

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol. ---, Issue ---, ---

Spatial Analysis of Air Quality and Environmental Pollutants in Tehran Metropolis

Abazar Esmaeili Mahmoudabadi¹, Aliakbar Shamsipour^{2*} , Hosein Mohammadi³

1. PhD student at climatology, Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Corresponding Author, Associate Professor, Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: shamsipr@ut.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8606-4571>-----

3. Full Professor, Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 

Revised: 

Accepted: 

Published: 

Keywords:

Air pollution, Urban pollutants, Spatial analysis, Air Quality Index (AQI), Tehran metropolis.

ABSTRACT

Tehran's air quality is poor due to pollutant emissions from vehicles, industries, and urban activities. In this study, data from 20 air quality monitoring stations over ten years (2014–2023) were analyzed, together with spatial layers including land use, population density, deteriorated urban fabric, and the main road network. The annual averages of five major pollutants (PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂, and SO₂) were calculated, and their spatial patterns were mapped using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method in a GIS environment. The results revealed that PM_{2.5} was the dominant factor contributing to air quality deterioration. In southern and southwestern stations, such as District 19 and Shadabad, annual averages exceeded 100 µg/m³, which is far above the World Health Organization (WHO) standards. On average, more than 65% of the days each year fell into the “unhealthy for sensitive groups” category or worse across different stations. The highest annual Air Quality Index (AQI) value was recorded at the Sharif station (101.3), while the lowest was observed at the Aghdasieh station (70.9). The findings indicate that the central and industrial areas of Tehran face the greatest pollution risk, with population density, heavy traffic, and deteriorated urban fabric playing decisive roles in shaping this pattern. Accordingly, effective pollution reduction requires the integrated management of mobile sources, industrial activities, and improvements in the city's physical structure.

How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (--), ----.



© The Author/Authors

DOI: 000000000000000000

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Air pollution is one of the most significant environmental hazards in megacities, seriously threatening human health, urban ecological quality, and climate change. Tehran, as one of the most polluted capitals in the world, faces serious challenges stemming from high population density and heavy transportation. Accurate monitoring and assessment of air pollution are essential for identifying vulnerable areas and ensuring effective management. The main objective of this study is to identify and map the spatial distribution of major air pollutants across different districts of Tehran and to examine their relationship with population density, land use, deteriorated urban fabric, and main road networks. The key research questions are: What is the spatial distribution pattern of major air pollutants in different districts of Tehran? What is the relationship between population density, land use, and deteriorated urban fabric with air pollution levels? And to what extent do major transportation routes contribute to the severity of air pollution?

DATA AND METHODOLOGY

In this study, data on five major air pollutants (CO, NO_x, SO₂, PM_{2.5}, and PM₁₀) were collected from 20 air quality monitoring stations across Tehran for the period 2014–2023, along with spatial layers including land use, population density, deteriorated urban fabric, and primary road networks obtained from the Tehran Municipality. Hourly and daily measurements were aggregated into annual averages and classified according to the Air Quality Index (AQI). Spatial analysis and pollutant mapping were performed using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method in a GIS environment. A base map of Tehran's boundaries, its 22 municipal districts, and the monitoring station locations was prepared to support the spatial analysis.

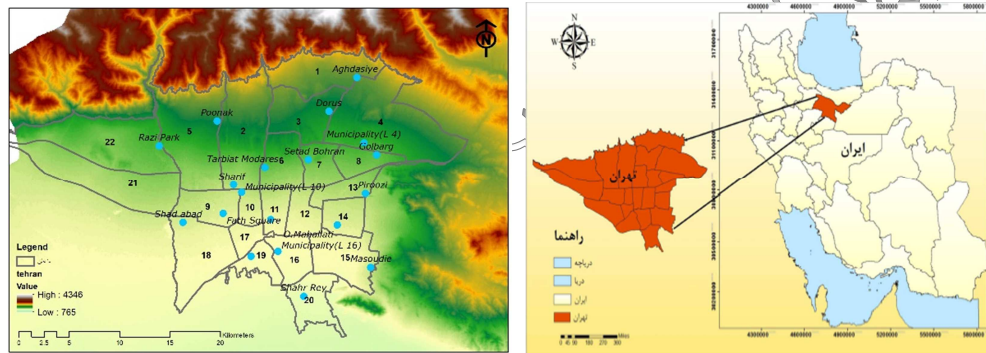


Figure 1: Location of Tehran Province and stations in the study area

RESULTS AND DISCUSSION

The results show that Tehran's air quality patterns are shaped by the combined effects of human and natural factors, producing a complex spatial structure. Pollutant concentrations were highest in central and industrial districts, particularly in areas with high population density, deteriorated urban fabric, and proximity to major traffic corridors. PM_{2.5} was the dominant contributor to poor air quality, often exceeding WHO standards, while PM₁₀ displayed a wider distribution influenced by urban activity sources. CO and NO₂ concentrations were strongly associated with main transport routes, reaffirming traffic as their major source, whereas SO₂ was more concentrated in industrial and energy-related areas. Overall, the Air Quality Index (AQI) frequently indicated unhealthy conditions for sensitive groups, and occasionally for the general population. Spatial interpolation maps confirmed that urban form, land use, and traffic intensity are decisive in shaping pollutant distribution, underscoring the need for integrated management of urban structure, transportation, and industrial emissions.

CONCLUSION

The findings demonstrate that the spatial and temporal distribution of air quality across Tehran is highly complex, reflecting the concurrent influence of anthropogenic and natural drivers. Elevated pollutant concentrations were consistently observed in densely populated districts, in proximity to major traffic corridors, and within deteriorated urban fabric, highlighting the strong interplay between urban morphology and pollution intensity. PM_{2.5} emerged as the dominant pollutant, frequently exceeding WHO thresholds and showing strong spatial associations with major roads and impervious surfaces, thereby underscoring the decisive role of transportation and urban activities. PM₁₀ exhibited a broader distribution, shaped by both anthropogenic emissions and natural dust events, while CO and NO₂ concentrations were tightly linked to transport corridors, reaffirming traffic emissions as their primary source. SO₂ hotspots were concentrated in industrial zones and around fuel and energy facilities, emphasizing the influence of fossil-fuel combustion.

AQI analyses revealed frequent episodes of “unhealthy for sensitive groups” and, at times, “unhealthy for the general population,” with central and industrial areas bearing the greatest burden. Compared to previous short-term or single-pollutant studies, the main strength of this research lies in its decade-long perspective (2014–2023) and its simultaneous assessment of multiple pollutants at the city scale, enabling more precise hotspot detection and pollutant overlap analysis. Nonetheless, methodological limitations should be acknowledged: AQI values were derived from annual averages, potentially obscuring short-term variations, and meteorological parameters such as wind speed, temperature, and atmospheric stability were not included, despite their critical role in pollutant dispersion.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the National Iranian Science Foundation (INSF).

REFERENCES

References (in Persian)

- Afarideh, F., Ramasht, M. H., & Mortyn, P. G. [2022]. Temporal-spatial analysis of the air quality index in Tehran during the period of 10 years. *Physical Geography Research*, 53[4], 447–463. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.324223.1007620> [In Persian]
- Ansari, M., Ahmadi, M., & Goudarzi, G. [2022]. Spatial analysis of air quality in Tehran with emphasis on particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11[32], 109–128. <https://doi.org/10.22111/jneh.2021.37338.1759> [In Persian]
- Bazgeer, S., Ghadiri Masoum, M., Shamsipour, A., & Sayedi Serenjiene, S. [2015]. Relationship analysis of air pollution of Tehran with traffic and atmospheric conditions for hazards mitigation. *Environmental Management Hazards*, 2[1], 35–49. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.53920> [In Persian]
- Esmaili Mahmoudabadi, A., Shamsipour, A., & Mohammadi, H. [2025]. Identification and analysis of the temporal-spatial trend of heat waves in Tehran. *Environmental Management Hazards*, 12[1], 65–80. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2025.389996.865> [In Persian]
- Ganji, M., & Abravesh, A. [2018]. An optimal scale for the comparison of air pollution in East and West Tehran. *Advanced Environmental Sciences*, 16[2], 101–110. [In Persian]
- Issalou, A. A., Shahmoradi, B., Bahrami, S., & Aghamiri, M. S. [2011]. Spatial vulnerability and air pollution crisis in Tehran metropolis. *Third National Conference on Urban Development*, Sanandaj. <https://civilica.com/doc/130030> [In Persian]

- Kahrari, P., Khaledi, S., Keikhosravi, G., & Alavi, S. J. [2025]. Investigating the effects of criteria air pollutants and meteorological parameters on the change of black carbon concentration in Tehran and Tabriz. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14[43], 35–58. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47935.2028> [In Persian]
- Karimimanes, E., & Pahlevan, E. [2019]. Study of the trend of air pollution in Tehran during the years 2007 to 2018 and its relationship with sustainable development. *Second National Conference on Social Capital and Sustainable Development*, Qom. <https://civilica.com/doc/974475> [In Persian]
- KorkiNezhad, M., Shamsipour, A., & Habibi, K. [2023]. Planning recommendations with urban climate maps: The case study of Tehran city. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 11[3], 1–20. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2023.351363.1759> [In Persian]
- Mahdian Mahforouzi, M., Shamsipour, A. A., & Azizi, G. [2015]. The effects of green space expansion on the patterns of urban heat island (Case study: Velayat Urban Park). *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 3[1], 85–99. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2015.54441> [In Persian]
- Ranjbar, M., & Mahak, B. [2019]. Temporal and spatial changes of air pollutants using GIS (Case study: Northern half of Tehran). *Geography*, 17[60], 72–85. [In Persian]
- Shamsipour, A., Ashrafi, E., Alikhah Asl, M., & Ashrafi, K. [2016]. Modeling the distribution of suspended particles in the south of Tehran by the model of AERMOD (A case study of Tehran cement factory). *Journal of Environmental Studies*, 41[4], 799–814. <https://doi.org/10.22059/jes.2016.57134> [In Persian]
- Soleimani, F., & Malekhoseini, A. [2021]. The zoning of air quality in 22 districts of Tehran using GIS and geostatistical methods. *Quarterly Journal of Environmental Based Territorial Planning*, 52, 19–44. <https://doi.org/20.1001.1.2676783.1400.14.52.2.6> [In Persian]
- Zayyari, K., Vahedian Beiky, L., & Parnoon, Z. [2012]. The study of environmental crisis and local distribution of green space in Tehran city. *Journal of Urban-Regional Studies and Research*, 4[14], 101–114. [In Persian]

References (in English)

- Bitukova, V. and Kasimov, N. (2012). Atmospheric pollution of Russia's cities: Assessment of emissions and immissions based on statistical data, *The Journal of Geofizika*, Vol. 29, PP. 53– 67.
- E. V. Schneidmesser, P.S. Monks, J.D. Allan, L. Bruhwiler, P. Forster, D. Fowler, A. Lauer, W.T. Morgan, P. Paasonen, M. Righi, K. Sindelarova, M.A. Sutton, *Chem. Rev.* 115(10), 3856–3897 (2015).
- G.P. Bala, R.M. Rajnoveanu, E. Tudorache, R. Motisan, C. Oancea, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 19615–19628 (2021).
- Garg, S., Thakur, D., Singh, R., Rajor, A., & Dhir, A. (2019). Seasonal and spatial variation of particulate aerosols and carbonaceous species in PM_{2.5} in the periphery of Chandigarh, India. *MAPAN*, 34(2), 217-224.
- Heidarinejad, Z., Kavosi, A., Mousapour, H., Daryabor, M. R., Radfard, M., & Abdolshahi, A. (2018). Data on the evaluation of AQI for different seasons in Kerman, Iran, 2015. *Data in brief*, 20, 1917.
- Hossein, M.A., Hoque, A. (2018) Variation of Ambient Air Quality Scenario in Chittagong City: A Case Study of Air Pollution, *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, 3(1): 10-16. DOI: 10.11648/j.jccee.20180301.13
- K. Bodor, R. Szep, Z. Bodor, *Toxicol. Rep.* 9, 556–562 (2022).
- Kumar P, Hama S, Nogueira T, Abbass RA, Brand VS, Andrade MF, Asfaw A, Aziz KH, Cao SJ, El-Gendy A, Islam S, Jeba F, Khare M, Mamuya SH, Martinez J, Meng MR, Morawska L, Muula AS, Shiva Nagendra SM, Ngowi AV, Omer K, Olaya Y, Osano P, Salam A. In-car particulate matter exposure across ten global cities. *Sci Total Environ.* 2021 Jan 1;750:141395. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141395.
- Monoson A, Schott E, Ard K, Kilburg-Basnyat B, Tighe RM, Pannu S, Gowdy KM. 2023. Air Pollution and respiratory infections: the past, present, and future. *Toxicol Sci.* 192(1):3–14. doi:10.1093/toxsci/kfad003.
- Nasir, R., Meng, H., Ahmad, S. R., Waseem, L. A., Naqvi, S. A. A., Shahid, M., ... & Tariq, A. (2024). Towards sustainable transportation: A case study analysis of climate-responsive strategies in a developing nation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104117. ourworldindata.org(2017).
- Qi G, Che J, Wang Z. (2023). Differential effects of urbanization on air pollution: Evidence from six Air pollutants in mainland China. *Ecol Indic.* 146(2):109924. doi:10.1016/j.ecolind.2023.109924.
- Saxena, V. (2025). Water quality, air pollution, and climate change: investigating the environmental impacts of industrialization and urbanization. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(2), 73.
- Shad, Roozbeh, Ashoori, H. and Afshari, N. (2007). Evaluation Of Optimum Methods For Predicting Pollution Concentration In GIS Environment, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng. K.N.Toosi University of Technology.
- Verma, MK.; Patel, A.; Sahariah, BP. and Choudhari, JK. (2016). Computation of Air Quality Index for Major Cities of Chhattisgarh State. *Environmental Claims Journal*, 28(3): 195-205.
- Waheed, F., Ehsan, N., Nasir, R., Khan, W. A., Khokhar, M. F., Shahzad, L., ... & Uz Zaman, Q. (2025). Geo-spatial distribution of air pollutants in urban areas and its potential health risk analysis solutions. *Urban Climate*, 61, 102380.
- Wang Y, Yao L, Xu Y, Sun S, Li T. 2021. Potential heterogeneity in the relationship between Urbanization and air pollution from the perspective of urban agglomeration. *J Clean Prod.* 298:126822. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126822.
- Wang, M., Kim, R. Y., Kohonen-Corish, M. R., Chen, H., Donovan, C., & Oliver, B. G. (2025). Particulate matter air pollution as a cause of lung cancer: epidemiological and experimental evidence. *British Journal of Cancer*, 1-11.
- Wen, X., Zhang, P., & Liu, D. (2018). Spatiotemporal variations and influencing factors analysis of PM_{2.5} concentrations in Jilin Province, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 28(5), 810-822. <https://doi.org/10.1007/s11769-018-0992-0>.
- WHO, Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data, <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data> (2022).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.


WHO. (2021), Pesticide residues in food - 2019: toxicological evaluations (Extra), Extra Joint Meeting of the FAO Panel of Experts on Pesticide Residues in Food and the Environment and the WHO Core Assessment Group on Pesticide Residues, Gatineau, Canada, 7–17 May 2019.

Y. Gu, D.K. Henze, M.O. Nawaz, H. Cao, U.J. Wagner, *GeoHealth* 7, e2022GH000767 (2023).

Zareba, M., Weglinska, E., & Danek, T. (2024). Air pollution seasons in urban moderate climate areas through big data analytics. *Scientific Reports*, 14(1), 3058.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

تحلیل فضایی کیفیت هوا و آلاینده های محیطی هوای کلانشهر تهران

اباذر اسمعیلی محمودآبادی^۱، علی اکبر شمسپور^{۲*} , حسین محمدی^۳

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: shamsipr@ut.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8606-4571>

۳. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: --/--/-- تاریخ انتشار: --/--/--</p> <p>واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، آلاینده های شهری، تحلیل فضایی، شاخص کیفیت هوا، کلانشهر تهران.</p>	<p>کیفیت هوای کلانشهر تهران به واسطه‌ی انتشار آلاینده‌ها از وسایل نقلیه، صنایع و فعالیت‌های شهری در وضعیت نامطلوبی قرار دارد. در این پژوهش، داده‌های ۲۰ ایستگاه سنجش آلودگی هوا طی یک دوره ده‌ساله (۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲) همراه با لایه‌های مکانی شامل کاربری اراضی، تراکم جمعیت، بافت فرسوده و شبکه راه‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفت. میانگین سالانه پنج آلاینده اصلی (CO، PM₁₀، PM_{2.5})، NO₂ و SO₂) محاسبه و الگوهای مکانی آن‌ها با روش درونیابی وزنی عکس فاصله (IDW) در محیط GIS ترسیم شد. نتایج نشان داد که آلاینده‌ی PM_{2.5} بیشترین سهم در افت کیفیت هوا را داشته و در ایستگاه‌های مناطق جنوبی و جنوب‌غربی مانند منطقه ۱۹ و شادآباد، میانگین‌های سالانه بالاتر از ۱۰۰ میکروگرم بر مترمکعب ثبت شده است که بسیار بیش از حدود استاندارد سازمان جهانی بهداشت است. به‌طور میانگین، بیش از ۶۵ درصد روزهای سال در ایستگاه‌های مختلف در شرایط «ناسالم» برای گروه‌های حساس» یا بدتر قرار داشته‌اند. بالاترین مقدار شاخص کیفیت هوا در ایستگاه شریف (میانگین سالانه ۱۰۱٫۳) و پایین‌ترین مقدار در ایستگاه اقدسیه (۷۰٫۹) مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که نواحی مرکزی و صنعتی تهران بیشترین ریسک آلودگی را دارند و ترکیب تراکم جمعیت، ترافیک سنگین و بافت‌های فرسوده نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری این الگو داشته است. بر این اساس، کاهش آلودگی نیازمند مدیریت همزمان منابع متحرک، صنایع و بهبود ساختار کالبدی شهر است.</p>

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ و نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، -- (--)، ----

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

مخاطرات محیطی (از جمله آلودگی) از مهم ترین مسائل کلانشهرهاست (کیخسروی و همکاران، ۱۴۰۱؛ بازگیر و همکاران، ۱۳۹۴) که جزء مسائل جدایی ناپذیر زندگی انسان می باشد (شمسی پور و همکاران، ۱۴۰۴). طبق گزارش های سازمان بهداشت جهانی، از هر ۱۰ نفر ۹ نفر هوای آلوده را تنفس می کنند (WHO, 2021) و برآوردها نشان می دهد که سالانه ۹ میلیون نفر در اثر آلودگی های محیطی و خانگی جان خود را از دست می دهند (Saxena, 2025). آلودگی هوا یک مسئله مهم زیست محیطی با نگرانی جهانی است که به دهه ۱۹۷۰ برمی گردد (Crippa et al, 2016) و امروزه فعالیت های انسانی مسئول افزایش سطح آلاینده های هوا، چه ذرات با اندازه های مختلف (قطر PM_x کوچکتر از x میکرومتر، که در آن $x = 10, 5, 2, 1, 1, 0$) و چه گونه های گازی (مانند $NO, NO_2, SO_2, CO, VOCs$) است. در کنار این آلاینده ها، O_3 نیز به دلیل اثرات متعدد آن بر آب و هوا، محیط زیست و سلامت انسان مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Chiritescu et al, 2024). بیش از ۶۰۰۰ شهر در ۱۱۷ کشور اکنون کیفیت هوا را رصد می کنند و تلاش های زیادی برای بهبود کیفیت هوا و کاهش تغییر اقلیم انجام شده است (WHO, 2022). با وجود پیشرفت های حاصل شده، مردم در سراسر جهان هنوز هوای ناسالم تنفس می کنند و این امر عمدتاً به دلیل ذرات معلق PM و اکسیدهای نیتروژن است (Zareba et al, 2024). سطح آلودگی هوا در سراسر جهان علیرغم مقررات دولتی همچنان در حال افزایش است (Monoson et al, 2023). بی توجهی به ابعاد محیطی و اکولوژیک شهرها سبب کاهش کیفیت محیطی شهرها شده که از مهم ترین آن ها افزایش بار گرمایی، کاهش ظرفیت جابه جایی هوا و آلودگی هوا می باشد (شمسی پور و همکاران، ۱۴۰۲). تراکم بالای جمعیت و گسترش سریع شرکت های صنعتی منجر به کاهش شدید کیفیت اکولوژیکی و زیست محیطی شده است (Wang, 2021; Qi et al., 2023). انتشار گسترده گازهای خروجی از اگزوز خودروها و گازهای زائد صنعتی، مشکلات جدی آلودگی هوا را ایجاد کرده است (Kumar., 2021). علاوه بر این، سایر آلاینده ها مانند مونوکسید کربن، اکسیدهای گوگرد، ترکیبات آلی فرار مختلف و غیره به ویژه در مناطق صنعتی و شهری که اثرات بهداشتی تنفسی تشدید می شود، در تخریب هوا نقش دارند (Bala., 2021: 19619; Nasir et al., 2024; Garg et al., 2019). افزایش سطح آلاینده های هوا نه تنها بر سلامت انسان تأثیر می گذارد، بلکه با تغییر ترکیب اتمسفر، کیفیت هوا و میزان دید را مختل می کند و منجر به تغییر اقلیم بیشتر می شود، زیرا کیفیت هوا و اقلیم از طرق مختلف به شدت به هم مرتبط هستند (Schneidmesser et al, 2015; Wang et al, 2025). بنابراین، پایش سیستماتیک آلاینده های هوا و بررسی های مداوم از اهمیت اساسی برخوردار است.

در این راستا، پژوهشی در پاکستان نشان داد که پایش فصلی کیفیت هوای ۹ منطقه در شمال شرق این کشور غلظت آلاینده های به ویژه ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} بسیار بالاتر از استانداردهای ایالتی بوده و بیشترین خطر سلامت را ایجاد می کنند (waheed et al, 2025). مطالعه گو و همکاران (۲۰۲۳) نشان می دهد که کشورهای اروپای شرقی، برخلاف سطح پایین تر انتشار گازهای گلخانه ای نسبت به کشورهای اروپای مرکزی و غربی، اثرات مضر بیشتری از آلودگی هوا بر سلامت متحمل شده اند (Gu et al, 2023). نتایج بودور و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که بخش حمل و نقل ۷۵٪ از کل انتشار گازهای گلخانه ای در جاکارتا را تشکیل می دهد (Bodor et al, 2022). با افزایش نرخ رشد آلودگی هوا در این شهر، شاخص کیفیت هوا افزایش یافته و آلاینده مسئول آلودگی هوا در این شهر ذرات معلق کمتر از ۲.۵ میکرون گزارش شد (Hossein & Hoque, 2018; Wen et al, 2018). ورما و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که مقادیر CO, SO_2, O_3 و NO_2 و هیدروکربن ها در شهرهای بزرگ ایالت چاتیسگره کشور هند به دلیل

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

وجود تعداد زیادی از وسایل نقلیه همراه با افزایش جمعیت بسیار بالا گزارش شده است (Verma et al, 2016). بیتی یو کوا و قاسموف (۲۰۱۲) در پژوهشی نشان دادند که در روسیه قریب به ۶۰ میلیون نفر در آلودگی هوا زندگی می‌کنند. مطالعات زیادی در تهران و سایر شهرهای ایران نیز انجام گرفته است. به عنوان مثال نتایج رامشت و همکاران (۱۴۰۰)، نشان داد که در طی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ در ماه‌های آذر و دی بیشترین وسعت شهر تهران به ترتیب در پهنه‌های نسبتاً سالم (۵۴ درصد)، ناسالم برای گروه‌های حساس (۲۳ درصد)، سالم (۲۰ درصد) و پاک (۱۵ درصد) و ناسالم (۵ درصد) قرار دارد. در مطالعه‌ای دیگر که توسط پهلوان و کریمی منش (۱۳۹۸) انجام یافته، مشخص شد که در بازه زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷ ذرات آلاینده $PM_{2.5}$ و PM_{10} نسبت میانگین همین جهانی در همین دوره دو برابر استاندارد‌های ژاپن و آمریکا بوده است (پهلوان و کریمی منش، ۱۳۹۸).

در پژوهشی بیشترین پهنه آلودگی هوای تهران طی سال‌های مزبور مناطق مرکزی و جنوب غربی شهر تهران عنوان شده است (ملک حسینی و سلیمانی، ۱۳۹۷؛ عیسی لو و همکاران، ۱۳۹۰). پژوهش دیگری نشان داد که اگرچه تفاوت معنی‌داری بین آلودگی هوای شرق و غرب تهران مشاهده نمی‌شود، ولی با احتمال ۵۱٪، هوای شرق تهران آلوده‌تر از غرب آن است (گنجی و آبروش، ۱۳۹۷). رنجبر و باهک (۱۳۹۷)، نیز به بررسی تغییرات زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا در نیمه شمالی شهر تهران پرداختند. بر اساس مطالعه ایشان، غلظت سه آلاینده مونواکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد در زمستان به حداکثر می‌رسد، اما غلظت ذرات معلق و ازن تروپوسفری در تابستان بیشتر است. خیدرنژاد و همکاران (۱۹۱۷: ۲۰۱۸)، شاخص کیفیت هوای شهر کرمان را در فصول مختلف سال ۲۰۱۵ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین تعداد روزهای ناسالم در فصل زمستان مربوط به ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون و ازن می‌باشد و مونواکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید سولفور و ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرون به عنوان شاخص کیفیت هوا در فصل بهار می‌باشد. شمسی پور و همکاران (۱۳۹۴)، الگوی پراکنش ذرات معلق منطقه جنوب تهران (کارخانه سیمان تهران) را با مدل AREMOD مدل‌سازی کردند. نتایج مدل نشان داد که بیشترین آثار ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون در فاصله ۱ تا ۵ کیلومتری از کانون انتشار رخ می‌دهد. در تابستان نیز میزان ذرات ورودی به تهران از منشا کارخانه افزایش بیشتری دارد.

امروزه آلودگی هوای شهر تهران، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی این شهر محسوب می‌گردد. افزایش روزافزون جمعیت شهر تهران، عدم برنامه‌ریزی مناسب جهت کنترل رشد ناپایدار و عدم کنترل تولید و توزیع خودرو سبب شده است تا تهران به جولان‌گاه ترافیک تبدیل شود.

بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2022)، تهران در میان آلوده‌ترین پایتخت‌های جهان قرار داشته و این شهر توان گنجایش ناوگان خودرو را ندارد و ترافیک صبح‌گاهی و شام‌گاهی یکی از معضلات عمومی این جامعه تلقی شده و زمان بسیار زیادی از نیروی کاری جامعه در این بین تلف شده و از بین می‌رود که خسارت و هزینه‌های آن، سالانه میلیاردها تومان است که بر اثر مدیریت نادرست بر مجموعه شهری تحمیل می‌شود. برای شناخت و مدیریت بهتر، لازم است مناطق مختلف کلانشهر تهران از نظر میزان آلودگی هوا مشخص و مناطق آسیب‌پذیر مورد بررسی قرار گیرد. هدف این پژوهش شناسایی و پهنه‌بندی آلاینده‌های مهم جوی در مناطق مختلف شهر تهران و ارتباط آن با تراکم جمعیت، کاربری‌های اراضی، بافت‌های فرسوده و شریان‌های اصلی می‌باشد.

نوآوری اصلی این پژوهش در چند محور اساسی قابل تبیین است. نخست آن‌که برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که غالباً به دوره‌های زمانی محدود یا یک تا دو آلاینده خاص متمرکز بوده‌اند (برای نمونه، رنجبر و باهک، ۱۳۹۷؛

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بازگیر و همکاران، ۱۳۹۴)، در این تحقیق بازه‌های ده‌ساله (۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲) مورد بررسی قرار گرفته و پنج آلاینده اصلی هوا شامل $PM_{2.5}$ ، PM_{10} ، CO، NO_2 و SO_2 به‌طور همزمان تحلیل شده‌اند. دوم، این پژوهش با بهره‌گیری از ترکیب داده‌های ایستگاهی و لایه‌های مکانی نظیر تراکم جمعیت، بافت فرسوده، کاربری اراضی و شبکه شریانی اصلی، رویکردی یکپارچه و فضا‌محور ارائه می‌دهد که در ادبیات موجود کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سوم، مقایسه تفصیلی وضعیت آلودگی هوا در ۲۲ منطقه شهرداری تهران ارزش افزوده‌ای قابل توجه برای سیاست‌گذاری شهری فراهم می‌کند؛ امری که در بخش عمده‌ای از تحقیقات گذشته مغفول مانده است. بر این اساس، یافته‌های این تحقیق نه تنها تصویری دقیق‌تر و جامع‌تر از وضعیت آلودگی هوای تهران ترسیم می‌کند، بلکه می‌تواند مبنای طراحی سیاست‌های هدفمند و موضعی در سطح مناطق شهری قرار گیرد.

داده‌ها

کلانشهر تهران به عنوان مرکز سیاسی، اقتصادی و ارتباطی ایران، اضافه بر اینکه پرجمعیت‌ترین شهر کشور است، دارای الگوی شهرسازی نسبتاً نامنظم می‌باشد (شمسی پور و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۶). کلانشهر تهران با وسعتی حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع بین ۵۱ درجه و ۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این شهر از شمال به سلسله جبال البرز، از شرق به لواسانات، از غرب به کرج و از جنوب به ورامین محدود شده است (بازگیر و همکاران، ۱۳۹۸؛ زبیری و همکاران، ۱۳۹۱). در این پژوهش، از دو نوع داده‌ی ایستگاهی (آلاینده‌های مهم جوی) و داده‌های فناوری اطلاعات و شهرداری تهران (لایه‌های مکانی) استفاده شده است. داده‌های مربوط به پنج آلاینده‌ی اصلی هوا شامل مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، ذرات معلق کوچکتر از ۲٫۵ میکرون ($PM_{2.5}$) و ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون (PM_{10})، از ۲۰ ایستگاه سنجش کیفیت هوای شهر تهران طی بازه‌ی زمانی ده‌ساله (۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲) از طریق پایگاه داده‌ی شرکت کنترل کیفیت هوای تهران^۱ و لایه‌های مکانی شامل کاربری اراضی، پراکنش جمعیت، بافت فرسوده و راه‌های شریانی اصلی از شهرداری تهران دریافت گردید. داده‌های ایستگاهی در قالب ساعتی و روزانه گردآوری شده و سپس تبدیل به میانگین‌های سالانه برای هر ایستگاه و برای هر آلاینده تبدیل شدند تا امکان تحلیل‌های آماری و مکانی فراهم گردد.

در این پژوهش شاخص کیفیت هوا (AQI) مطابق دستورالعمل سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) محاسبه شد. بدین منظور، داده‌های ساعتی هر آلاینده ابتدا کنترل کیفیت شده و مقادیر خارج از محدوده حذف شدند. سپس برای هر آلاینده شاخص فرعی مطابق بازه زمانی مناسب ($PM_{2.5}$ و PM_{10} بر اساس ۲۴ ساعته، CO بر اساس میانگین متحرک ۸ ساعته، NO_2 و SO_2 بر اساس یک‌ساعته) محاسبه گردید. مقادیر روزانه AQI برای هر ایستگاه محاسبه و در نهایت تعداد روزهای هر وضعیت کیفی (پاک، سالم، ناسالم و...) به تفکیک ماه، فصل و سال استخراج شد. داده‌های ناقص (با پوشش کمتر از ۷۵ درصد ساعات روزانه) از محاسبات حذف شدند.

مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده شامل نام، مختصات جغرافیایی، سال نصب، درصد پوشش داده سالانه و دوره‌های کمبود داده در جدول ۱ ارائه شده است. داده‌های خام توسط شرکت کنترل کیفیت هوای تهران فراهم شد و تحت فرآیندهای QA/QC شامل حذف داده‌های غیرمنطقی، بررسی کالیبراسیون دستگاه‌ها و کنترل نوسانات

^۱. <https://air.tehran.ir>

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

غیرعادی قرار گرفت. داده‌ها در واحد استاندارد ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ برای $\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10}) و ppm (برای گازها) دریافت شدند و به واحدهای استاندارد AQI تبدیل شدند.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

ایستگاه	تاریخ تأسیس	منطقه	lat	lon	CO	NO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	AQI
اقدسیه	1379/01/01	1	35,46	51,2	29.20	75.93	70.94	51.81	12.27	81.68
دانشگاه شریف	1391/03/01	2	35,42	51,14	37.76	67.21	105.58	66.76	17.78	101.33
دروس	1389/01/01	3	35,46	51,27	46.72	61.13	102.02	27.31	23.18	90.02
شهرداری منطقه ۴	1388/01/01	4	35,43	51,31	44.29	89.51	80.97	43.58	16.27	75.70
پونک	1386/04/01	5	35,41	51,23	26.56	74.15	66.22	54.11	12.24	75.44
تربیت مدرس	1391/01/01	6	35,43	51,22	35.43	60.18	90.85	64.06	14.88	95.26
ستاد بحران	1390/01/01	7	35,43	51,32	36.87	73.25	85.93	56.44	13.71	91.70
گلبرگ	1387/01/01	8	35,44	51,29	25.13	71.24	70.19	54.33	12.83	80.19
میدان فتح	1389/01/01	9	35,4	51,2	39.04	72.58	103.25	73.19	20.58	85.20
شهرداری منطقه ۱۰	1388/07/01	10	35,41	51,21	53.94	77.38	88.08	47.55	23.35	82.53
شهرداری منطقه ۱۱	1388/01/01	11	35,41	51,23	38.28	81.34	95.63	47.76	19.64	94.52
پیروزی	1390/01/01	13	35,41	51,28	28.14	62.59	94.57	66.32	16.51	93.24
بزرگراه محلاتی	1389/01/01	14	35,66	51,44	25.66	61.06	96.00	63.67	15.37	69.63
مسعودیه	1392/08/01	15	35,37	51,29	20.39	69.40	73.51	56.79	13.86	75.92
شهرداری منطقه ۱۶	1388/01/01	16	35,37	51,26	51.76	82.38	88.90	52.80	23.63	59.46
شادآباد	1390/01/01	18	35,4	51,19	25.33	59.33	99.38	74.38	21.33	99.84
شهرداری منطقه ۱۹	1388/01/01	19	35,37	51,21	34.49	61.88	112.54	74.95	22.05	86.88
شهری	1384/01/01	20	35,35	51,26	34.11	73.59	93.73	69.71	18.29	93.09
پارک رازی	1392/12/01	22	35,4	51,23	41.27	69.88	95.04	10.11	25.37	93.71

بر اساس شاخص کیفیت هوا، کیفیت بهداشتی هوا به گروه‌های پاک، سالم، ناسالم برای گروه‌های حساس، ناسالم، بسیار ناسالم و خطرناک طبقه‌بندی شده است و هر گروه با رنگ خاص که بیانگر سطح متفاوت از تاثیر آلودگی هوا بر سلامتی است، نشان داده شده است (جدول ۲).

جدول ۲: نقاط شکست (بر اساس الگوی EPA) برای محاسبه AQI

PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24 ساعته	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24 ساعته	CO (ppm) 8 ساعته	SO ₂ (ppm) 24 ساعته	NO ₂ (ppm) 1 ساعته	AQI	طبقه‌بندی کیفیت هوا
0 - 12	0 - 54	0 - 4.4	0 - 35	0 - 53	0 - 50	پاک
12.1 - 35.4	55 - 154	4.5 - 9.4	36 - 75	54 - 100	51 - 100	سالم
35.5 - 55.4	155 - 254	9.5 - 12.4	76 - 185	101 - 150	101 - 150	ناسالم برای گروه‌های حساس
55.5 - 150.4	255 - 354	12.5 - 15.4	186 - 304	151 - 200	151 - 200	ناسالم
150.5 - 250.4	355 - 424	15.5 - 30.4	305 - 604	201 - 300	201 - 300	خیلی ناسالم
≥ 250.5	≥ 425	≥ 30.5	≥ 605	≥ 301	301 - 500	خطرناک

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

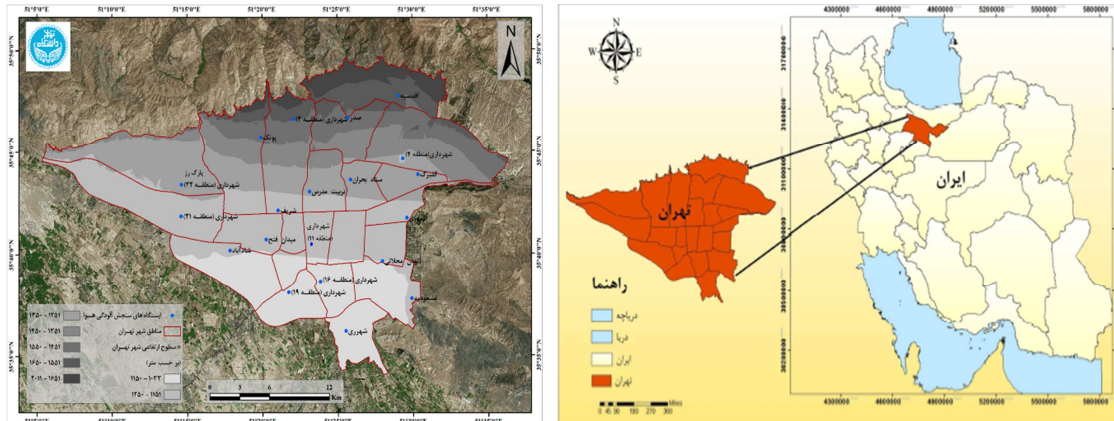
در بخش تحلیل مکانی، روش درونیابی وزنی عکس فاصله (IDW) در محیط GIS استفاده شد. پارامترهای مدل شامل توان ۲، شعاع جستجو متغیر تا ۵ ایستگاه نزدیک، حداقل سه و حداکثر دوازده همسایه، و رزولوشن خروجی ۵۰۰ متر تعیین شد. دلیل انتخاب IDW سادگی، سازگاری با داده‌های محدود ایستگاهی و استفاده گسترده آن در مطالعات مشابه بود (شاد و همکاران، ۱۳۸۶؛ Verma et al., 2016). برای اعتبارسنجی نتایج، روش cross-validation انجام و میانگین مربعات خطا (RMSE) گزارش شد. علاوه بر نقشه غلظت، مقادیر خطای درونیابی نیز تهیه گردید تا عدم قطعیت نتایج مشخص شود. برای مقایسه عملکرد روش‌های مختلف درونیابی، سه روش پرکاربرد شامل IDW، کریجینگ و اسپیلاین مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش IDW در اغلب آلاینده‌ها دقت بالاتری نسبت به دو روش دیگر دارد. برای مثال، RMSE در IDW برای PM_{2.5} برابر ۳۳٫۴۴ و برای PM₁₀ برابر ۳۸٫۴۶ محاسبه شد، در حالی که در کریجینگ این مقادیر به ترتیب ۴۲٫۵۵ و ۴۹٫۱۰ و در اسپیلاین ۴۵٫۲۰ و ۵۲٫۳۸ بود. همچنین برای آلاینده‌های گازی نیز IDW مقادیر خطای کمتری را ارائه داد؛ به‌عنوان نمونه، RMSE برای NO₂ در IDW برابر ۴۵٫۱۱ در مقایسه با ۴۸٫۳۵ در کریجینگ و ۴۹٫۶۰ در اسپیلاین گزارش شد. اگرچه اختلاف مقادیر خطا میان روش‌ها بسیار زیاد نیست، اما تداوم عملکرد بهتر IDW نشان می‌دهد که این روش به‌ویژه در شرایطی که ایستگاه‌ها به‌صورت نامنظم در سطح شهر توزیع شده‌اند، قابلیت بالاتری در بازنمایی الگوی فضایی آلودگی هوا دارد. کریجینگ علی‌رغم مزیت نظری در مدل‌سازی ساختار همبستگی مکانی، در این مطالعه به دلیل محدودیت تعداد ایستگاه‌ها و ناهمگنی فضایی داده‌ها عملکرد ضعیف‌تری نسبت به IDW داشت. روش اسپیلاین نیز با وجود ایجاد سطوح هموار، به دلیل حساسیت بالا به داده‌های پرت و اغراق در تغییرات محلی، خطای بیشتری نسبت به IDW نشان داد (جدول ۳).

جدول ۳. ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی (Spline و Kriging IDW) در برآورد آلاینده‌های هوا

روش پهنه بندی	شاخص	CO	NO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
IDW	خطای متوسط	1.05	10.40	-0.13	3.34	6.25
	RMSE	65.51	45.11	18.11	33.44	38.46
Kriging	خطای متوسط	1.20	12.50	-0.18	4.10	6.80
	RMSE	68.12	48.35	20.55	36.27	41.02
Spline	خطای متوسط	1.35	14.20	-0.25	4.55	7.20
	RMSE	70.88	50.90	22.30	38.10	44.00

در شکل ۱، نقشه‌ی محدوده‌ی شهر تهران همراه با تقسیمات ۲۲ گانه‌ی مناطق شهرداری و موقعیت مکانی ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌های جوی نمایش داده شده است. استقرار ایستگاه‌ها در مناطق مختلف شهر، توزیع نسبتاً متوازنی از شمال تا جنوب و از شرق تا غرب تهران ایجاد کرده است، هرچند تراکم ایستگاه‌ها در مناطق مرکزی و جنوبی بیشتر است. این نقشه پایه‌ای برای انجام تحلیل‌های مکانی- فضایی آلاینده‌ها در ادامه‌ی پژوهش است و مشخص می‌سازد که داده‌های مورد استفاده چه پوششی از سطح شهر را نمایندگی می‌کنند.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۱: موقعیت استان تهران و ایستگاه های منطقه مورد مطالعه

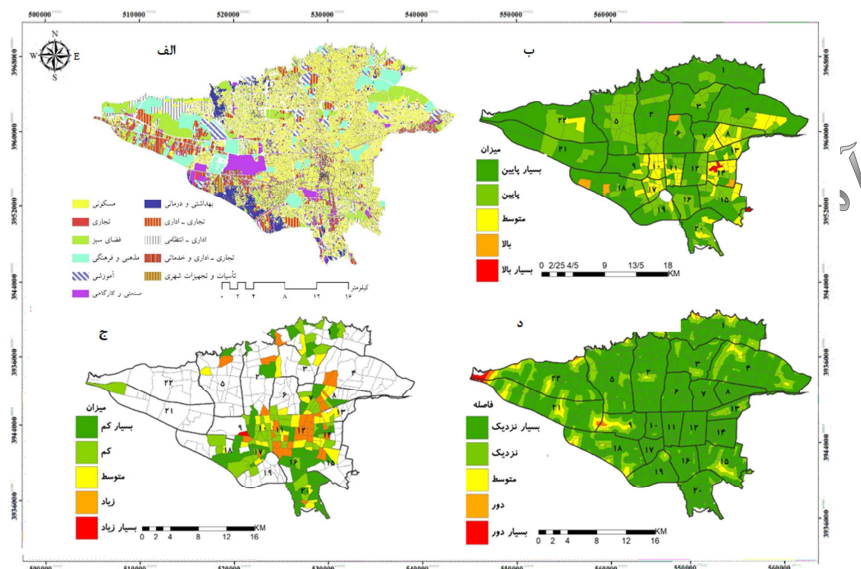
یافته‌های تحقیق

عوامل فضایی کلانشهر تهران

شهر تهران، به‌عنوان کلانشهری با گسترش ناهمگون فضایی و تمرکز بالای جمعیت و فعالیت، تحت تأثیر مستقیم چهار مؤلفه کلیدی در شکل‌گیری الگوهای فضایی خود قرار دارد: کاربری اراضی، پراکنش جمعیت، بافت فرسوده و راه‌های شریانی اصلی. این مؤلفه‌ها نه تنها ماهیت فیزیکی و کالبدی شهر را شکل می‌دهند، بلکه در ترکیب با ویژگی‌های محیطی و اقلیمی، نقش مهمی در میزان آسیب‌پذیری شهری و شرایط زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. الگوی کاربری‌های اراضی در تهران نشان‌دهنده تمرکز بالای کاربری‌های مسکونی و تجاری در پهنه‌های مرکزی و جنوبی شهر است، در حالی که پهنه‌های شمالی عمدتاً دارای کاربری‌های کم‌تراکم مسکونی، فضای سبز و اراضی شیب‌دار هستند. تراکم بالای کاربری‌های تجاری و خدماتی در هسته مرکزی (مناطق ۶، ۷، ۱۱ و ۱۲) باعث افزایش تردد، تمرکز سفرهای روزانه و در نتیجه افزایش آلودگی ناشی از ترافیک شده است. در مقابل، نواحی غربی و شمال‌غربی (مناطق ۲۲، ۵ و ۲۱) ترکیبی از کاربری‌های صنعتی، انبارداری و فضاهای باز دارند که ضمن جذب بخشی از جمعیت روزانه، نقاط کانونی آلودگی صنعتی و حرارتی نیز ایجاد می‌کنند (شکل ۲؛ الف). پراکنش جمعیت در تهران نیز دارای الگویی نامتوازن است؛ بیشترین تراکم جمعیت در مناطق مرکزی و جنوب‌شرقی (مناطق ۱۰، ۱۷، ۱۵ و ۱۲) مشاهده می‌شود. این مناطق به‌دلیل تراکم بالای ساختمانی، خیابان‌های باریک و کمبود فضای باز، بیشترین فشار را بر زیرساخت‌های شهری و خدمات عمومی وارد می‌کنند. این فشار به‌صورت افزایش تقاضا برای حمل‌ونقل، کاهش کیفیت هوا و افزایش آسیب‌پذیری در برابر بحران‌ها (مانند زلزله یا امواج گرما) بروز می‌یابد. در مناطق کم‌تراکم‌تر شمالی، تراکم جمعیت کمتر است، اما ارزش زمین و هزینه خدمات بالاتر بوده و دسترسی به فضاهای سبز و هوای پاک بیشتر است، که خود منجر به شکل‌گیری نابرابری فضایی و اجتماعی می‌شود (شکل ۲؛ ب). بافت‌های فرسوده عمدتاً در مناطق مرکزی، جنوبی و بخش‌هایی از شرق شهر (به‌ویژه مناطق ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۰) متمرکز هستند. این نواحی معمولاً دارای معابر تنگ، ساختمان‌های با استحکام کم و تراکم جمعیت بالا هستند، که ترکیب آن‌ها با کمبود خدمات شهری باعث افزایش خطرپذیری در برابر حوادث می‌شود. این بافت‌ها همچنین به‌دلیل کمبود فضای باز و تهویه ضعیف، مستعد انباشت آلاینده‌های هوا هستند. از سوی دیگر، نوسازی کند این مناطق باعث تداوم چرخه

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

فقر شهری و تشدید مشکلات زیست محیطی می شود (شکل ۲؛ ج). شبکه راه های شریانی اصلی تهران عمدتاً در محورهای شمالی- جنوبی و شرقی- غربی گسترده شده و بخش های مرکزی و جنوبی را به عنوان نقاط گره ای حمل و نقل معرفی می کند. تداخل بالای مسیرهای شریانی با مناطق پرجمعیت و تجاری، سبب تمرکز آلاینده ها و تشدید آلودگی در محدوده های پرتردد شده است. محورهای پرتراکم مانند بزرگراه نواب، آزادی، امام علی و جاده های منتهی به ترمینال ها و مراکز صنعتی، نقش کلیدی در انتقال آلودگی به نواحی پیرامونی دارند (شکل ۲؛ د). ترکیب این چهار مؤلفه، الگویی از تمرکز فشار شهری در بخش های مرکزی و جنوبی تهران ایجاد کرده است، جایی که تراکم جمعیت بالا، کاربری های متراکم و فعالیت بر، حضور گسترده بافت فرسوده و تقاطع مسیرهای شریانی، شرایط را برای آلودگی بیشتر، افزایش دمای محیط (جزیره حرارتی)، و کاهش کیفیت زندگی مهیا کرده است. در مقابل، نواحی شمالی و شمال غربی، به دلیل تراکم کمتر، فضای سبز بیشتر و موقعیت توپوگرافی، از شرایط زیست محیطی بهتری برخوردارند، اما همچنان تحت تأثیر انتقال آلودگی از مناطق پایین دست هستند.



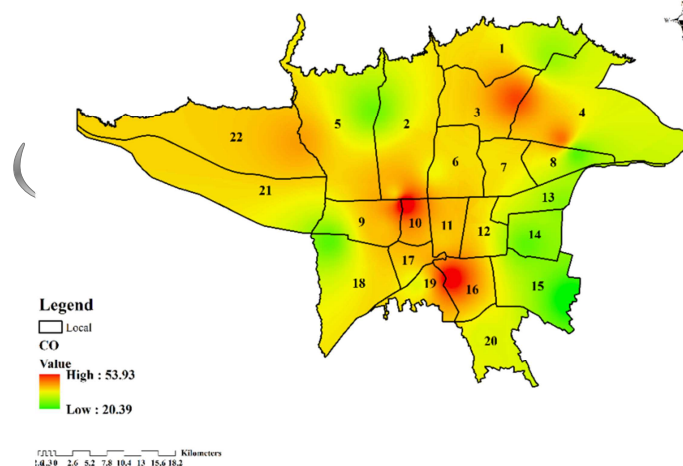
شکل ۲: کاربری های اراضی (الف)، تراکم جمعیت (ب)، بافت فرسوده (ج)، و راه های شریانی اصلی (د)، در کلانشهر تهران

آلاینده ی مونوکسید کربن (CO) در کلانشهر تهران

بررسی وضعیت آلاینده ی مونوکسید کربن (CO) در شهر تهران طی دوره ی آماری ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ (شکل ۳) نشان می دهد که این آلاینده در سطح شهر دارای الگوی توزیع مکانی نامتوازن و تمرکز یافته در نواحی خاصی از شهر است. نقشه موقعیت ایستگاه های سنجش کیفیت هوا (شکل ۱) نشان می دهد که ایستگاه ها به گونه ای در مناطق مختلف پخش شده اند که امکان تحلیل الگوی فضایی آلاینده ها در سطح شهر را فراهم می کند. خروجی نقشه نشان می دهد که میزان CO در نواحی مرکزی شهر به مراتب بیشتر از مناطق پیرامونی و کم تراکم است. این الگو کاملاً با ساختار کالبدی و کاربری زمین در تهران همخوانی دارد. به گونه ای که مناطق دارای بافت فشرده، تراکم جمعیت بالا و بار ترافیکی سنگین، نظیر مناطق ۱۰، ۱۶ و ۳، بالاترین مقادیر میانگین CO را به خود اختصاص داده اند. در این مناطق، میانگین ده ساله ی CO به ترتیب برابر با ۵۳،۹۴، ۵۱،۷۶ و ۴۶،۷۲ ثبت شده که نشان دهنده ی شدت بالای

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

آلودگی ناشی از منابع متحرک مانند خودروها و وسایل نقلیه‌ی موتوری است. این مناطق در قلب تهران واقع شده‌اند و با تمرکز شدید فعالیت‌های اقتصادی، خدماتی و تردهای روزانه همراه هستند. در مقابل، مناطقی نظیر مسعودیه (منطقه ۱۵)، گلبرگ (منطقه ۸) و شادآباد (منطقه ۱۸) که در حاشیه‌ی شهر یا در نواحی کمتر تراکم‌یافته واقع شده‌اند، پایین‌ترین مقادیر را ثبت کرده‌اند. الگوی فضایی توزیع آلاینده در نقشه پراکنش به‌وضوح یک شیب مرکزی-پیرامونی را نمایش می‌دهد؛ یعنی هرچه از مرکز تهران فاصله می‌گیریم، غلظت CO کاهش می‌یابد. این توزیع مکانی را می‌توان نتیجه‌ی مستقیم هم‌پوشانی چند عامل دانست؛ از جمله نقش تعیین‌کننده‌ی حجم ترافیک شهری در تولید CO، میزان تهویه‌ی طبیعی و چرخش هوا در بافت‌های شهری می‌باشد. در نتیجه، انباشت آلاینده‌ها در نواحی کم‌تهویه و پرتردد بیشتر است. همچنین ساختار فشرده و ارتفاع بالای ساختمان‌ها در مناطق مرکزی، مانعی فیزیکی برای گردش آزاد هوا ایجاد کرده و به حفظ و ماندگاری گازهای آلاینده کمک می‌کند. از منظر بهداشتی، مونوکسید کربن گازی بی‌رنگ و بی‌بو است که به‌راحتی وارد جریان خون شده و مانع از انتقال اکسیژن می‌شود. بنابراین حضور بالای آن در مناطقی که جمعیت زیادی در آن زندگی یا تردد می‌کنند، خطرات گسترده‌ای به‌ویژه برای سالمندان، کودکان، بیماران قلبی و تنفسی به همراه دارد. این موضوع وجه دیگری از اهمیت تحلیل فضایی این آلاینده را آشکار می‌سازد، زیرا تراکم بالای جمعیت در نواحی با آلودگی بالا به معنای افزایش جمعیت در معرض خطر است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که آلاینده‌ی CO در تهران دارای الگوی فضایی شاعی با بیشترین غلظت در مرکز و کاهش تدریجی به سمت پیرامون است. این الگو بازتاب مستقیم ساختار فضایی-کالبدی تهران و الگوی استقرار منابع آلاینده است.



شکل ۳: میزان آلاینده‌ی اکسید کربن در کلانشهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۴۰۲

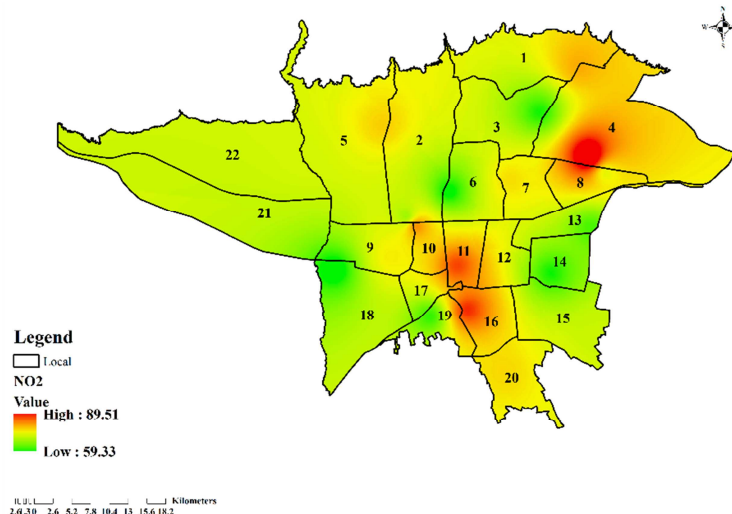
آلاینده‌ی دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) در کلانشهر تهران

بررسی داده‌های مربوط به آلاینده‌ی دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) در شهر تهران نشان می‌دهد که این آلاینده نیز، مشابه مونوکسید کربن، دارای الگوی توزیع فضایی نابرابر و تمرکز یافته در مناطق خاصی از شهر است. پراکنش آلاینده NO_2 (شکل ۴) آشکار می‌سازد که غلظت این آلاینده عمدتاً در مناطق مرکزی، پرتردد و دارای تراکم ساختمانی بالا متمرکز است. مناطق شهرداری ۴، ۱۶، ۱۱ و ۱۰ از جمله نقاطی هستند که بیشترین میانگین ده‌ساله‌ی NO_2 را به ترتیب با مقادیر ۸۹،۵۱، ۸۲،۳۸، ۸۱،۳۴ و ۷۷،۳۸ ثبت کرده‌اند. این نواحی در بافت مرکزی و

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

پرتراфик تهران قرار دارند و تمرکز بالای فعالیت‌های انسانی و تردد وسایل نقلیه در آن‌ها نقش مهمی در تولید و تجمع این آلاینده دارد. نقشه‌ی پراکنش نیز به‌وضوح نشان می‌دهد که غلظت NO_2 در محدوده‌ی مرکزی تهران به‌صورت لکه‌هایی با رنگ تیره‌تر نمایان شده که نشانه‌ی سطح بالای آلودگی است. هرچه از مرکز به سمت مناطق پیرامونی و کم‌تراکم شهر فاصله می‌گیریم، از غلظت این آلاینده کاسته می‌شود و مناطقی مانند شادآباد، گلبرگ، شهرری و بزرگراه محلاتی مقادیر پایین‌تری از NO_2 را ثبت کرده‌اند (به‌ترتیب $۵۹,۳۳$ ، $۷۱,۲۴$ ، $۷۳,۵۹$ ، $۶۱,۰۶$). با اینکه برخی مناطق حاشیه‌ای نیز مقادیری نسبتاً بالا دارند، اما میانگین کلی آن‌ها نسبت به مناطق مرکزی کمتر است و این تأیید می‌کند که الگوی توزیع فضایی آلاینده NO_2 نیز تا حد زیادی تابع تمرکز فعالیت‌های حمل‌ونقل شهری و ساختار کالبدی نواحی مرکزی شهر است. دی‌اکسید نیتروژن یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا در شهرهای بزرگ است که عمدتاً از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی در خودروها، به‌ویژه وسایل نقلیه دیزلی و اتوبوس‌های فرسوده، وارد جو می‌شود. این آلاینده نقش مهمی در شکل‌گیری سایر آلاینده‌ها مانند ازن سطحی (O_3) و ذرات معلق دارد و اثرات مخربی بر سیستم تنفسی انسان، به‌ویژه در کودکان، سالمندان و مبتلایان به بیماری‌های تنفسی دارد. در مناطق پرتردد شهری که تهویه طبیعی با اختلال مواجه است، غلظت این آلاینده‌ها بیشتر باقی می‌ماند. توزیع مکانی NO_2 در تهران نشان می‌دهد که مناطقی با بار ترافیکی بالا، بافت فشرده و کاربری‌های تجاری-اداری، از غلظت بیشتری برخوردارند. در مقابل، در مناطقی که بافت شهری بازتر، جمعیت کمتر، و دسترسی به فضاهای سبز بیشتر است، مقدار این آلاینده به‌طور محسوسی کاهش یافته است. چنین الگوی توزیعی حاکی از آن است که سیاست‌های مدیریت کیفیت هوا باید مبتنی بر مکان و با در نظرگیری شرایط خاص هر منطقه طراحی شود. به‌عنوان مثال، تمرکز بر نوسازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی، ایجاد محدودیت‌های ترافیکی در مناطق پرخطر، گسترش محدوده‌های کم‌انتشار، و ارتقای پوشش گیاهی در مرکز شهر می‌تواند به کاهش معنادار این آلاینده کمک کند. در کل می‌توان گفت که دی‌اکسید نیتروژن در تهران دارای یک الگوی مرکز-محور است؛ یعنی هرچه به مرکز شهر نزدیک‌تر می‌شویم، غلظت این آلاینده افزایش می‌یابد، و هرچه به نواحی پیرامونی و حاشیه‌ای می‌رویم، از شدت آن کاسته می‌شود. این الگو با ساختار فضایی تهران، نوع کاربری زمین، حجم ترافیک و شرایط اقلیمی آن در ارتباط مستقیم است و از همین رو، رویکردهای موضعی و ناحیه‌ای در کاهش آلودگی NO_2 باید جایگزین برنامه‌های کلی و یکسان‌نگر شوند. استمرار روند فعلی، به‌ویژه در مناطق پرتردد و پرجمعیت، می‌تواند آثار قابل توجهی بر سلامت عمومی و محیط‌زیست شهری داشته باشد.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



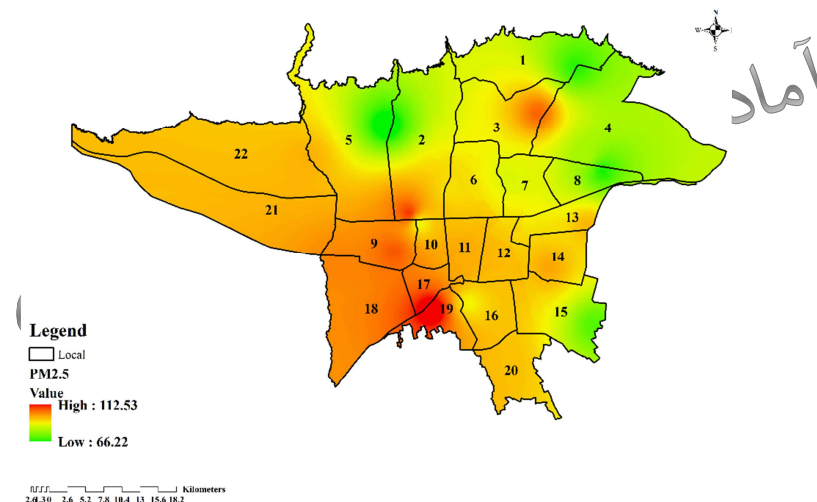
شکل ۴: میزان آلاینده دی اکسید نیتروژن در کلانشهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۴۰۲

تحلیل آلاینده‌ی PM_{2.5} در کلانشهر تهران

بررسی وضعیت آلاینده‌ی PM_{2.5} در تهران بر پایه‌ی داده‌های ایستگاهی و نقشه‌ی پراکنش مکانی آن نشان می‌دهد که این آلاینده یکی از مخرب‌ترین و پایدارترین آلاینده‌های هوای شهری به‌شمار می‌رود که از نظر توزیع فضایی، به‌شدت متأثر از ساختار کالبدی، شرایط اقلیمی، منابع احتراقی و ویژگی‌های میکروکلیماتیک مناطق مختلف شهر است. بر اساس جدول ۴، بیشترین میانگین ده‌ساله‌ی ذرات PM_{2.5} در ایستگاه‌هایی مانند شهرداری منطقه ۱۹ (۱۱۲،۵۴)، شریف (۱۰۵،۵۸) و فتح (۱۰۳،۲۵) ثبت شده که همگی در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی تهران قرار دارند. در این مناطق، تراکم بالای صنایع، انبارهای بزرگ، حمل‌ونقل سنگین، و تردد خودروهای دیزلی و فرسوده از جمله دلایل اصلی بالا بودن غلظت این ذرات است. در مقابل، ایستگاه‌هایی مانند پونک (۶۶،۲۲)، گلبرگ (۷۰،۱۹)، اقدسیه (۷۰،۹۴) و مسعودیه (۷۳،۵۱) دارای کمترین میانگین‌های ثبت‌شده برای این آلاینده هستند که اغلب در نواحی شمالی، شمال‌شرقی یا کم‌تراکم‌تر شهر واقع شده‌اند. نقشه‌ی پراکنش PM_{2.5} (شکل ۵) به‌وضوح این الگوی فضایی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که میزان آلودگی ناشی از ذرات معلق از نواحی شمالی و شرقی به سمت جنوب و جنوب‌غربی افزایش می‌یابد؛ الگویی که به‌نوعی بازتاب‌دهنده‌ی جهت کلی جریان باد غالب در تهران (شمال‌غرب به جنوب‌شرق) و همچنین تمرکز منابع آلاینده در نواحی پایین‌دست شهر است. ذرات معلق با قطر کمتر از ۲،۵ میکرون معمولاً از طریق احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی، فعالیت‌های صنعتی، سوزاندن زباله، و سایش تایر و ترمز خودروها تولید می‌شوند. اندازه‌ی کوچک این ذرات باعث می‌شود به‌راحتی وارد عمق دستگاه تنفسی شوند و در بافت ریه یا حتی جریان خون نفوذ کنند. بنابراین، PM_{2.5} از نظر بهداشتی یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌ها محسوب می‌شود و در ایجاد یا تشدید بیماری‌های قلبی-عروقی، ریوی، سکنه مغزی، و کاهش عملکرد ریه نقش دارد. این موضوع در مناطق پرجمعیت و صنعتی تهران که بار آلودگی همزمان با تراکم جمعیتی بالاست، اهمیت دوچندان دارد. از نظر توزیع مکانی، نواحی جنوبی و غربی تهران که دارای کاربری‌های مختلط صنعتی، حمل‌ونقل سنگین و بافت‌های فرسوده‌تر هستند، از بار آلودگی PM_{2.5} بالاتری رنج می‌برند. همزمان، تهویه‌ی ضعیف، تراکم ساختمانی، و تابش ناکافی در این نواحی سبب ماندگاری بیشتر این ذرات در لایه‌های پایین جو می‌شود. در حالی که در نواحی شمالی

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مانند اقدسیه و پونک، ارتفاع بالاتر، فضای بازتر، و تراکم کم‌تر شهری موجب پراکندگی مؤثرتر آلاینده‌ها و کاهش غلظت آن‌ها شده است. بنابراین، توزیع فضایی $PM_{2.5}$ در تهران نه تنها تابعی از منابع انتشار، بلکه بازتابی از شرایط توپوگرافی، باد غالب، و ساختار اقلیمی محلی نیز هست. این آلاینده از جمله آلاینده‌هایی است که کنترل آن نیازمند اقداماتی چندبعدی در سطوح مختلف شهری است. کاهش انتشار منابع ثابت و متحرک، به‌روزرسانی ناوگان حمل‌ونقل عمومی، محدود کردن فعالیت صنایع آلاینده در مناطق مسکونی، و افزایش پوشش سبز در نواحی پرریسک از جمله راهکارهای پیشنهادی برای کاهش غلظت این آلاینده هستند. در مجموع می‌توان گفت که ذرات معلق $PM_{2.5}$ در تهران دارای الگوی فضایی جنوب‌گرایانه هستند؛ یعنی هر چه به سمت مناطق جنوبی و غربی شهر حرکت می‌کنیم، غلظت این ذرات افزایش می‌یابد. این الگو در نقشه‌ی پراکنش و داده‌های آماری به‌خوبی منعکس شده و بر لزوم مداخلات فضا محور، موضعی و هدفمند در سیاست‌گذاری زیست‌محیطی تهران تأکید دارد. تمرکز منابع آلاینده در نواحی پایین‌دست شهر، همراه با جمعیت قابل‌توجه ساکن در آن مناطق، زنگ خطر مهمی برای سلامت عمومی به حساب می‌آید و نباید نادیده گرفته شود.



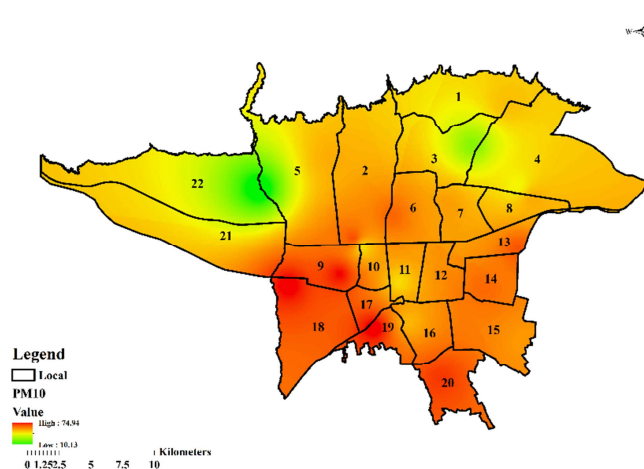
شکل ۵: میزان آلاینده ذرات معلق ($PM_{2.5}$) میکرون؛ در کلانشهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۴۰۲

تحلیل آلاینده‌ی PM_{10} در کلانشهر تهران

تحلیل وضعیت آلاینده‌ی PM_{10} در شهر تهران طی دوره‌ی آماری ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که این آلاینده نیز مانند ذرات $PM_{2.5}$ دارای الگوی نابرابر، اما نسبتاً منظم از نظر توزیع فضایی در سطح شهر است. بیشترین میانگین ده‌ساله‌ی غلظت PM_{10} در ایستگاه‌هایی نظیر شهرداری منطقه ۱۹ (۷۴،۹۵)، شادآباد (۷۴،۳۸)، و میدان فتح (۷۳،۱۹) ثبت شده است. این سه ایستگاه در جنوب‌غرب و غرب تهران واقع شده‌اند، جایی که تردد خودروهای سنگین، فعالیت‌های صنعتی، بارگیری و انبارداری، و همچنین مجاورت با جاده‌های ترانزیتی سهم بالایی در تولید این آلاینده دارند. در همین راستا، ایستگاه‌هایی نظیر شهرری، شریف، پیروزی و اقدسیه نیز در رده‌های بعدی از نظر غلظت قرار دارند. در مقابل، کمترین میانگین PM_{10} در ایستگاه‌هایی مانند دروس (۲۷،۳۱) و پارک رازی (۱۰،۱۱) مشاهده شده است. این مقادیر پایین‌تر از میانگین کل شهر بوده و به‌ویژه در مورد پارک رازی، تا حدی غیرمعمول است. این اختلاف می‌تواند ناشی از عواملی مانند موقعیت خاص ایستگاه، پوشش گیاهی مجاور، یا شرایط

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

محلی تهویه هوا باشد. در نقشه‌ی پراکنش PM_{10} (شکل ۶)، تراکم بالای ذرات در نواحی جنوبی، غربی و جنوب‌غربی شهر با رنگ‌های تیره مشخص شده که مؤید غلظت بالای این آلاینده در آن نواحی است. ذرات PM_{10} برخلاف $PM_{2.5}$ ، اندازه‌ی بزرگ‌تری دارند و منشأ آن‌ها می‌تواند طیف وسیع‌تری از منابع باشد؛ از جمله فعالیت‌های عمرانی، خاک‌برداری، سایش سطح جاده‌ها، گردوغبار معلق، و فرآیندهای صنعتی سنگین. ویژگی مهم این ذرات، پایداری آن‌ها در جو و قابلیت جابه‌جایی آن‌ها در فواصل نسبتاً طولانی است. در نتیجه، نه تنها منابع محلی بلکه جریان باد و شرایط اقلیمی منطقه‌ای نیز در توزیع این آلاینده نقش دارند. از نظر فضایی، تمرکز PM_{10} در نواحی پایین‌دست شهر، خصوصاً مناطق غربی و جنوبی، نشان‌دهنده‌ی روند تجمعی آلودگی در راستای جهت باد غالب (شمال‌غرب به جنوب‌شرق) است. در این راستا، نقش اقلیم محلی در همراهی با منابع آلاینده و ویژگی‌های توپوگرافی شهر، باعث شده که بار آلاینده در مناطقی از شهر بیشتر انباشته شود. بافت فشرده، ضعف پوشش گیاهی، و وجود کاربری‌های آلاینده در این نواحی، مزید بر علت شده و شرایط را برای تمرکز بیشتر آلاینده‌ها فراهم کرده است. از منظر سلامت عمومی، ذرات PM_{10} می‌توانند با ورود به بخش‌های فوقانی سیستم تنفسی، باعث بروز مشکلاتی مانند التهاب، برونشیت، آسم، و افزایش واکنش‌های آلرژیک شوند. اگرچه PM_{10} به اندازه‌ی $PM_{2.5}$ خطرناک نیست، اما حجم بیشتر و زمان ماندگاری بالاتر آن در جو می‌تواند بر کیفیت کلی هوا و زیست‌پذیری شهر اثرگذار باشد. این امر به‌ویژه در نواحی با جمعیت بالا، بافت فرسوده و دسترسی پایین به خدمات درمانی، تهدید جدی‌تری ایجاد می‌کند. در کل می‌توان گفت که آلاینده‌ی PM_{10} در تهران دارای الگوی فضایی غالب جنوب‌غربی و غربی است، با تمرکز بالا در مناطقی که هم‌زمان دارای منابع آلاینده متحرک و ثابت هستند. این الگو متأثر از ترکیبی از عوامل کالبدی-عملکردی شهری، منابع آلاینده، جهت باد و ویژگی‌های اقلیمی محلی است. به همین جهت، راهبردهای کاهش این آلاینده باید شامل کنترل فعالیت‌های ساختمانی و صنعتی، نظارت بر منابع غبارزا، توسعه‌ی کمربندهای سبز در نواحی صنعتی، و ارتقای سامانه‌های پایش ذرات معلق در مناطق پرخطر باشد. بدون اتخاذ تدابیر مکان‌محور و متناسب با ویژگی‌های فضایی آلودگی، کاهش سطح PM_{10} در تهران با چالش جدی مواجه خواهد بود.

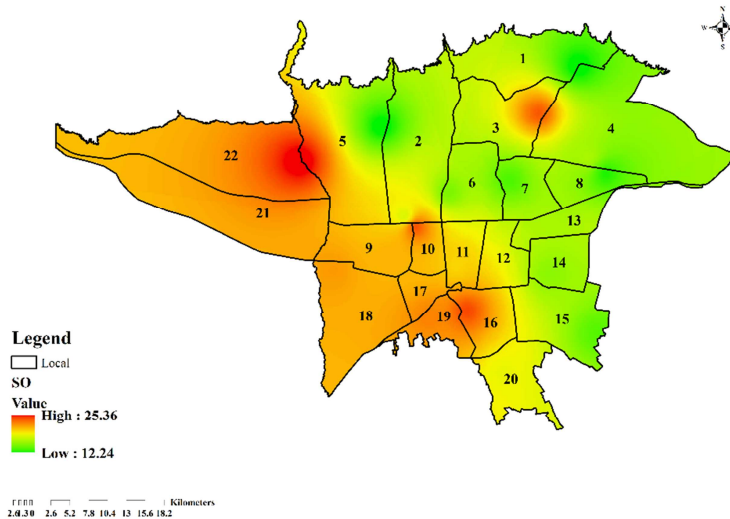


شکل ۶: میزان آلاینده ذرات معلق (۱۰ میکرون) در کلانشهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۴۰۲

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تحلیل داده‌های ده‌ساله‌ی آلاینده‌ی دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در شهر تهران طی بازه‌ی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ بیانگر الگوی نسبتاً مشخصی از تمرکز فضایی این آلاینده در سطح شهر است. بر اساس اطلاعات، بیشترین مقادیر میانگین SO_2 در ایستگاه‌هایی مانند پارک رازی (۲۵،۳۷)، شهرداری منطقه ۱۶ (۲۳،۶۳)، و شهرداری منطقه ۱۰ (۲۳،۳۵) مشاهده شده است. این نواحی در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی شهر واقع شده‌اند و از نظر کاربری شهری، غالباً دارای تراکم بالای جمعیت، رفت‌وآمد وسیع وسایل نقلیه، و بعضاً مجاورت با مراکز صنعتی یا انبارهای بزرگ هستند. این عوامل در کنار کمبود تهویه طبیعی و تمرکز فعالیت‌های شهری، منجر به تجمع بیشتر آلاینده‌هایی نظیر SO_2 در این مناطق شده است. در مقابل، کمترین مقادیر میانگین SO_2 مربوط به ایستگاه‌هایی مانند شریف (۱۷،۷۸)، گلبرگ (۱۲،۸۳)، اقدسیه (۱۲،۲۷) و پونک (۱۲،۲۴) است که اغلب در مناطق شمالی، شمال‌شرقی و تا حدی غربی شهر قرار دارند. این نواحی با بافت بازتر، تراکم جمعیتی کمتر، جریان هوای مناسب‌تر، و کاربری عمدتاً مسکونی، شرایط مناسب‌تری برای تهویه هوا دارند و بنابراین سطح آلودگی SO_2 در آن‌ها پایین‌تر است. نقشه‌ی پراکنش آلاینده (شکل ۷) این تفاوت را به خوبی نمایش می‌دهد و الگوی فضایی جنوب‌گرایانه آلاینده‌ی SO_2 را به صورت لکه‌های غلظت بالا در مناطق پایین‌دست شهر ترسیم می‌کند. دی‌اکسید گوگرد عمدتاً در اثر احتراق سوخت‌های فسیلی حاوی گوگرد، مانند نفت کوره و گازوئیل، در نیروگاه‌ها، صنایع، وسایل نقلیه‌ی دیزلی و برخی فرایندهای تولیدی تولید می‌شود. در نتیجه، تمرکز این آلاینده در مناطق دارای صنایع نیمه‌سنگین، ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی فرسوده یا مراکز مصرف سوخت فسیلی بیشتر است. از این منظر، تمرکز این آلاینده در نواحی جنوبی تهران کاملاً با منطق کاربری زمین و منابع آلاینده هم‌خوانی دارد. از منظر بهداشت عمومی، SO_2 یکی از آلاینده‌های تحریک‌کننده‌ی دستگاه تنفسی است که حتی در غلظت‌های پایین می‌تواند موجب بروز مرفه، گرفتگی سینه، حملات آسمی و تشدید بیماری‌های ریوی شود. کودکان، سالمندان و بیماران زمینه‌ای بیشتر در معرض خطرات این گاز قرار دارند. خطر دیگر این آلاینده، مشارکت آن در تشکیل باران‌های اسیدی و ترکیب با رطوبت برای تولید ذرات ثانویه سولفاتی است که می‌تواند سطح $PM_{2.5}$ را نیز افزایش دهد و آثار ترکیبی بیشتری بر سلامت و محیط‌زیست بگذارد. از نظر فضایی، توزیع SO_2 در تهران دارای الگوی تمرکزی در جنوب و جنوب‌غرب شهر است. این الگو احتمالاً نتیجه‌ی برهم‌کنش منابع آلاینده با توپوگرافی تهران (که در جنوب به سمت دشت باز می‌شود)، جهت باد غالب، و ترکیب کاربری‌های آلاینده‌زا در این نواحی است. در مقابل، مناطق شمالی، به دلیل ارتفاع بالاتر، تهویه مناسب‌تر و نبود منابع ثابت آلاینده، سطح پایین‌تری از SO_2 دارند. در کل می‌توان گفت که دی‌اکسید گوگرد در تهران یکی از آلاینده‌هایی است که هم منشأ ثابت دارد (صنایع، نیروگاه‌ها) و هم تا حدی تحت تأثیر منابع متحرک است. کنترل این آلاینده نیازمند اقداماتی نظیر کاهش محتوای گوگرد در سوخت‌ها، اصلاح فرایندهای احتراقی، توسعه فیلترهای صنعتی، نوسازی ناوگان دیزلی، و مدیریت فضایی منابع انتشار است. بدون کاهش منابع آلاینده در جنوب شهر و اعمال مداخلات فضا محور، آلودگی SO_2 می‌تواند در کنار سایر آلاینده‌ها وضعیت سلامت شهری را به‌طور جدی تهدید کند (شکل ۷).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



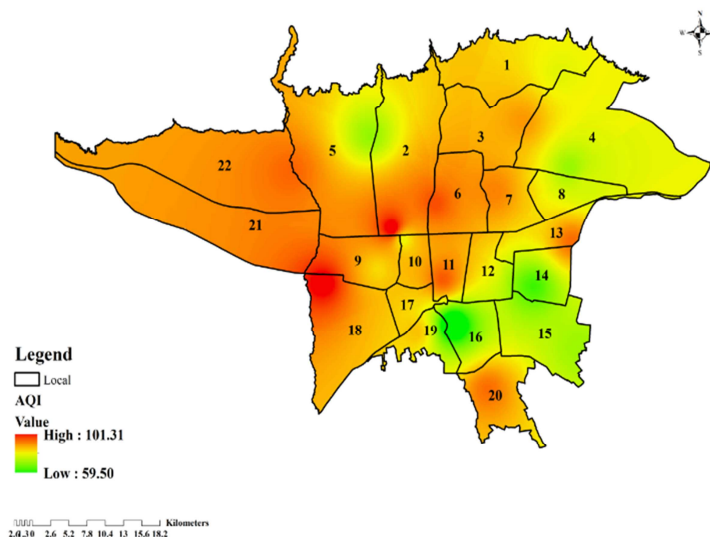
شکل ۷: میزان آلاینده SO₂ در کلانشهر تهران در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۴۰۲

تحلیل شاخص کیفیت هوا (AQI) در کلانشهر تهران

بررسی داده‌های میانگین شاخص کیفیت هوا (AQI) در ایستگاه‌های سنجش مختلف شهر تهران طی بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که کیفیت هوا در سطح شهر دارای الگوی فضایی مشخصی است که به‌وضوح با ویژگی‌های کالبدی، کاربری زمین، میزان تردد وسایل نقلیه و تراکم ساختمانی در مناطق مختلف تهران مرتبط است. الگوی غالب، تمرکز آلودگی در نواحی مرکزی، پرتردد و متراکم شهر و کاهش تدریجی آن به‌سوی نواحی پیرامونی و کم‌تراکم‌تر است. بالاترین میانگین شاخص آلودگی در این بازه زمانی مربوط به ایستگاه شریف در منطقه ۲ است (۱۰۱,۳۳) که در وضعیت «ناسالم برای گروه‌های حساس» قرار دارد. پس از آن، ایستگاه شادآباد در منطقه ۱۸ (۹۹,۸۴)، تربیت مدرس در منطقه ۶ (۹۵,۲۶)، و شهرداری منطقه ۱۱ (۹۴,۵۲) در رده‌های بعدی قرار دارند. این مناطق همگی در زمره مناطق پرتردد و دارای کاربری‌های غالباً تجاری-اداری هستند که حجم بالای رفت‌وآمد وسایل نقلیه، حضور ساختمان‌های بلندمرتبه، کمبود فضاهای باز و ناکارآمدی در تهویه طبیعی موجب افزایش غلظت آلاینده‌ها در آن‌ها شده است. مناطقی مانند پارک رازی (۹۳,۷۱)، پیروزی (۹۳,۲۴)، شهرری (۹۳,۰۹) و ستاد بحران در منطقه ۷ (۹۱,۷) نیز در گروه مناطق دارای آلودگی نسبتاً بالا قرار دارند که اگرچه ممکن است به لحاظ موقعیت جغرافیایی در حاشیه تهران تلقی شوند، اما به‌سبب حضور صنایع، ترافیک سنگین یا ساختار بسته شهری، غلظت آلاینده‌ها در آن‌ها بالا باقی مانده است. به‌عنوان نمونه، منطقه ۱۸ با وجود موقعیت جنوبی و حاشیه‌ای خود، به دلیل حضور صنایع آلاینده و عبور بزرگراه‌ها از آن، از جمله نواحی با شاخص آلودگی بالا به‌شمار می‌رود. در مقابل، مناطقی مانند اوین-محلاتی (۶۹,۶۳)، شهرداری منطقه ۱۶ (۵۹,۴۶)، پونک (۷۵,۴۴) و مسعودیه (۷۵,۹۲) دارای مقادیر پایین‌تری از AQI هستند. این کاهش را می‌توان به عوامل متعددی چون بافت بازتر، تراکم ساختمانی کمتر، برخورداری از فضاهای سبز بیشتر و تردد کمتر نسبت داد. این الگوی مرکز-پیرامون در توزیع آلودگی هوا نشان می‌دهد که ویژگی‌های کالبدی و عملکردی هر منطقه نقش بسزایی در کیفیت هوای آن ایفا می‌کند. مناطقی با کاربری غالب اداری-تجاری، ساختمان‌های بلندمرتبه، بافت فشرده، تردد بالای وسایل نقلیه، و کمبود فضاهای سبز به‌مراتب بیشتر در معرض آلودگی هستند. از منظر برنامه‌ریزی شهری، تمرکز سیاست‌های کاهش آلودگی باید بر

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مناطق مرکزی و پرتراфик قرار گیرد. اقداماتی نظیر نوسازی ناوگان حمل و نقل عمومی، ایجاد محدودیت های تردد، گسترش محدوده های کم انتشار، ارتقای پوشش گیاهی و بازطراحی فضاهای شهری می تواند در کنترل این الگو مؤثر باشد. همچنین اتخاذ رویکردهای موضعی و متناسب با ویژگی های خاص هر منطقه به مراتب کارآمدتر از سیاست های کلی و یکپارچه است (شکل ۸).



شکل ۸: میانگین میزان شاخص AQI در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران

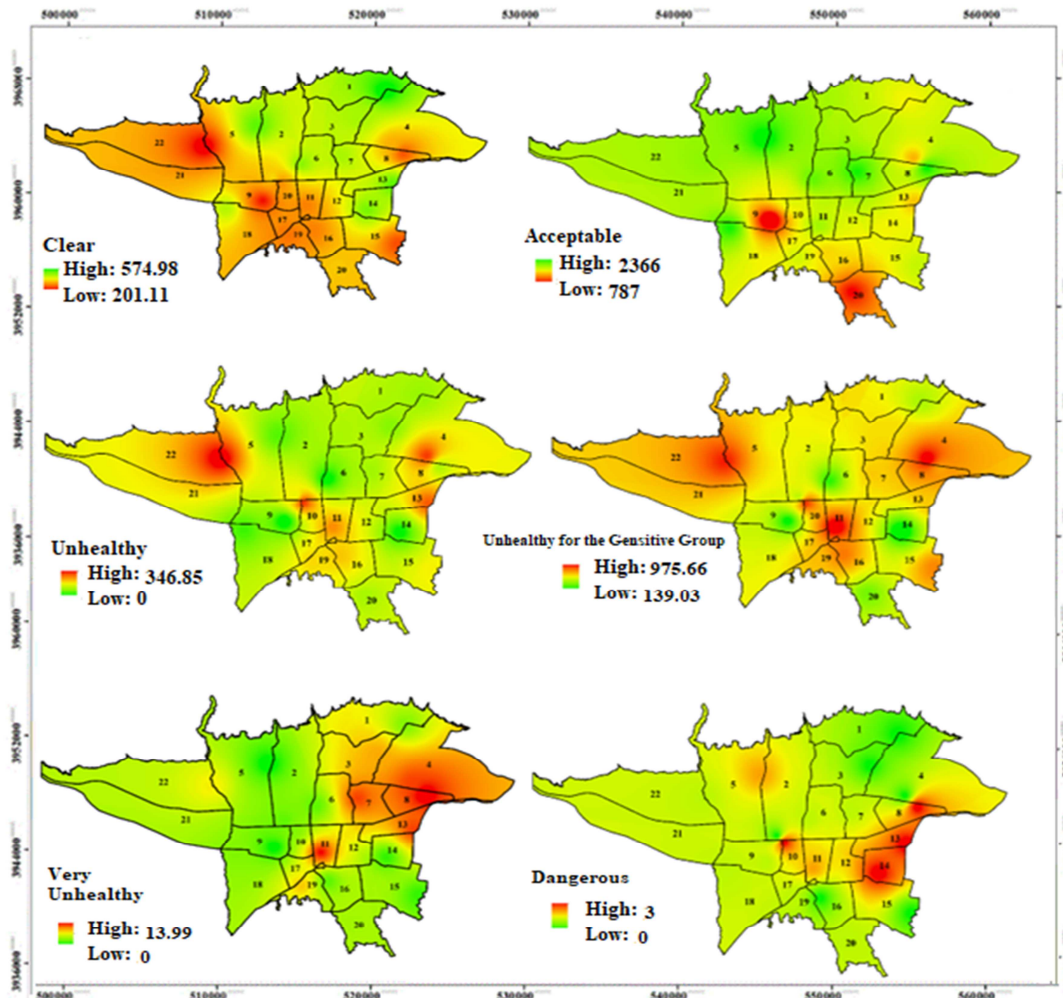
تحلیل فراوانی وضعیت های کیفیت هوا در ایستگاه های تهران

بررسی وضعیت کیفیت هوا در بازه زمانی ده ساله در سطح ۲۰ ایستگاه سنجش آلودگی شهر تهران نشان می دهد که الگوی توزیع وضعیت های AQI در سطح مناطق مختلف شهر تابعی از ترکیب عوامل جغرافیایی، اقلیمی، کاربری اراضی، شدت ترافیک، تراکم ساختمانی، پوشش سبز و تأثیرات توپوگرافی است. شاخص «قابل قبول» در میان تمامی وضعیت ها بیشترین سهم را در اکثر ایستگاه ها به خود اختصاص داده و نشان دهنده آن است که در بخش بزرگی از روزهای سال، کیفیت هوا در سطحی متوسط و قابل تحمل برای عموم شهروندان قرار داشته است. ایستگاه هایی مانند گلبرگ، ستاد بحران، شادآباد، تربیت مدرس و شهرداری منطقه ۱۱ بیشترین تعداد روزهای «قابل قبول» را ثبت کرده اند که اغلب در مناطق میانی و غربی تهران واقع شده اند. این مناطق به رغم تراکم نسبی بالا، احتمالاً به واسطه وجود فضاهای باز، عملکرد جریان باد و شرایط توپوگرافی مساعد، از تهویه طبیعی مناسبی برخوردار بوده اند. در نقطه مقابل، ایستگاه هایی مانند میدان فتح، شهرری و اتوبان محلاتی کمترین تعداد روزهای قابل قبول را داشته اند که نشان دهنده بار آلودگی بالاتر در این مناطق است. وضعیت «پاک» که معرف بهترین شرایط کیفی هواست، فراوانی به مراتب کمتری نسبت به وضعیت قابل قبول دارد و بیشتر در ایستگاه های شمالی و شرقی مانند اقدسیه، دروس، گلبرگ و ستاد بحران متمرکز است. این مناطق معمولاً در ارتفاعات بالاتر قرار داشته، دارای پوشش گیاهی وسیع تر، تراکم ساختمانی کمتر و دورتر از کانون های ترافیکی سنگین هستند. بیشترین تعداد روزهای پاک در ایستگاه اقدسیه با ۵۷۵ روز و دروس با ۴۵۹ روز ثبت شده است. در سوی دیگر، مناطق جنوبی و مرکزی از جمله میدان فتح، شریف، شهرری و شهرداری منطقه ۱۱ کمترین تعداد روزهای پاک را تجربه کرده اند که مؤید تمرکز آلودگی در بخش های

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

کم‌ارتفاع‌تر، صنعتی‌تر و پرتراکم‌تر شهر است. برخلاف وضعیت پاک و قابل قبول، وضعیت «ناسالم برای گروه‌های حساس» نشانگر شرایط کیفی هوایی است که برای گروه‌های آسیب‌پذیر نظیر سالمندان، کودکان و بیماران قلبی و تنفسی نامطلوب است. این وضعیت در بسیاری از ایستگاه‌ها حضور دارد، اما در مناطقی مانند پارک رازی، شهرداری مناطق ۱۰ و ۴، و پیروزی بارزتر است. این مناطق با بافت متراکم شهری، تردد بالای وسایل نقلیه و تمرکز جمعیتی بالا مواجه‌اند. در مقابل، ایستگاه‌هایی نظیر دروس، شریف و گلبرگ کمترین میزان وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس را ثبت کرده‌اند که بازتابی از شرایط محلی بهتر از نظر تهویه، سبزی‌نگی و دوری از کانون‌های اصلی آلودگی است. وضعیت «ناسالم» که اثرات منفی آن به کل جمعیت شهر تسری پیدا می‌کند، در سطحی هشداردهنده در برخی از ایستگاه‌ها دیده می‌شود. شهرداری منطقه ۱۱ با ۹۷۶ روز، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده و پس از آن ایستگاه‌های گلبرگ، منطقه ۱۹، پیروزی و ستاد بحران قرار دارند. این ایستگاه‌ها عمدتاً در بخش‌های جنوبی، مرکزی یا صنعتی تهران واقع شده‌اند، جایی که تراکم ترافیک، کمبود فضاهای باز شدیدتر بروز می‌یابد. در ایستگاه‌هایی مانند شریف، تربیت مدرس و اقدسیه اگرچه وضعیت ناسالم دیده می‌شود، اما فراوانی آن به مراتب کمتر است و این ایستگاه‌ها در مقایسه با سایر مناطق شهر تهران وضعیت کیفی بهتری دارند. وضعیت «بسیار ناسالم» که هشدارهای جدی برای سلامت عمومی به همراه دارد، در مجموع سهم کمتری از کل روزها را به خود اختصاص داده، اما در برخی از ایستگاه‌ها مانند گلبرگ، شهرداری مناطق ۱۱ و ۴، پیروزی و ستاد بحران تعداد بیشتری روز با این وضعیت ثبت شده است. حضور این وضعیت در این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که در روزهایی خاص و تحت شرایط اقلیمی نامطلوب یا افزایش بار آلاینده‌ها، امکان ورود به مراحل خطرناک‌تر آلودگی وجود دارد. با این حال، تعداد روزهای این وضعیت در سایر ایستگاه‌ها بسیار محدود و نگاه به یک یا دو روز در کل دوره محدود می‌شود. در نهایت، وضعیت «خطرناک» که شدیدترین وضعیت شاخص کیفیت هوا محسوب می‌شود، خوشبختانه در اغلب ایستگاه‌ها یا اصلاً رخ نداده یا صرفاً یک تا سه روز در طی ده سال مشاهده شده است. تنها در ایستگاه‌هایی مانند گلبرگ، پیروزی، اتوبان محلاتی، شهرداری منطقه ۱۰ و شهرداری منطقه ۱۱ روزهایی با این وضعیت گزارش شده است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۹: نقشه‌های فضایی وضعیت‌های مختلف شاخص کیفیت هوا (AQI) در شهر تهران (۱۳۹۳-۱۴۰۲)

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای تهران طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ نشان داد که توزیع فضایی آلاینده‌ها و شاخص کیفیت هوا (AQI) با چهار مؤلفه شهری اصلی مرتبط است: تراکم جمعیت، کاربری اراضی، بافت فرسوده و شبکه راه‌های شریانی. نواحی مرکزی و جنوبی شهر بیشترین میزان آلودگی را تجربه کردند، در حالی که مناطق شمالی کیفیت هوای بهتری داشتند.

CO و NO₂ بیشترین تمرکز خود را در مناطق با تراکم جمعیت بالا و طول جاده‌های شریانی طولانی نشان دادند و عمدتاً در مناطق ۱۰، ۱۶، ۳، ۴ و ۱۰، ۱۱، ۱۶ متمرکز بودند. PM_{2.5} و PM₁₀ عمدتاً در نواحی صنعتی و بافت فرسوده مشاهده شدند و در مناطق ۱۹، شریف، فتح و شادآباد، میدان فتح متمرکز بودند. SO₂ نیز بیشتر در نواحی صنعتی جنوب و جنوب‌غرب، شامل مناطق ۱۰ و ۱۶ و پارک رازی مشاهده شد.

تحلیل شاخص AQI نشان داد که وضعیت «پاک» در شمال و شمال‌شرق شهر بیشترین روزها را شامل می‌شود، وضعیت «قابل قبول» غالب در مناطق میانی و غربی است، و «ناسالم برای گروه‌های حساس» در نواحی مرکزی و

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جنوبی دیده می‌شود. نواحی مرکزی و صنعتی دارای وضعیت «ناسالم» هستند و «بسیار ناسالم» عمدتاً در مناطق پرتراфик و صنعتی مشاهده شد. روزهای «خطرناک» بسیار محدود و تنها در چند ایستگاه پرتراكم ثبت شدند. بالاترین AQI در ایستگاه‌های شریف (۱۰۱,۳۳) و شادآباد (۹۹,۸۴) ثبت شد و بیشترین تعداد روزهای پاک در اقدسیه و دروس مشاهده گردید.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که تمرکز آلودگی در بخش‌های مرکزی، جنوبی و صنعتی نتیجه همگرایی عوامل انسانی مانند تراكم جمعیت، ترافیک و فعالیت صنعتی و عوامل فیزیکی شامل بافت فرسوده و ارتفاع ساختمان‌ها است. تحلیل درصد روزهای مختلف AQI نیز بیانگر آن است که بیشتر روزها در وضعیت قابل قبول قرار دارند، اما نقاط بحرانی مشخص نیازمند مداخلات فضا محور هستند.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که الگوی توزیع مکانی و زمانی شاخص کیفیت هوا در ایستگاه‌های سنجش تهران ساختاری پیچیده و چندلایه دارد که متأثر از هم‌زمانی عوامل انسانی و طبیعی است. در نواحی با تراكم بالای جمعیت، مجاورت با محورهای ترافیکی اصلی و وجود بافت‌های فرسوده شهری، میزان غلظت آلاینده‌ها به‌طور محسوسی بالاتر بوده و این امر نشان‌دهنده پیوند مستقیم میان ویژگی‌های کالبدی شهر و شدت آلودگی هوا است (ملک حسینی و سلیمانی، ۱۳۹۷؛ غیبی‌لو و همکاران، ۱۳۹۰). استقرار کاربری‌های صنعتی و تجاری در نزدیکی این مناطق، همراه با حجم بالای تردد وسایل نقلیه شخصی و ناوگان حمل‌ونقل بار، به‌عنوان عوامل تشدیدکننده آلودگی عمل کرده و این اثرات در فصول سرد سال و به‌ویژه در ساعات اوج ترافیک نمود بیشتری یافته است (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴).

یافته‌ها نشان داد که PM_{2.5} بیشترین نقش را در کاهش کیفیت هوا ایفا کرده و در اکثر ایستگاه‌ها از حد استاندارد فراتر رفته است، به‌ویژه در مناطق متراكم و با بافت فرسوده شهری. ارتباط فضایی این آلاینده با جاده‌های اصلی و سطوح نفوذناپذیر بیانگر نقش کلیدی منابع حمل‌ونقل و فعالیت‌های شهری در تولید آن است. PM₁₀ نیز الگویی مشابه اما با پراکندگی وسیع‌تر نشان داد که ناشی از ترکیب منابع محلی و فعالیت‌های انسانی با پدیده‌های طبیعی همچون گرد و غبار است (احمدی و همکاران، ۱۴۰۲). آلاینده CO بیشترین غلظت را در طول مسیرهای اصلی حمل‌ونقل داشت و این موضوع نقش وسایل نقلیه سوخت فسیلی را به‌عنوان مهم‌ترین منبع انتشار این آلاینده تأیید می‌کند. NO₂ نیز در راستای تراكم ترافیک و نزدیکی به مراکز جمعیتی پرتراكم بود و نشان داد که منابع خطی انتشار، نقشی غالب در تولید آن دارند. در مورد SO₂، تمرکز بالاتر در مناطق صنعتی و اطراف مراکز سوخت و انرژی ثبت شد که تأثیر مستقیم فعالیت‌های صنعتی و مصرف سوخت‌های فسیلی بر کیفیت هوا را برجسته می‌کند.

نتایج حاصل از شاخص کیفیت هوا (AQI) نیز نشان داد که اکثر ایستگاه‌ها دوره‌های مکرر شرایط «ناسالم» برای گروه‌های حساس» و در برخی موارد «ناسالم برای عموم» را تجربه کرده‌اند. تغییرات مکانی AQI با پراکنش فضایی آلاینده‌ها همخوانی داشته و مناطق مرکزی و صنعتی بیشترین ریسک را داشته‌اند. این یافته‌ها همسو با مطالعات پیشین، بر نقش غالب فعالیت‌های شهری، ترافیک و منابع صنعتی در شکل‌گیری الگوهای آلودگی صحنه می‌گذارد؛ با این حال، مزیت پژوهش حاضر نسبت به مطالعات گذشته، تحلیل بلندمدت یک دهه‌ای (۱۳۹۳-۱۴۰۲) و بررسی هم‌زمان چند آلاینده اصلی در مقیاس فضایی شهری است که امکان شناسایی همپوشانی آلاینده‌ها و تعیین نقاط

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بحرانی با دقت بالاتر را فراهم ساخته است. این ویژگی، نسبت به پژوهش‌های مقطعی و تک‌آلاینده‌ای قبلی، ارزش افزوده مهمی در حوزه مدیریت شهری دارد.

با وجود این دستاوردها، مطالعه حاضر با محدودیت‌هایی همراه است. نخست آنکه محاسبه AQI بر اساس میانگین سالانه انجام شد که ممکن است تغییرات کوتاه‌مدت (ساعتی و روزانه) را بازتاب ندهد و در نتیجه بر دقت نتایج اثرگذار باشد. دوم، داده‌های اقلیمی همچون سرعت باد، دما و پایداری جوی در این تحلیل لحاظ نشدند، در حالی که شرایط جوی نقشی اساسی در پراکنش و ماندگاری آلاینده‌ها ایفا می‌کند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران و سازمان فناوری اطلاعات و شهرداری تهران جهت ارائه داده‌ها، صمیمانه تشکر می‌نمایند. قابل یادآوری است که این پژوهش با کمک مالی از طرف بنیاد ملی علم ایران انجام گرفته است.

منابع

- انصاری، مریم؛ احمدی، محمود و گودرزی، غلامرضا. (۱۴۰۱). تحلیل فضایی کیفیت هوای شهر تهران با تأکید بر ذرات معلق (PM10 و PM2.5). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۲)، ۱۰۹-۱۲۸. doi: 10.22111/jneh.2021.37338.1759
- اسمعیلی محمودآبادی، ابادر؛ شمسی پور، علی اکبر و محمدی، حسین. (۱۴۰۴). شناسایی و تحلیل روند زمانی - مکانی امواج گرمایی در شهر تهران. *مدیریت مخاطرات محیطی*، 12(1)، 65-80. doi: 10.22059/jhsci.2025.389996.865
- آفریده، فایزه؛ رامشت، محمد حسین و مورتین، گراهام. (۱۴۰۰). تحلیل زمانی - مکانی شاخص کیفیت هوای شهر تهران در دوره ده ساله. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، 53(4)، 447-463. doi: 10.22059/jphgr.2021.324223.1007620
- بازگیر، سعید، قدیری معصوم، مجتبی، شمسی پور، علی اکبر و سیدی سرنجیان، شیوا (۱۳۹۴). تحلیل رابطه آلودگی هوای تهران با ترافیک و شرایط جو برای کاهش مخاطرات. *مدیریت مخاطرات محیطی*، 2(1)، 35-49. doi: 10.22059/jhsci.2015.53920
- بازگیر، سعید؛ فیروزی، زهرا؛ شمسی پور، علی اکبر و مقبل، معصومه. (۱۳۹۸). تحلیل فضایی شرایط محیطی کشاورزی شهری در کلان‌شهر تهران (مطالعه موردی: منطقه ۵). *پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری*، 111-125، 7(1). doi: 10.22059/jurbangeo.2019.262056.939
- رنجبر، محسن و باهک، بتول. (۱۳۹۸). تغییرات زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا با استفاده از GIS (مورد مطالعه: نیمه شمالی شهر تهران). *جغرافیا*، ۱۷(۶۰)، ۷۲-۸۵. <https://sid.ir/paper/374509/fa>
- زیاری، کرامت‌اله، واحدیان‌بیگی، لیلا و پرنون، زیبا. (۱۳۹۱). تحلیلی بر بحران زیست محیطی و توزیع مکانی فضای سبز شهر تهران. *مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای (توقف انتشار)*، ۴(۱۴)، ۱۰۱-۱۱۴.
- سلیمانی، فریبا، و ملک حسینی، عباس. (۱۴۰۰). پهنه بندی کیفیت هوای مناطق ۲۲ گانه شهر تهران با استفاده از GIS و روش‌های زمین‌آمار. *آمایش محیطی*، ۱۴(۵۲)، ۱۹-۴۴. Doi: 20.1001.1.2676783.1400.14.52.2.6
- شمسی پور، علی اکبر، اشرفی، الهام، علیخواه اصل، مرضیه و اشرفی، خسرو. (۱۳۹۴). مدل‌سازی الگوی پراکنش ذرات معلق در منطقه جنوب تهران (مطالعه موردی: کارخانه سیمان تهران) با مدل AERMOD. *محیط شناسی*، ۴(۴۱)، ۷۹۹-۸۱۴. doi: 10.22059/jes.2016.57134
- عیسی‌لو، علی‌اصغر و شاهمردی، بهزاد و بهرامی، سیروان و آقامیری، معصومه سادات. (۱۳۹۰). آسیب‌پذیری فضایی و بحران آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران، سومین همایش ملی عمران شهری، سنندج، <https://civilica.com/doc/130030>
- کریمی منش، احسان و پهلوان، الهه، ۱۳۹۸، مطالعه روند آلودگی هوای شهر تهران طی سالهای ۱۳۸۶ الی ۱۳۹۷ و ارتباط آن با توسعه پایدار، دومین همایش ملی سرمایه اجتماعی و توسعه پایدار، قم. <https://civilica.com/doc/974475>

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

کورکی نژاد، محمدحسن، شمسی‌پور، علی کبر و حبیبی، کیومرث. (۱۴۰۲). دستورالعمل‌های برنامه‌ریزی با نقشه‌های اقلیم شهری مطالعه موردی: شهر تهران. پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، ۳(۱۱)، ۱-۲۰. [doi: 10.22059/jurbangeo.2023.351363.1759](https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2023.351363.1759)

کهراری، پریسا؛ خالدی، شهریار؛ کیخسروی، قاسم و علوی، سید جلیل. (۱۴۰۴). بررسی اثرات آلاینده‌های جوی معیار و پارامترهای هواشناسی بر تغییر غلظت کربن سیاه در تهران و تبریز. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴(۴۳)، ۲۵-۵۸. [doi: 10.22111/jneh.2024.47935.2028](https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47935.2028)

گنجی، مسعود و آبروش، اکبر. (۱۳۹۷). یک مقیاس بهینه برای مقایسه آلودگی هوای شرق و غرب تهران. فصلنامه علوم محیطی، ۲(۱۶)، ۱۰۱-۱۱۰.

مهدیان ماهفروزی، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی اکبر و عزیزی، قاسم. (۱۳۹۴). اثرات گسترش فضای سبز بر الگوی جزیره گرمایی شهری (مطالعه موردی: بوستان ولایت). پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، ۳(۱)، ۸۵-۹۹. [doi: 10.22059/jurbangeo.2015.54441.99-85](https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2015.54441.99-85)

Bitjukova, V. and Kasimov, N. (2012). Atmospheric pollution of Russia's cities: Assessment of emissions and immissions based on statistical data, *The Journal of Geofizika*, Vol. 29, PP. 53- 67.

E. V. Schneidmesser, P.S. Monks, J.D. Allan, L. Bruhwiler, P. Forster, D. Fowler, A. Lauer, W.T. Morgan, P. Paasonen, M. Righi, K. Sindelarova, M.A. Sutton, *Chem. Rev.* 115(10), 3856-3897 (2015).

G.P. Bala, R.M. Rajnoveanu, E. Tudorache, R. Motisan, C. Oancea, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 19615-19628 (2021).

Garg, S., Thakur, D., Singh, R., Rajor, A., & Dhir, A. (2019). Seasonal and spatial variation of particulate aerosols and carbonaceous species in PM_{2.5} in the periphery of Chandigarh, India. *MAPAN*, 34(2), 217-224.

Heidarinejad, Z., Kavosi, A., Mousapour, H., Daryabor, M. R., Radfard, M., & Abdolshahi, A. (2018). Data on the evaluation of AQI for different seasons in Kerman, Iran, 2015. *Data in brief*, 20, 1917.

Hossein, M.A., Hoque, A. (2018) Variation of Ambient Air Quality Scenario in Chittagong City: A Case Study of Air Pollution, *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, 3(1): 10-16. [DOI: 10.11648/j.jccee.20180301.13](https://doi.org/10.11648/j.jccee.20180301.13)

K. Bodor, R. Szep, Z. Bodor, *Toxicol. Rep.* 9, 556-562 (2022).

Kumar P, Hama S, Nogueira T, Abbass RA, Brand VS, Andrade MF, Asfaw A, Aziz KH, Cao SJ, El-Gendy A, Islam S, Jeba F, Khare M, Mamuya SH, Martinez J, Meng MR, Morawska L, Muula AS, Shiva Nagendra SM, Ngowi AV, Omer K, Olaya Y, Osano P, Salam A. In-car particulate matter exposure across ten global cities. *Sci Total Environ.* 2021 Jan 1;750:141395. [doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141395](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141395).

Monoson A, Schott E, Ard K, Kilburg-Basnyat B, Tighe RM, Pannu S, Gowdy KM. 2023. Air Pollution and respiratory infections: the past, present, and future. *Toxicol Sci.* 192(1):3-14. [doi:10.1093/toxsci/kfad003](https://doi.org/10.1093/toxsci/kfad003).

Nasir, R., Meng, H., Ahmad, S. R., Waseem, L. A., Naqvi, S. A. A., Shahid, M., ... & Tariq, A. (2024). Towards sustainable transportation: A case study analysis of climate-responsive strategies in a developing nation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104117. [doi:10.1016/j.cse.2024.104117](https://doi.org/10.1016/j.cse.2024.104117)

ourworldindata.org(2017). [ourworldindata.org\(2017\)](https://ourworldindata.org/2017). Qi G, Che J, Wang Z. (2023). Differential effects of urbanization on air pollution: Evidence from six Air pollutants in mainland China. *Ecol Indic.* 146(2):109924. [doi:10.1016/j.ecolind.2023.109924](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109924).

Saxena, V. (2025). Water quality, air pollution, and climate change: investigating the environmental impacts of industrialization and urbanization. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(2), 73.

Shad, Roozbeh, Ashoori, H, and Afshari, N. (2007). Evaluation Of Optimum Methods For Predicting Pollution Concentration In GIS Environment, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng. K.N.Toosi University of Technology.

Verma, MK.; Patel, A.; Sahariah, BP. and Choudhari, JK. (2016). Computation of Air Quality Index for Major Cities of Chhattisgarh State. *Environmental Claims Journal*, 28(3): 195-205.

Waheed, F., Ehsan, N., Nasir, R., Khan, W. A., Khokhar, M. F., Shahzad, L., ... & Uz Zaman, Q. (2025). Geo-spatial distribution of air pollutants in urban areas and its potential health risk analysis solutions. *Urban Climate*, 61, 102380.

Wang Y, Yao L, Xu Y, Sun S, Li T. 2021. Potential heterogeneity in the relationship between Urbanization and air pollution from the perspective of urban agglomeration. *J Clean Prod.* 298:126822. [doi:10.1016/j.jclepro.2021.126822](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126822).

Wang, M., Kim, R. Y., Kohonen-Corish, M. R., Chen, H., Donovan, C., & Oliver, B. G. (2025). Particulate matter air pollution as a cause of lung cancer: epidemiological and experimental evidence. *British Journal of Cancer*, 1-11.

Wen, X., Zhang, P., & Liu, D. (2018). Spatiotemporal variations and influencing factors analysis of PM_{2.5} concentrations in Jilin Province, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 28(5), 810-822. <https://doi.org/10.1007/s11769-018-0992-0>.

WHO, Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data, <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data> (2022).

WHO. (2021). Pesticide residues in food - 2019: toxicological evaluations (Extra), Extra Joint Meeting of the FAO Panel of Experts on Pesticide Residues in Food and the Environment and the WHO Core Assessment Group on Pesticide Residues, Gatineau, Canada, 7-17 May 2019.

Y. Gu, D.K. Henze, M.O. Nawaz, H. Cao, U.J. Wagner, *GeoHealth* 7, e2022GH000767 (2023).

Zareba, M., Weglinska, E., & Danek, T. (2024). Air pollution seasons in urban moderate climate areas through big data analytics. *Scientific Reports*, 14(1), 3058.