویژه در نواحی ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. مقدار غلظت در این مناطق در بازه‌ی ۱۷ تا ۲۰ واحد (ppb) قرار دارد. این افزایش محسوس در مقایسه با فصل پاییز را می‌توان به اثرات ویژه‌ی زمستان نسبت داد؛ از جمله تشدید پدیده‌ی وارونگی دما، کاهش دمای هوا و در نتیجه، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در مصارف گرمایشی خانگی و صنعتی (کرمانی، حسینی، کریمی، ۱۳۹۹). افزون بر این، استقرار صنایع بزرگ آلاینده و نیروگاه‌های حرارتی در اطراف شهر نیز نقش چشمگیری در افزایش سطح آلاینده در این فصل دارند (تقوایی، محمدی، صادقی، ۱۳۹۷). به‌طور کلی، شیب مکانی غلظت آلاینده‌ی SO_2 در این فصل به‌گونه‌ای است که از نواحی شمال‌شرق، شرق و بخشی از شمال‌غرب به‌سوی مرکز شهر در حال کاهش است.



شکل ۴. پهنه‌بندی آلاینده (SO₂)
Fig. 4. Spatial zoning of (SO₂) pollutant

شکل ۵ توزیع مکانی غلظت مونوکسید کربن را طی چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.

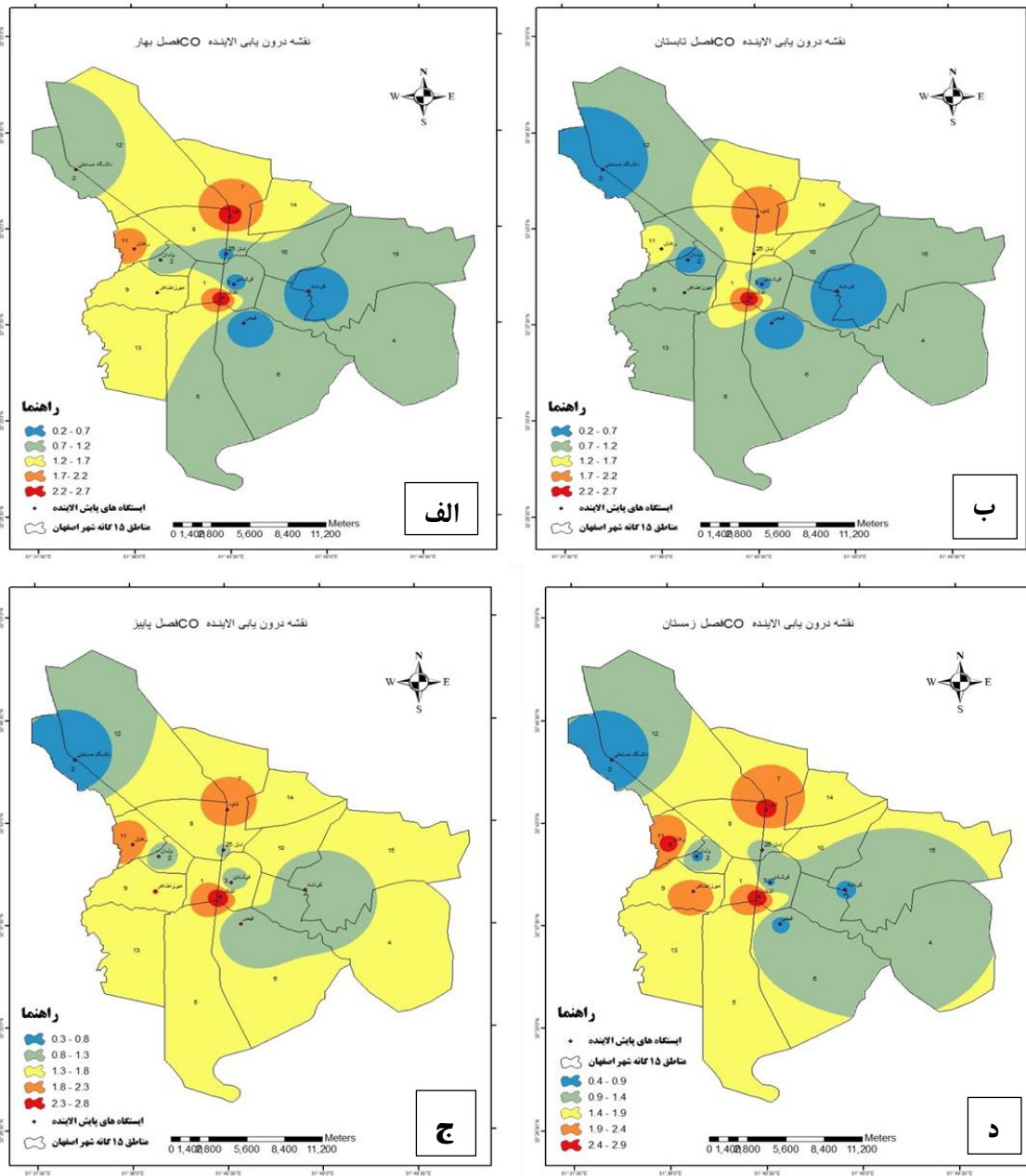
نقشه‌ی پهنه‌بندی غلظت آلاینده‌ی مونوکسید کربن (CO) در فصل بهار را در سطح شهر اصفهان نشان می‌دهد (شکل ۵-الف). بر اساس این نقشه، بیشترین میزان غلظت CO در مناطق مرکزی و پرتردد شهر، به‌ویژه نواحی ۱ و ۷، مشاهده می‌شود؛

به طوری که مقدار این آلاینده در این مناطق در بازه‌ی ۲/۲ تا ۲/۷ واحد بر حسب ppm قرار دارد. این تمرکز بالا، عمدتاً ناشی از حجم بالای ترافیک، تمرکز کاربری‌های تجاری و اداری و تردد خودروهای فرسوده‌ای است که به‌عنوان یکی از منابع اصلی انتشار مونوکسید کربن در محیط‌های شهری شناخته می‌شوند (عظیمی و فراهانی، ۱۴۰۰). در مقابل، نواحی پیرامونی شهر از جمله بخش‌های جنوبی و شرقی، دارای مقادیر پایین‌تری از غلظت CO هستند. این کاهش را می‌توان به عواملی همچون کاهش تراکم ترافیکی، پراکندگی کمتر فعالیت‌های انسانی و نیز وجود فضای سبز بیشتر در این مناطق نسبت داد. همچنین، در فصل بهار به دلیل افزایش دما و تهویه‌ی مؤثرتر جو نسبت به فصل‌های سرد، شرایط مساعدتری برای پراکندگی آلاینده‌ها فراهم می‌شود که در کاهش نسبی غلظت CO نقش دارد (گودرزی، احمدی، رسولی، ۱۳۹۶).

توزیع مکانی آلاینده مونوکسید کربن (CO) را در فصل تابستان در سطح شهر اصفهان نمایش می‌دهد (شکل ۵-ب). بر اساس این نقشه، بالاترین میزان غلظت CO در نواحی مرکزی شهر، به‌ویژه در محدوده‌ی مناطق ۳ و ۶ مشاهده می‌شود. این مناطق که بخش‌هایی از مرکز شهر و نواحی پرتردد را شامل می‌شوند، با رنگ‌های قرمز و نارنجی مشخص شده‌اند و دارای میانگین غلظتی در حدود ۲/۲ تا ۲/۷ ppm هستند. در فصل تابستان، به دلیل افزایش دما و پایداری نسبی شرایط جوی، تهویه‌ی طبیعی کاهش یافته و این موضوع موجب تجمع آلاینده‌هایی نظیر مونوکسید کربن در لایه‌های پایینی جو می‌شود. همچنین پدیده‌ی وارونگی دما در ساعات اولیه روز نیز باعث می‌شود این آلاینده به‌جای پراکندگی، در سطح زمین باقی بماند و در مناطق پرتردد انباشت یابد (حسینی، کریمی، بهرامی، ۱۳۹۹). در مقابل، پایین‌ترین سطوح غلظت CO در مناطقی چون ۸، ۱۲، ۱۳ و ۱۵ مشاهده می‌شود که عمدتاً در نواحی شرقی، جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی شهر قرار دارند. این مناطق، با رنگ‌های آبی و سبز مشخص شده‌اند و دارای غلظتی در بازه‌ی ۰/۲ تا ۱/۲ ppm هستند که می‌تواند به عواملی مانند کاهش تراکم ترافیک، نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی و فاصله از مرکز شهر نسبت داده شود.

پراکندگی مکانی آلاینده‌ی مونوکسید کربن (CO) را در فصل پاییز در شهر اصفهان نمایش می‌دهد (شکل ۵-ج). طبق این نقشه، بیشترین غلظت CO در نواحی مرکزی، شمالی و غربی شهر، به‌ویژه در مناطق ۳، ۱، ۷ و ۱۱ مشاهده می‌شود. این مناطق که با رنگ‌های قرمز و نارنجی مشخص شده‌اند، دارای غلظتی در حدود ۱/۸ تا ۲/۸ ppm هستند. در مقابل، نواحی پیرامونی نظیر مناطق ۲ و ۱۲ که با رنگ آبی و سبز مشخص شده‌اند، غلظت‌هایی کمتر از ۱/۳ ppm دارند.

الگوی توزیع مکانی آلاینده مونوکسید کربن (CO) در فصل زمستان در سطح شهر اصفهان را نشان می‌دهد (شکل ۵-د). مطابق این نقشه، بیشترین میزان غلظت این آلاینده در مناطق شمالی، مرکزی و غربی شهر، به‌ویژه در نواحی ۷، ۱ و ۱۱ مشاهده می‌شود که با رنگ‌های قرمز و نارنجی نمایان شده‌اند. در مقابل، مناطقی مانند ۱۲، ۴، ۵، ۳ و ۱۵ که در بخش‌های شرقی و شمال‌غربی شهر واقع شده‌اند، با رنگ‌های سبز و آبی مشخص شده‌اند که نشان‌دهنده‌ی غلظت پایین‌تر CO هستند. در مجموع، شیب مکانی آلودگی مونوکسید کربن در فصل زمستان به‌گونه‌ای است که از مناطق شمالی، مرکزی و غربی شهر به سمت نواحی شمال‌غربی و جنوب‌شرقی کاهش می‌یابد.



شکل ۵. پهنه بندی آلاینده (CO)
Fig. 5. Spatial zoning of (CO) pollutant

شکل ۶ توزیع مکانی غلظت آلاینده ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون (PM2/5) را طی چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد.

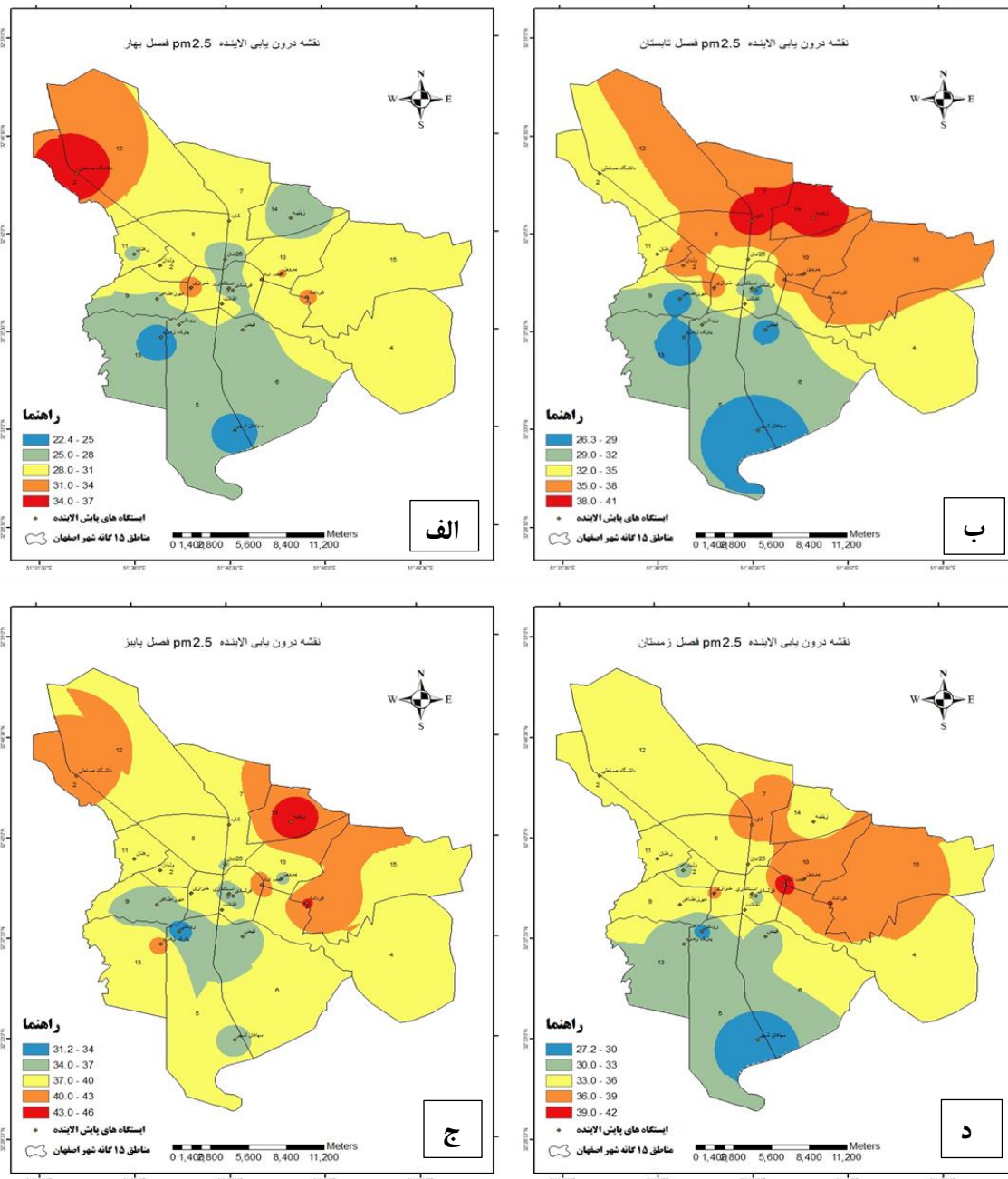
نقشه‌ی توزیع مکانی آلاینده‌ی ذرات معلق ریز (PM2/5) در فصل بهار را در سطح شهر اصفهان نشان می‌دهد (شکل ۶-الف). مطابق این نقشه، بیش‌ترین غلظت این آلاینده در نواحی شمال‌غربی، بخش‌هایی از مرکز و مناطق شرقی شهر مشاهده می‌شود که در برخی نقاط به حدود ۳۷ میکروگرم بر مترمکعب می‌رسد. در مقابل، نواحی جنوبی و جنوب‌غربی شهر (مانند مناطق ۱۳، ۱۴ و ۱۵) که از تراکم صنعتی و ترافیکی کمتری برخوردارند، پایین‌ترین سطوح آلاینده PM2/5 را نشان می‌دهند. در مجموع، الگوی توزیع مکانی آلاینده به‌گونه‌ای است که شیب کاهش آلودگی از سمت شمال، شمال‌شرق و شرق به‌سوی جنوب و

جنوب غرب شهر قابل مشاهده است.

الگوی توزیع مکانی آلاینده $PM_{2.5}$ را در فصل تابستان در سطح شهر اصفهان نمایش می‌دهد (شکل ۶-ب). بر اساس این نقشه، بیشترین غلظت این آلاینده در نواحی شمال و شمال شرقی شهر متمرکز است؛ به طوری که میزان آن در برخی نقاط به حدود ۳۵ تا ۴۱ میکروگرم بر مترمکعب می‌رسد. در مقابل، مناطق جنوبی و جنوب غربی شهر غلظت‌های پایین‌تری را تجربه می‌کنند؛ به گونه‌ای که مقدار $PM_{2.5}$ در این نواحی بین ۲۶ تا ۳۲ میکروگرم بر مترمکعب متغیر است.

توزیع مکانی آلاینده $PM_{2.5}$ در فصل پاییز را در سطح شهر اصفهان نشان می‌دهد (شکل ۶-ج). بر اساس این نقشه، بیشترین غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در مناطق شمالی، شمال شرقی و بخشی از شمال غربی شهر دیده می‌شود، به گونه‌ای که مقادیر آن در این نواحی به حدود ۴۰ تا ۴۶ میکروگرم بر متر مکعب می‌رسد. در مقابل، نواحی مرکزی، جنوبی و جنوب غربی شهر شاهد غلظت‌های پایین‌تری هستند، به طوری که مقدار این آلاینده در برخی مناطق تا حدود ۳۱ و حتی ۲۱ میکروگرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد.

توزیع مکانی آلاینده $PM_{2.5}$ در فصل زمستان (شکل ۶-د)، بیشترین تمرکز را در نواحی شمالی، شمال شرقی و بخش‌هایی از مرکز شهر اصفهان دارد. در این مناطق، غلظت آلاینده‌ها بین ۳۶ تا ۴۲ میکروگرم بر متر مکعب گزارش شده که بالاتر از حد راهنمای سازمان جهانی بهداشت است. در بخش مرکزی شهر نیز، غلظت‌ها به حدود ۳۹ تا ۴۲ میکروگرم بر متر مکعب می‌رسند که می‌توان آن را ناشی از اثر تجمعی منابع آلاینده متحرک و ثابت، به ویژه در مناطق با تراکم بالای جمعیتی، دانست. در مقابل، در نواحی جنوبی و جنوب غربی شهر، میزان $PM_{2.5}$ کاهش یافته و به حدود ۲۷ تا ۳۳ میکروگرم بر متر مکعب رسیده است. از نظر الگوی فضایی و شیب آلودگی، می‌توان گفت که مقدار آلاینده‌ها از شمال، شمال شرق و شرق به سمت مرکز، جنوب و جنوب غرب در حال کاهش است.



شکل ۶. پهنه بندی آلودگی (PM2/5)
 Fig. 6. Spatial zoning of (PM2/5) pollutant

زون بندی داده‌های ماهواره‌ای

شکل ۷ زون بندی آلاینده مونوکسید کربن (CO) را در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان طی بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ در مناطق پانزده گانه کلان شهر اصفهان نمایش می‌دهد.

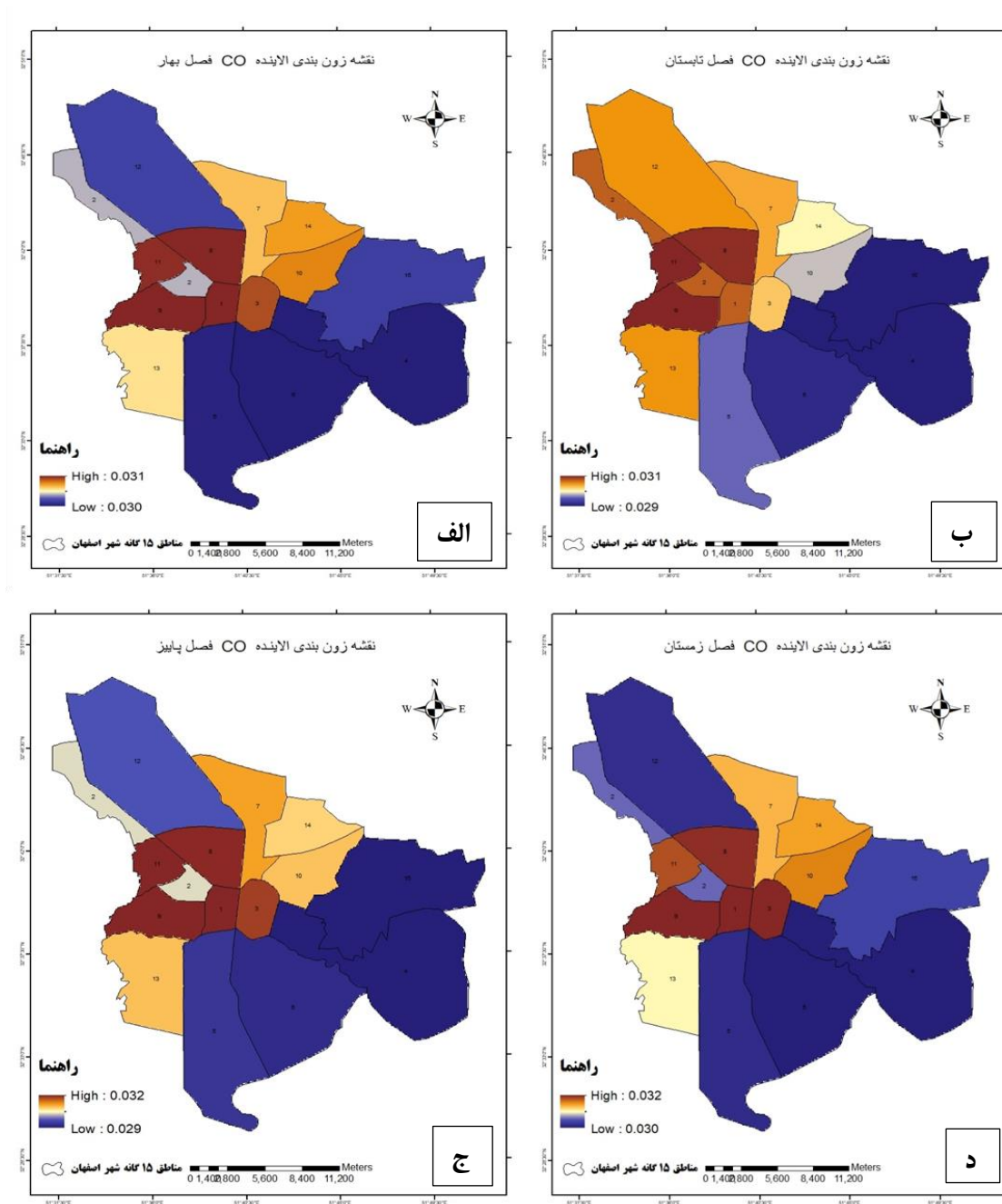
در فصل بهار (شکل ۷-الف)، بیشترین میزان آلودگی در مناطق ۱، ۸، ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود که عمدتاً در بخش‌های مرکزی و غربی شهر واقع شده‌اند. در مقابل، مناطق ۴، ۵، ۶، ۱۲ و ۱۵ که در شمال غرب، شرق و جنوب شرق اصفهان قرار دارند، کمترین میزان آلودگی را نشان می‌دهند. سایر مناطق از جمله ۳، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۴ در سطح آلودگی متوسط قرار گرفته‌اند.

در فصل تابستان (شکل ۷-ب)، الگوی پراکنش آلاینده تا حدودی متفاوت می‌شود. در این فصل، مجدداً مناطق ۸، ۹ و ۱۱ به‌عنوان نواحی با بیشترین غلظت CO شناخته می‌شوند و مناطق ۱ و ۲ نیز به آن‌ها افزوده می‌شود. آلودگی در غرب و شمال‌غرب شهر نسبت به سایر نواحی شدت بیشتری دارد. در مقابل، مناطق ۴، ۵، ۶ و ۱۵ در دسته مناطق پاک قرار دارند و نواحی مرکزی - شرقی مانند ۳، ۱۰ و ۱۴ در سطح متوسط قرار گرفته‌اند.

در فصل پاییز (شکل ۷-ج)، الگوی توزیع آلاینده CO شباهت زیادی به فصل بهار دارد. بیشترین آلودگی در مناطق ۱، ۸، ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود، درحالی‌که مناطق ۴، ۵، ۶، ۱۲ و ۱۵ جزو مناطق با حداقل آلودگی قرار دارند. سایر نواحی مانند ۲، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۴ در محدوده میانگین قرار گرفته‌اند.

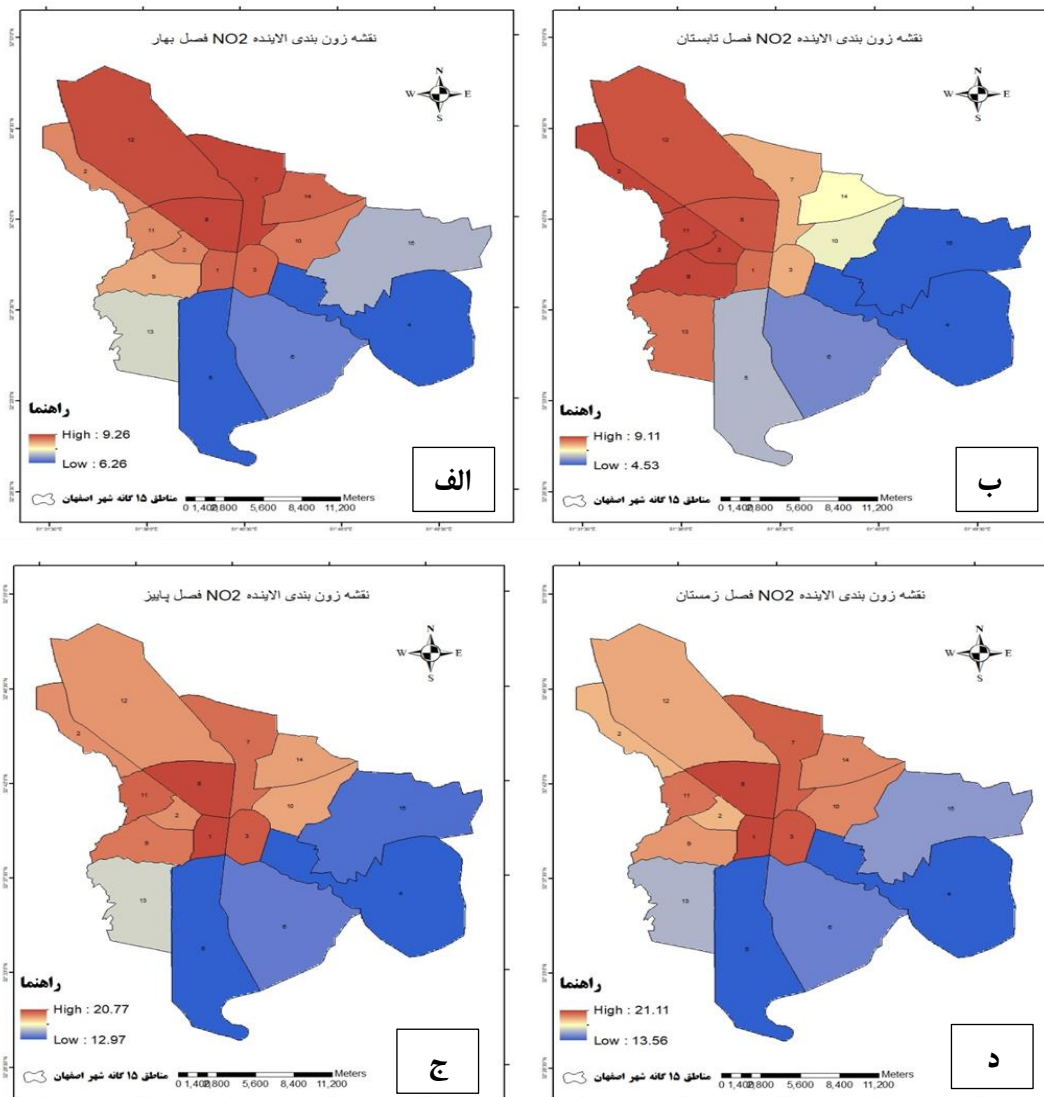
در فصل زمستان (شکل ۷-د)، آلودگی به طور ملموسی افزایش می‌یابد و شدت آن در نواحی مرکزی شهر بیشتر است. مناطق ۱، ۳، ۸ و ۹ آلوده‌ترین نواحی شهر در این فصل به شمار می‌آیند که عمدتاً در مرکز و جنوب‌غربی اصفهان واقع شده‌اند. پس از آن، مناطق ۷، ۱۰، ۱۱ و ۱۴ در سطح بالای آلودگی قرار دارند. منطقه ۱۳ در سطح متوسط بوده و در مقابل، مناطق ۲، ۴، ۵، ۶، ۱۲ و ۱۵ که در شرق، جنوب و شمال‌غرب اصفهان پراکنده‌اند، کمترین میزان آلاینده CO را ثبت کرده‌اند. در مجموع می‌توان گفت که در فصل زمستان، تمرکز آلودگی بیشتر در نواحی مرکزی شهر مشاهده می‌شود و بخش‌های پیرامونی از شرایط پاک‌تری برخوردارند.

غلظت مونوکسید کربن (CO) در مرکز شهر اصفهان به دلیل تجمع بالای منابع انتشار مانند ترافیک خودروها، فعالیت‌های صنعتی و کاهش تهویه طبیعی، به طور قابل توجهی بیشتر از حاشیه‌های شهر است. ساختمان‌های بلند و تراکم جمعیت باعث محدود شدن جریان هوا می‌شوند که به انباشت آلاینده‌ها دامن می‌زند.



شکل ۷. زون بندی آلاینده (CO)
 Fig. 7. zoning of (CO) pollutant

شکل ۸ زون بندی آلاینده دی‌اکسید نیتروژن (NO₂) را در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان در بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ در کلان‌شهر اصفهان نمایش می‌دهند. در فصل بهار (شکل ۸-الف)، بیشترین غلظت آلاینده در مناطق مرکزی و شمالی شهر، به‌ویژه مناطق ۷، ۸ و ۱۲ مشاهده می‌شود، در حالی که مناطق جنوبی و شرقی از جمله مناطق ۴، ۵ و ۶ دارای غلظت پایین‌تری هستند. در فصل تابستان (شکل ۸-ب) نیز، الگوی مشابهی ادامه یافته و آلودگی همچنان در مناطق شمالی و غربی شهر از جمله مناطق ۲، ۹، ۱۱ و ۱۲ بیشتر بوده و مناطق جنوبی‌تر مانند ۴، ۵، ۶ و ۱۵ کیفیت هوای بهتری را تجربه کرده‌اند.



شکل ۸. زون بندی آلاینده (NO_2)
Fig. 8. zoning of (NO_2) pollutant

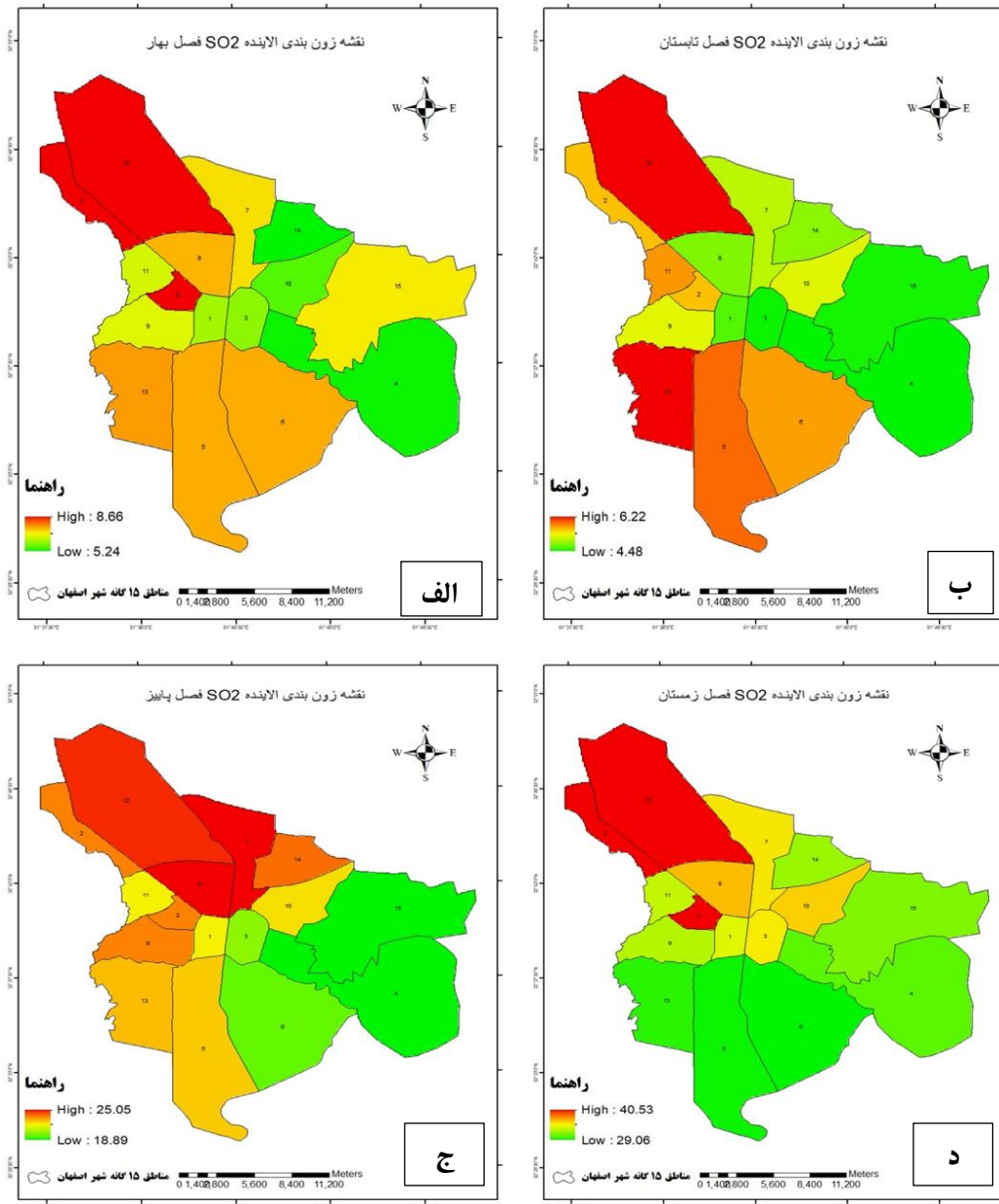
در فصل پاییز (شکل ۸-ج)، بنا بر داده‌های زون بندی، مناطق ۱ و ۸ در وضعیت بحرانی از نظر آلودگی قرار دارند و به دنبال آن مناطق ۲، ۳، ۷، ۱۲، ۱۱، ۹، ۱۰ و ۱۴ در زون‌های با آلودگی بالا جای گرفته‌اند. منطقه ۱۳ در سطح آلودگی متوسط و مناطق ۴، ۵، ۶ و ۱۵ در زون کم آلودگی هستند. در زمستان (شکل ۸-د)، وضعیت مشابهی حاکم است؛ مناطق ۱ و ۸ همچنان آلوده‌ترین مناطق هستند و مناطقی چون ۳، ۷، ۱۱، ۱۰ و ۱۴ نیز در زون‌های نسبتاً آلوده قرار دارند. پاک‌ترین مناطق در این فصل شامل ۱۳، ۴، ۵، ۶ و ۱۵ هستند که در جنوب و جنوب شرقی شهر قرار دارند.

به طور کلی، الگوی مکانی آلودگی در چهار فصل سال نشان می‌دهد که نیمه شمالی، شمال غربی و غربی اصفهان همواره با سطوح بالاتری از آلاینده NO_2 مواجه بوده‌اند؛ این امر ممکن است ناشی از تراکم بالای وسایل نقلیه، فعالیت‌های صنعتی و جمعیت زیاد در این مناطق باشد (گودرزی، احمدی، رسولی، ۱۳۹۸). در مقابل، نیمه جنوبی و شرقی شهر سطح پایین تری از این آلاینده را دارند.

شكل ۹ زون‌بندي آلاينده دى‌اكسيد گوگرد (SO_2) را در فصول بهار، تابستان، پاييز و زمستان طى بازه زمانى ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ در كلان‌شهر اصفهان نمايش مى‌دهند. بررسى اين نقشه‌ها بيانگر آن است كه پراكش مكاني آلاينده در سطح مناطق شهري در طول سال دچار نوسانات فصلى مشخصى مى‌شود. در فصل بهار (شكل ۹-الف)، مناطق ۲ و ۱۲ به‌عنوان آلوده‌ترين نواحى شهر در زون بسيار آلوده قرار دارند. پس از آن‌ها، مناطقى مانند ۸، ۵، ۶، ۱۳، ۷ و ۱۵ در محدوده آلودگى بالا ديده مى‌شوند. در مقابل، مناطقى همچون ۱، ۳، ۴، ۱۰ و ۱۴ در زون‌هاى پاك‌تر قرار گرفته‌اند. اين الگو بيانگر تجمع آلاينده در نيمه شمال‌غربى و مياني شهر و در عين حال پاك‌تر بودن بخش‌هاى شرقى و مركزى است.

در فصل تابستان (شكل ۹-ب)، الگوى آلودگى تغيير كرده است. اين بار مناطق ۱۲ و ۱۳ در زون بسيار آلوده قرار گرفته‌اند. پس از آن، مناطقى مانند ۵، ۶، ۱۱ و ۲ نيز در محدوده آلودگى بالا ديده مى‌شوند. مناطق ۹ و ۱۰ در زون متوسط قرار دارند و بيشتر نواحى شرقى، مركزى و شمال‌شرقى شهر شامل مناطق ۱، ۳، ۴، ۷، ۸، ۱۴ و ۱۵ در محدوده پاك‌تر قرار گرفته‌اند. اين الگو نشان‌دهنده تمرکز آلودگى در نيمه غربى و كاهش آن در شرق و شمال‌شرق شهر است. در فصل پاييز (شكل ۹-ج)، مناطقى مانند ۷، ۸ و ۱۲ در زون بسيار آلوده قرار دارند. پس از آن‌ها، مناطق ۲، ۹ و ۱۴ در محدوده آلودگى بالا جاى گرفته‌اند. مناطق ۱، ۵، ۱۰، ۱۱ و ۱۳ در زون آلودگى متوسط قرار دارند. در اين فصل نيز مانند تابستان، نواحى شرقى و جنوب‌شرقى شهر شامل مناطق ۳، ۴، ۶ و ۱۵ جزو پاك‌ترين مناطق محسوب مى‌شوند. اين الگو نشانه تشديد آلودگى در ميانه و شمال‌غرب شهر همزمان با پايدارى بيشتر شرايط جوى است. اين نتايج با پژوهش جمشيدى و همكاران (۱۳۹۶) و خورشيد دوست و همكاران (۱۳۹۶) هم‌خوانى دارد.

در فصل زمستان (شكل ۹-د)، مطابق تحليل پيشين، مناطق ۲ و ۱۲ در زون بسيار آلوده قرار دارند و پس از آن‌ها مناطق ۷، ۸، ۱۰ و ۳ در محدوده متوسط تا بالا ديده مى‌شوند. از سوى ديگر، مناطق ۴، ۵، ۶، ۹، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ به‌عنوان نواحى پاك‌تر شناسايى مى‌شوند. الگوى كلّى زمستان نشان مى‌دهد كه نيمه شمالى و غربى شهر همچنان آلوده‌ترين نقاط هستند، در حالى كه بخش‌هاى شرقى و جنوبى وضعيت مطلوب‌ترى دارند.



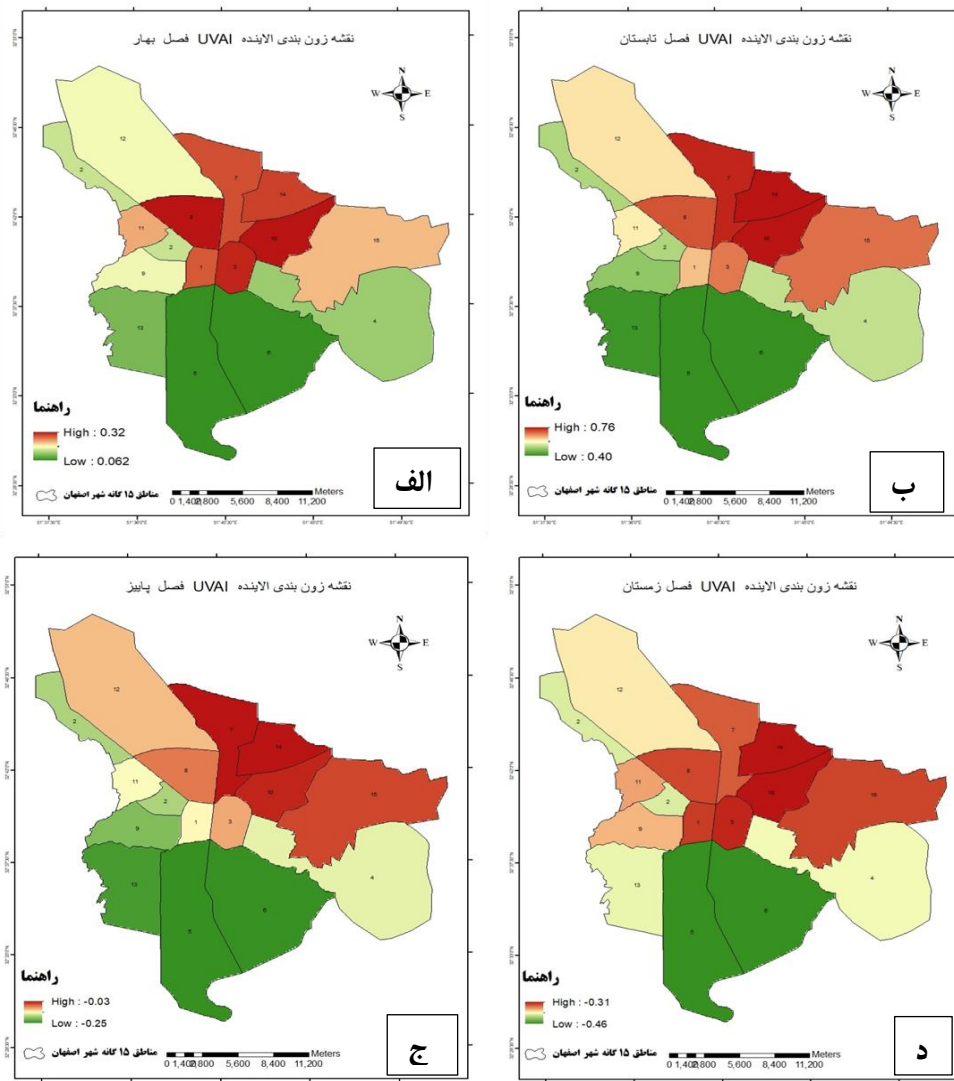
شکل ۹. زون بندی آلاینده (NO_2)
Fig. 9. zoning of (NO_2) pollutant

شکل ۱۰ زون بندی آلاینده‌ی (UV Aerosol Index) را در چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در کلان شهر اصفهان نشان می‌دهند. این شکل‌ها نمایانگر تفاوت‌های مکانی آلودگی در فصول مختلف‌اند و نشان می‌دهند که بخش‌هایی از شهر در همه‌ی فصول نسبت به سایر نواحی در وضعیت آلودگی شدیدتری قرار دارند. در فصل بهار (شکل ۱۰-الف)، بیشترین تمرکز آلودگی در مناطق ۱، ۷، ۳، ۸، ۱۰ و ۱۴ دیده می‌شود. این نواحی که عمدتاً در شمال شرقی و مرکز شهر واقع شده‌اند، در زون‌های دارای آلاینده‌ی بالا قرار گرفته‌اند. مناطق ۱۱ و ۱۵ نیز در وضعیت متوسط قرار دارند، در حالی که مناطق جنوبی مانند ۲، ۴، ۵، ۶، ۱۲ و ۱۳ در زون‌های پاک یا کم‌خطر دیده می‌شوند.

در فصل تابستان (شکل ۱۰-ب) نیز وضعیت مشابهی مشاهده می‌شود. مناطق ۳، ۷، ۸، ۱۴، ۱۰ و ۱۵ مجدداً در زمره نواحی آلوده باقی مانده‌اند. در این فصل، آلودگی در نواحی شمالی و شمال شرقی شدت بیشتری یافته و مرز بین مناطق آلوده و پاک به

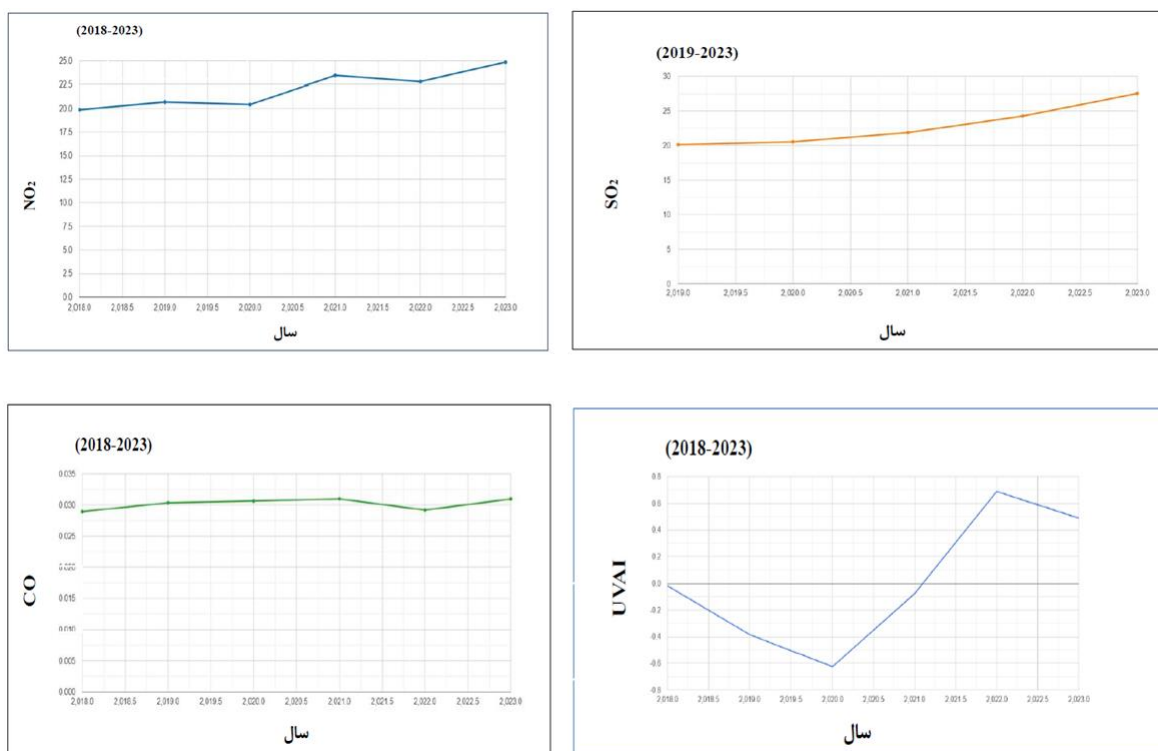
سمت جنوب گسترش يافته است. مناطق ۱۱ و ۱۲ در وضعيت مياني هستند و نواحى ۲، ۴، ۵، ۶ و ۹ مانند فصل بهار در زون پاك ديده مي‌شوند. در پاييز (شكل ۱۰-ج) نيز با وجود كاهش شدت كلى آلودگى، الگوى فضايى نسبتاً پايدار باقى مانده است. مناطقى مانند ۷، ۸، ۱۰، ۱۴ و ۱۵ در زون‌هاى داراى آلودگى بالا قرار دارند. در اين فصل، مناطق ۱، ۳، ۱۱ و ۱۲ در محدوده‌ى آلودگى متوسط قرار گرفته‌اند و نواحى ۴، ۵، ۶، ۹ و ۱۳ بار ديگر در وضعيت پاك قرار گرفته‌اند.

در فصل زمستان (شكل ۱۰-د)، مناطق ۱، ۳، ۷، ۸، ۱۰، ۱۴ و ۱۵ در زون بسيار آلوده قرار دارند. بعد از آن‌ها، مناطق ۹، ۱۱ و ۱۲ در زمره نواحى آلودگى متوسط ديده مي‌شوند. در حالى كه مناطق ۲، ۴، ۵، ۶ و ۱۳ در وضعيت پاك باقى مانده‌اند. در اين فصل، الگوى فضايى باز هم تاييد مي‌كند كه بخش‌هاى از شمال و شمال‌شرق شهر نسبت به ساير نواحى در وضعيت بحراني‌ترى قرار دارند. در مقابل، جنوب‌غرب، جنوب و جنوب‌شرقى شهر همچنان پايدارترين وضعيت پاك را دارند.



شكل ۱۰. زون بندى آلاينده (UVAI)
Fig. 10. zoning of (UVAI) pollutant

نتايج ارزشيابى صحت نقشه‌ها نشان داد كه، روش‌هاى به‌كاررفته توانايى بالايى در بازنمايى الگوى فضايى آلاينده‌ها دارند و نتايج قابل اعتماد هستند. به طورى كه شاخص كاپا در هيچ‌كدام از ماه‌ها و فصل به کمتر ۸۵ درصد نرسيد، بيشترين ميزان شاخص (۹۶درصد) بين داده‌هاى ماه‌هاى آبان و آذر بدست آمد.



شکل ۱۱. نمودار سری زمانی آلاینده‌ها
Fig. 11. Time Series plot of pollutant

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده TROPOMI بر روی ماهواره Sentinel-5P و داده‌های ایستگاه‌های سنجش زمینی، توزیع مکانی و روند زمانی پنج آلاینده اصلی شامل دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، کربن مونوکسید (CO)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرون ($\text{PM}_{2.5}$)، و شاخص UV Aerosol Index (UVAI) در کلان‌شهر اصفهان طی دوره شش‌ساله‌ی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل هر یک از این آلاینده‌ها به صورت جداگانه انجام شد تا هم الگوی فضایی و هم تغییرات زمانی آن‌ها در سطح مناطق شهری با دقت بیشتری ارزیابی گردد.

نتایج نشان می‌دهد که غلظت دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) به‌طور مستمر در نواحی مرکزی، شمالی و شمال‌غربی شهر، به‌ویژه در مناطق ۱، ۲، ۳، ۷، ۸، ۱۲ و ۱۵، در سطوح بالاتری قرار داشته است. در مقابل، نواحی شرقی، جنوبی و جنوب‌شرقی مانند مناطق ۴، ۵، ۶ و ۱۵، از مقادیر پایین‌تری برخوردار بوده‌اند. در نتیجه، شیب غلظت این آلاینده از مرکز به سمت جنوب و شرق شهر کاهش داشته است. مونوآکسیدکربن (CO) نیز رفتاری مشابه نشان داده و تمرکز آن عمدتاً در مناطق مرکزی و غربی شهر مانند مناطق ۱، ۲، ۸، ۹ و ۱۱ مشاهده شده است. در مقابل، مناطق پیرامونی مانند ۴، ۵، ۶، ۱۲ و ۱۵، سطوح پایین‌تری از این آلاینده را ثبت کرده‌اند. کاهش تدریجی غلظت از مرکز و غرب به سمت حاشیه‌ها، بیانگر تأثیر مستقیم تراکم ترافیک و فعالیت‌های شهری بر این آلاینده است.

الگوی پراکنش دی‌اکسید گوگرد (SO_2) برخلاف دو آلاینده پیش‌گفته، نوسانی‌تر بوده و طی سال‌های مختلف دچار تغییرات مکانی محسوسی شده است. در برخی سال‌ها، غلظت‌های بالاتر در مناطق شمال‌غربی، غربی و مرکزی شهر از جمله مناطق ۵، ۸، ۱۲ و ۱۳ متمرکز بوده‌اند، در حالی که مناطق شرقی و جنوبی مانند ۱۰، ۱۴، ۱۵ و بخش‌هایی از ۶، معمولاً از کیفیت بهتری برخوردار بوده‌اند. به‌طور کلی، می‌توان روندی از کاهش غلظت این آلاینده از شمال‌غرب به سمت جنوب و شرق شهر مشاهده کرد. تحلیل داده‌های مربوط به شاخص UV Aerosol Index (UVAI) نیز نشان داد که آبروسول‌ها عمدتاً در بخش‌های

شرقی، شمال شرقی و مرکزی شهر غلظت بالاتری داشته‌اند؛ مناطقی همچون ۷، ۸، ۱۰، ۱۴ و ۱۵ به‌طور مداوم آلوده‌ترین نقاط از منظر UVAI بوده‌اند. در مقابل، نواحی جنوبی و جنوب‌غربی، شامل مناطق ۴، ۵، ۶، ۹ و ۱۳، شرایط بهتری را تجربه کرده‌اند. این الگوی مکانی نسبتاً پایدار بوده و شیب کاهش غلظت از شرق و مرکز به سوی جنوب و جنوب‌غرب مشهود است.

ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون (PM2/5)، که از مهم‌ترین عوامل خطر برای سلامت عمومی محسوب می‌شوند، تمرکز آلاینده طی اغلب سال‌های مورد بررسی در نواحی مرکزی، شمالی و بخش‌هایی از غرب شهر مشاهده شده است. مناطقی همچون ۱، ۳، ۷، ۸ و ۱۲ به‌عنوان آلوده‌ترین مناطق از نظر PM2/5 شناخته شده‌اند. در عوض، نواحی جنوبی، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی، از جمله مناطق ۵، ۶، ۹، ۱۳ و ۱۵، معمولاً کیفیت هوای بهتری داشته‌اند. روند پراکنش فضایی این آلاینده نیز شبیهی نزولی از مرکز و شمال شهر به سمت حاشیه‌های جنوبی و شرقی نشان می‌دهد.

تحلیل روند زمانی آلاینده‌ها در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۹، مقادیر آلاینده‌های CO، NO₂، PM2/5 و UVAI به‌طور همزمان کاهش قابل توجهی داشته‌اند (شکل ۱۱). این افت آشکار در غلظت آلاینده‌ها را می‌توان با اعمال محدودیت‌های کرونایی در سال یادشده مرتبط دانست؛ محدودیت‌های تردد شهری، تعطیلی گسترده مراکز تجاری، کاهش فعالیت‌های صنعتی و توقف رفت‌وآمدهای بین‌شهری موجب کاهش فشار زیست‌محیطی بر مناطق شهری شد و به بهبود موقت کیفیت هوا انجامید، که نتایج پژوهش‌های محققانی همچون بهرامی پیچاقچی (۱۴۰۳) و آفریده و همکاران (۱۴۰۰) نیز این مطالب را تایید می‌نماید. با این حال، در سال‌های پس از آن، به‌ویژه در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱، با رفع تدریجی محدودیت‌ها و بازگشت شرایط به حالت عادی، مقادیر بیشتر آلاینده‌ها مجدداً افزایش یافت و به سطوح پیش از همه‌گیری نزدیک یا حتی از آن فراتر رفت. این روند افزایشی، نقش محوری فعالیت‌های انسان‌ساخت در شکل‌گیری آلودگی هوا در شهرهای بزرگ را بار دیگر برجسته می‌سازد و بر لزوم تدوین و اجرای سیاست‌های بلندمدت و ساختاری در حوزه مدیریت کیفیت هوا تأکید می‌کند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۳۷۳۴۷» انجام شده است.

منابع

- Azimi, R., & Farahani, N. (2021). An investigation of the role of urban traffic in changes of carbon monoxide concentration in Isfahan metropolis. *Journal of Environmental Studies*, 22(3), 45–62. (in Persian)
- Azimi, Reza, and Farahani, Nasrin. (2021). Investigating the role of urban traffic in changes in carbon monoxide concentration in Isfahan metropolis. *Journal of Environmental Research*, 22(3), 45–62.
- Afrideh, Faezeh, Ramsht, Mohammad Hossein, & Mortin, Graham. (2021). *Spatio-temporal analysis of the Air Quality Index (AQI) of Tehran city during a ten-year period*. *Natural Geography Research*, 53(4), 447–463. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.324223.1007620>
- Bahrami Pichaghchi, Hadigheh, Norooz Valashdi, Reza, & Gholami Sefidkouhi, Mohammad Ali. (2025). *Investigation of the effect of climatic variables on the temporal distribution of air pollution using Sentinel-5P data in Mazandaran Province*. *Environment and Water Engineering*, 10(4), 480–495. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.434545.1906>

- Bagheri, H., Mohammadi, A., & Karimi, Z. (2022). *Urban divisions and neighborhood structures of Isfahan metropolis*. Isfahan: University of Isfahan Press. (in Persian)
- Bagheri, Hassan, Mohammadi, Ali, and Karimi, Zahra. (2018). *Urban divisions and neighborhood structure of Isfahan metropolis*. Isfahan: Isfahan University Press.
- Butler, T. M., Lawrence, M. G., & Lelieveld, J. (2008). Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric Environment*, 42(7), 1593–1606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.-2007.10.048>
- Campa, C., & Castanas, E. (2008). Air pollution and urban health: A review. *Environmental Pollution*, 151(3), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.011>
- Jamshidi, Samira Sadat, Mohammadzadeh, Mohammad, & Ghafourani, Mehrnoosh. (2017). *Localization and analysis of air pollution and pollutant sources in the metropolis of Isfahan using Geographic Information System (GIS)*. *International Conference on Sustainable Development and Urban Development*. Retrieved from. <https://sid.ir/paper/897380/fa>
- Department of Environment of Isfahan Province. (2023). *Report on air pollution status in Isfahan*. Isfahan: DOE. (in Persian)
- Ghanadi, M., Ahmadi, R., & Hosseini, A. (2022). Monitoring air pollutants in Iranian industrial cities using Sentinel-5 and Google Earth Engine. *Iranian Journal of Environmental Sciences*, 20(3), 55–70. (in Persian)
- Ghanadi, Mehdi, Ahmadi, Reza, and Hosseini, Ali. (1401). Monitoring air pollutants in industrial cities of Iran using Sentinel-5 images and Google Earth Engine. *Iranian Journal of Environmental Sciences*, 20(3), 55–70.
- Goodarzi, Fatemeh, Ahmadi, Saeed, and Rasouli, Hamid. (2017). Study of spatial and temporal changes of air pollutants in Tehran metropolis with emphasis on sulfur dioxide. *Environmental Sciences Quarterly*, 15(2), 55-70.
- Goudarzi, F., Ahmadi, S., & Rasouli, H. (2017). Spatial and temporal changes of air pollutants in Tehran metropolis with emphasis on sulfur dioxide. *Environmental Sciences Quarterly*, 15(2), 55–70. (in Persian)
- Gulia, S., Nagendra, S. S., Khare, M., & Khanna, I. (2015). Urban air quality management—A review. *Atmospheric Pollution Research*, 6(2), 286–304. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.033>
- Gurjar, B. R., Butler, T. M., Lawrence, M. G., & Lelieveld, J. (2008). Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric Environment*, 42(7), 1593–1606. <https://doi.org/10.1016/j.-atmosenv.2007.10.048>
- Hassan-Zadeh, F., Rezaei, M., & Karimi, S. (2023). Spatiotemporal analysis of air pollutants around Khatounabad copper smelter using Sentinel-5 data. *Iranian Environmental Journal*, 45(2), 112–130. (in Persian)
- Hassanzadeh, Fatemeh, Rezaei, Mohammad, and Karimi, Saeed. (2019). Spatial-temporal analysis of air pollutants in the area of Khatounabad copper smelting plant using Sentinel-5 satellite data. *Iranian Journal of Environment*, 45(2), 112–130.
- Hosseini, M. R., Karimi, S., & Bahrami, S. (2020). Temperature inversion phenomenon and its impact on gaseous air pollutants in Iranian cities. *Quarterly Journal of Climatology*, 12(1), 87–104. (in Persian)
- Hosseini, Mohammad Reza, Karimi, Saeed, and Bahrami, Sara. (2019). Temperature inversion phenomenon and its effect on the concentration of gaseous pollutants in Iranian cities. *Climatology Quarterly*, 12(1), 87-104.

- Isfahan Environmental Protection Organization. (2023). *Isfahan Air Pollution Status Report*. Isfahan: Environmental Protection Organization.
- Kermani, M., Hosseini, M. R., & Karimi, A. (2020). Effects of temperature inversion on gaseous pollutant concentrations in Isfahan metropolis. *Climatology Research*, 11(4), 121–136. (in Persian)
- Kermani, Mehdi, Hosseini, Mohammad Reza, and Karimi, Ali. (2020). Effects of temperature inversion phenomenon on the concentration of gaseous pollutants in Isfahan metropolis. *Climatological Research*, 11(4), 121-136.
- Kim, H., Lee, J., & Park, S. (2024). Industrial impacts on urban air quality in Seoul using Sentinel-5P and ground monitoring data. *Science of the Total Environment*, 919, 170857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.170857>.
- Khorshiddoust, Alimohammad, Valizadeh Kamran, Khalil, & Ghasemi Begtash, Ali. (2017). Spatio-temporal analysis of hazardous air pollutants in Tabriz city with emphasis on PM10. *Natural Geography Research*, 49(4), 585–602. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.221265.1006970>
- Sadegh Beigi, Akram, Muroj, Kamran and Delavar, Mohammad Amir. (2020). Replacing the quantitative and spatial agreement and disagreement components instead of the Kappa index for assessing the accuracy of different thematic maps. *Quarterly Scientific and Research Journal of Geographic Information "Sepehr"*, 29(116), 77-87. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.242861>
- Statistical Center of Iran (2016). *Population and Housing Census 2016*. Tehran: Statistical Center of Iran.
- Lelli-Weldo, F., Costa, A., & Romano, D. (2015). Health impacts of urban air pollution: A global perspective. *Environmental Health Perspectives*, 123(1), 27–35. <https://doi.org/10.1289/ehp-1408792>
- Li, J. (2018). The economic cost of air pollution in China and the United States. *Journal of Environmental Economics*, 45(1), 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jeeco.2018.03.004>
- Li, J., & Wang, Y. (2011). Satellite-based monitoring of air pollutants in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3079–3090. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.005>
- Li, X., Zhang, Y., Wu, J., & Wang, Y. (2021). Spatiotemporal variations and socioeconomic drivers of SO₂ pollution in urban China. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123936>
- Lo, D. (2021). Integrating ground-based and satellite data for urban air quality assessment. *Remote Sensing*, 13(9), 1764. <https://doi.org/10.3390/rs13091764>
- Mamkhedri, Ahmad. (2020). *Urbanization and environmental challenges in developing countries*. Tehran: Jihad Daneshgahi Publications.
- Mam-Khezri, A. (2020). *Urbanization and environmental challenges in developing countries*. Tehran: Jihad Daneshgahi Press. (in Persian)
- Taghvaei, H., Mohammadi, Z., & Sadeghi, R. (2018). The role of polluting industries in changes in the air quality of Isfahan metropolis (with emphasis on sulfur dioxide). *Journal of Geography and Environmental Planning*, 29(3), 101–118. (in Persian)
- Taghvaei, Hassan, Mohammadi, Zahra, and Sadeghi, Reza. (2018). The role of polluting industries in changes in air quality of Isfahan metropolis (with emphasis on sulfur dioxide). *Journal of Geography and Environmental Planning*, 29(3), 101-118.
- Wang, Y., Gao, W., Wang, S., Song, T., Gong, Z., Ji, D., ... & Zhang, R. (2020). Contrasting trends of PM_{2.5} and surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017. *National Science Review*, 7(8), 1331–1339. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa032>

- World Health Organization. (2016). *Global report on air quality and health*. Geneva: WHO. (in Persian)
- World Health Organization. (2016). *World Air Quality and Health Report*. Geneva: World Health Organization.
- Zhang, H., Li, X., & Wang, Y. (2023). Spatiotemporal distribution of NO₂ and SO₂ in Chinese cities using Sentinel-5P and machine learning algorithms. *Atmospheric Environment*, 288, 119365. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119365>
- Ziaeian Firouzabadi, Parviz and Hassani Moghadam, Hassan. (2018). *Evaluating the effect of the Majority filter kernel size on increasing the classification accuracy of remote sensing images*. *Geography and Human Relations*, 1(2), 806-817. https://www.gahr.ir/article_77112.html?lang=fa
- Zheng, H., Kong, S., Yan, Y., Wu, F., Cheng, Y., Zheng, S., ... & Qi, S. (2019). Significant changes in total gaseous mercury and its wet deposition in China during 2007–2016: Insights from a long-term monitoring network. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(10), 6311–6330. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6311-2019>
- Zhou, Y., Wang, T., Li, D., Huang, X., & Fu, H. (2022). Long-term variations of SO₂ pollution and its driving factors in Chinese cities. *Atmospheric Environment*, 270, 118896. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118896>