University of Sistan and Baluchestan

Geography and Development

Print ISSN: 1735 - 0735 Online ISSN: 2676-7791

Homepage: https://gdij.usb.ac.ir

Investigating the Impacts of Urban form and Meteorological Parameters on Air Pollution in Tehran and Tabriz

Parisa Kahrari[1], Shahriar Khaledi[2], Ghasem Keikhosravi[3]✉, Seyed Jalil Alavi[4]

1. Ph. D Student of Climatology, Department of Natural Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
   E-mail: p_kahrari@sbu.ac.ir
2. Professor of Climatology, Department of Natural Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
   E-mail: s-khaledi@sbu.ac.ir
3. Assistant Professor of Climatology, Department of Natural Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
   ✉ E-mail: gh_keikhosravi@sbu.ac.i r
4. Associate Professor of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modarres University, Mazandaran, Iran
   E-mail: j.alavi@modares.ac.ir

How to Cite: Kahrari, P; Khaledi, Sh, Keikhosravi, Gh; & Alavi, S J. (2025). Investigating the Impacts of Urban form and Meteorological Parameters on Air Pollution in Tehran and Tabriz. *Geography and Development*, 23 (79), 103-132.

DOI: http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2025.48916.3654

Received:
3 June 2024
Received in revised form:
25 December 2024
Accepted:
5 February 2025
Published online:
10 June 2025

Keywords:
Atmospheric pollutants,
Meteorological parameters,
Landscape metrics,
Land use,
Random forest.

ABSTRACT

Urban form significantly affects the generation and emission of air pollutants. Therefore, better knowledge of the relationship between urban form and air pollution can have important implications for improving air quality by optimizing urban planning and management policies. The purpose of this study was to investigate the association between urban form and the air pollutants CO, NO_2, SO_2, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, and BC in Tehran and Tabriz and their climatic interactions during 2015-2021. This goal was achieved using Spearman's correlation analysis and calculation of landscape metrics related to urban size, shape, fragmentation, compactness, and sprawl based on the Dynamic World land use data with a resolution of 10×10 meters in the Google Earth Engine and R 4.3.3 software. The random forest (RF) and multiple linear regression (MLR) models were applied to determine the effects of urban form on pollutants. The results demonstrate that urban form played a crucial role in the generation and emission of air pollutants in Tehran and Tabriz during the study period. In addition, the mechanisms by which urban form affects air pollution are quite different for some pollutants, considering the differences in the regional characteristics of these cities ,including population, climatic conditions, and industrial structure. Meteorological parameters significantly influence the relationship between urban form characteristics and the concentrations of atmospheric pollutants in Tehran and Tabriz.

 Publisher: University of Sistan and Baluchestan

1. Introduction

Rapid urbanization has emerged as a powerful catalyst for economic growth and social advancement, particularly in developing nations. However, this rapid progress comes with serious environmental repercussions, notably the alarming rise in air pollution. Given the serious threat that air pollution poses to the environment and public health, reducing air pollutant concentrations through effective urban planning has

become a common concern among urban planners and policymakers. In this context, urban form plays a critical role in either intensifying or mitigating air pollution. Therefore, understanding the impact of urban form on air quality has become a key focus in recent urban planning and environmental studies. Such research can provide valuable insights for developing strategies aimed at designing healthier, more efficient, and livable cities. A review of domestic research literature shows that no comprehensive study has been conducted to date on the effects of urban form on air pollutant concentrations. Therefore, the present study aims to investigate how various characteristics of urban form, including size, shape, fragmentation, compactness, and dispersion, affect the concentrations of criteria air pollutants (carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2), sulfur dioxide (SO_2), ozone (O_3), particulate matters (PM_{10} and $PM_{2.5}$)), and black carbon (BC) particles in the two cities of Tabriz and Tehran, considering temperature, precipitation, and wind speed as control factors during 2015-2021.

2. Materials and Methods

The present study is applied research conducted using a descriptive-analytical method and a comparative approach. The geographical scope of this research encompasses the cities of Tehran and Tabriz. The data used in this study include concentrations of air pollutants, urban form metrics, and meteorological parameters during the period from July 1, 2015, to July 1, 2021. Information on the concentrations of criteria air pollutants at urban air quality monitoring stations was obtained from the Tehran Air Quality Control Company and the Air Pollution Monitoring Center of Tabriz**.** Additionally, black carbon particle concentrations were extracted from the MERRA-2 reanalysis model data available in the Google Earth Engine platform. Mean values of meteorological parameters including temperature, precipitation, and wind speed were acquired from synoptic stations in Tehran and Tabriz, provided by the Iran Meteorological Organization. For statistical analysis, R software (version 4.3.3) was used. Metrics measuring various aspects of urban form such as size, shape, fragmentation, compactness, and dispersion were calculated using the landscapemetrics package in R, based on monthly Dynamic World land-use data (10-meter resolution) from Google Earth Engine. The relationships between air pollutants, urban form metrics, and meteorological parameters were analyzed using appropriate correlation methods (selected based on data distribution) with the corrplot package**.** To identify the most influential meteorological factors and urban form characteristics affecting pollutant concentrations in Tehran and Tabriz, machine learning algorithms including multiple linear regression (MLR) and random forest (RF) were implemented using the tidymodels package. Model performance was evaluated based on the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) of validation (testing).

3. Results and Discussion

A comparison of the mean values of urban form indices in Tehran and Tabriz, based on land cover/use data from 2015 to 2021, indicates that the built-up urban area in Tehran is larger than in Tabriz. Moreover, the urban form of Tehran is more complex, fragmented, and compact compared to that of Tabriz. The results of this study reveal that urban form characteristics have a significant impact on the variation in atmospheric pollutant concentrations in both cities. Specifically, an increase in city size is associated with improved air quality in terms of lower concentrations of CO, SO_2, and O_3, but with deteriorated air quality concerning NO_2, $PM_{2.5}$, and black carbon (BC). Furthermore, increased shape complexity in Tehran was linked to higher concentrations of NO_2, PM_{10}, and $PM_{2.5}$. The findings also indicate that high fragmentation of urban structure corresponds with increased concentrations of NO_2, O_3, and PM_{10}, while reducing SO_2 and BC levels. In addition, greater urban sprawl led to a decline in air quality in terms of SO_2, O_3, and PM_{10}, but improved air quality with respect to gaseous NO_2 and fine particulate matter ($PM_{2.5}$ and BC). On the other hand, different urban forms indirectly influence the dispersion of air pollutants in Tehran and Tabriz through mediating meteorological parameters such as temperature, precipitation, and wind speed. Various aspects of urban form including size, fragmentation, compactness, and dispersion are associated with the formation of urban heat islands. Through

their effect on ambient temperature, these factors influence the concentrations and spatial distribution of NO_2, O_3, $PM_{2.5}$, and BC in both cities. According to the findings, the size, density, and fragmentation of Tehran's urban form indirectly affect the distribution of O_3, PM_{10}, and BC via their influence on precipitation. Moreover, shape complexity and urban sprawl in Tehran, as well as the size, fragmentation, and density of Tabriz's urban form, impact the accumulation or dispersion of pollutants in both cities by influencing wind speed.

4. Conclusion

The findings of this study clearly demonstrate that the physical form and structure of cities play a significant role in determining the concentration levels of atmospheric pollutants. Elements such as size, density, shape complexity, sprawl, and fragmentation not only have direct impacts on air quality but also exert indirect effects through their interaction with climatic factors like temperature, precipitation, and wind speed. These results highlight the importance of integrating environmental considerations into urban planning and design processes and underscore the need for formulating sustainable urban development policies aimed at improving air quality and enhancing environmental health in large cities. Especially in metropolises such as Tehran and Tabriz, adopting data-driven approaches and utilizing urban form indicators can provide a more effective pathway for mitigating air pollution.

Keywords: Atmospheric pollutants, Meteorological parameters, Landscape metrics, Land use, Random forest.

5. References

Bartholomew, K., & Ewing, R (2008). Land use–transportation scenarios and future vehicle travel and land consumption: A meta-analysis. Journal of the American Planning Association, Vol. 75, No. 1, 13-27. https://doi.org/10.1080/01944360802508726

Bereitschaft, B., & Debbage, K (2013). Urban form, air pollution, and CO2 emissions in large US metropolitan areas. The Professional Geographer, Vol. 65, No, 4, 612-635. https://doi.org/10.1080/00330124.2013.799991

Boehmke, B., & Greenwell, B.M (2019). Hands-on machine learning with R. Chapman and Hall/CRC., 1st Eds, 514p. https://doi.org/10.1201/9780367816377

Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S.B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V.J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., & Schwehr, K (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data, Vol. 9, No. 1, 251. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4

Calderón-Garcidueñas, L., & Villarreal-Ríos, R (2017). Living close to heavy traffic roads, air pollution, and dementia. The Lancet, Vol. 389, No. 10070, 675-677. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)32596-X

Chen, Y., Li, X., Zheng, Y., Guan, Y., & Liu, X (2011). Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: A case study in the Pearl River Delta, 2005–2008. Landscape and urban planning, Vol. 102, No. 1, 33-42. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.007

Chen, Z., Xie, X., Cai, J., Chen, D., Gao, B., He, B., Cheng, N., & Xu, B (2018). Understanding meteorological influences on PM2.5 concentrations across China: a temporal and spatial perspective. Atmospheric Chemistry and Physics, Vol. 18, No. 8, 5343-5358. https://doi.org/10.5194/acp-18-5343-2018

Du, G., Shin, K.J., & Managi, S (2018). Variability in impact of air pollution on subjective well-being. Atmospheric Environment, Vol. 183, 175-208. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.018

Ene, E., & McGarigal, K (2023). FRAGSTATS User Guidelines.
https://www.fragstats.org/index.php/documentation

Fan, C., Tian, L., Zhou, L., Hou, D., Song, Y., Qiao, X., & Li, J (2018). Examining the impacts of urban form on air pollutant emissions: Evidence from China. Journal of Environmental Management, Vol. 212, 405-414.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.001

Fan, W., Wang, H., Liu, Y., & Liu, H (2020). Spatio-temporal variation of the coupling relationship between urbanization and air quality: A case study of Shandong Province. Journal of Cleaner Production, Vol. 272, 122812.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122812

Fang, C., Wang, S., & Li, G (2015). Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: A case study of 30 provincial capital cities. Applied energy, Vol. 158, 519-531.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.095

Gao, G., Pueppke, S.G., Tao, Q., Wei, J., Ou, W., & Tao, Y (2023). Effect of urban form on PM2.5 concentrations in urban agglomerations of China: Insights from different urbanization levels and seasons. Journal of Environmental Management, Vol. 327, 116953.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116953

General Department of Environmental Protection of East Azarbaijan Province. Air pollution monitoring and control center of Tabriz city. (In Persian).
https://as.doe.ir/

Ghadami, M., & Abdollahvand, H (2018). The Impact of Urban Spatial Structure Scenarios on Air Pollution (A Case Study of Tehran). Geography and Urban Space Development, Vol. 5, No. 1, 261-280. (In Persian).
https://doi.org/10.22067/gusd.v5i1.73356

Ghadami, M., & Yousefiyan, P (2014). Analysis of the changes in spatial structure to an aversion of the air pollution in Esfahan city. Urban Structure and Function Studies, Vol. 2, No. 8, 63-86. (In Persian).

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015). MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d, 1-Hourly, Time-averaged, single-level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: March 20, 2024.
https://doi.org/10.5067/KLICLTZ8EM9D

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote sensing of Environment, Vol. 202, 18-27.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Greenwell, B. M., Boehmke, B. C., & Gray, B (2020). Variable Importance Plots-An Introduction to the vip Package. The R Journal, Vol. 12, No. 1, 343-366.
https://doi.org/10.32614/rj-2020-013

Hankey, S., & Marshall, J.D (2017). Urban form, air pollution, and health. Current environmental health reports, Vol. 4, 491-503.
https://doi.org/10.1007/s40572-017-0167-7

Hassan, N.A., Hashim, Z., & Hashim, J.H (2016). Impact of climate change on air quality and public health in urban areas. Asia Pacific Journal of Public Health, Vol. 28, No. 2_suppl, 38S-48S.
https://doi.org/10.1177/1010539515592951

Hesselbarth, M. H., Sciaini, M., With, K. A., Wiegand, K., & Nowosad, J (2019). Landscapemetrics: an open- source R tool to calculate landscape metrics. Ecography, Vol. 42, No. 10, 1648-1657.
https://doi.org/10.1111/ecog.04617

Higgins, C.D., Adams, M.D., Réquia, W.J., & Mohamed, M (2019). Accessibility, air pollution, and congestion: Capturing spatial trade-offs from agglomeration in the property market. Land Use Policy, Vol. 84, 177-191.
https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.002

Hossein Abadi, N., Tavousi, T., Mofidi, A., & Khosravi, M (2019). A Comparative Study on the Trend of Temperature Inversions in Iranian Metropolises; Tehran, Mashhad and Tabriz. Physical Geography Research, Vol. 51, No. 4, 693-713. (In Persian).
https://doi.org/10.22059/JPHGR.2019.277884.1007353

Huang, Q., Xu, C., Jiang, W., Yue, W., Rong, Q., Gu, Z., & Su, M (2021). Urban compactness and patch complexity influence PM2.5 concentrations in contrasting ways: Evidence from the Guangdong-Hong Kong Macao Greater Bay Area of China. Ecological Indicators, Vol. 133, 108407.
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108407

Huang, Y.D., Hou, R.W., Liu, Z.Y., Song, Y., Cui, P.Y., & Kim, C.N (2019). Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon. Aerosol and Air Quality Research, Vol. 19, No. 5, 1152-1171.
https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0344

Ikram, M., Yan, Z., Liu, Y., & Qu, W (2015). Seasonal effects of temperature fluctuations on air quality and respiratory disease: a study in Beijing. Natural Hazards, Vol. 79, No. 2, 833-853.
https://doi.org/10.1007/s11069-015-1879-3

Iran Meteorological Organization. Meteorological data request system. (In Persian).
https://data.irimo.ir/

Johnson, T., Mol, A.P., Zhang, L., & Yang, S (2017). Living under the dome: Individual strategies against air pollution in Beijing. Habitat International, Vol. 59, 110-117.
https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.11.014

Korkmaz, S., Göksülük, D., & Zararsiz, G. Ö. K. M. E. N (2014). MVN: An R package for assessing multivariate normality. The R Journal, Vol. 6, No. 2, 151-162.
https://doi.org/10.32614/RJ-2014-031

Kuhn, M., & Wickham, H (2020). Tidymodels: A Collection of Packages for Modeling and Machine Learning using Tidyverse Principles.
https://doi.org/10.32614/CRAN.package.tidymodels

Lee, C (2019). Impacts of urban form on air quality in metropolitan areas in the United States. Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 77, 101362.
https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101362

Lee, C (2020). Impacts of multi-scale urban form on PM2.5 concentrations using continuous surface estimates with high-resolution in US metropolitan areas. Landscape and Urban Planning, Vol. 204, 103935.
https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103935

Li, F., & Zhou, T (2019). Effects of urban form on air quality in China: An analysis based on the spatial autoregressive model. Cities, Vol. 89, 130-140.
https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.025

Li, F., Zhou, T., & Lan, F (2021). Relationships between urban form and air quality at different spatial scales: A case study from northern China. Ecological Indicators, Vol. 121, 107029.
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107029

Liang, Z., Wu, S., Wang, Y., Wei, F., Huang, J., Shen, J., & Li, S (2020). The relationship between urban form and heat island intensity along the urban development gradients. Science of the Total Environment, Vol. 708, 135011.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135011

Lin, B., & Zhu, J (2018). Changes in urban air quality during urbanization in China. Journal of Cleaner Production, Vol. 188, 312-321.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.293

Liu, Y., Arp, H.P.H., Song, X., & Song, Y (2017). Research on the relationship between urban form and urban smog in China. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, Vol. 44, No. 2, 328-342.
https://doi.org/10.1177/0265813515624687

Liu, Y., Wu, J., Yu, D., & Ma, Q (2018). The relationship between urban form and air pollution depends on seasonality and city size. Environmental Science and Pollution Research, Vol. 25, No. 16, 15554-15567. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1743-6

Lu, C., & Liu, Y (2016). Effects of China's urban form on urban air quality. Urban studies, Vol. 53, No. 12, 2607-2623. https://doi.org/10.1177/0042098015594080

McCarty, J., & Kaza, N (2015). Urban form and air quality in the United States. Landscape and Urban Planning, Vol. 139, 168-179. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.03.008

Miao, Z., Chen, X., & Baležentis, T (2021). Improving energy use and mitigating pollutant emissions across "Three Regions and Ten Urban Agglomerations": A city-level productivity growth decomposition. Applied Energy, Vol. 283, 116296. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116296

Mou, Y., Song, Y., Xu, Q., He, Q., & Hu, A (2018). Influence of urban-growth pattern on air quality in China: A study of 338 cities. International journal of environmental research and public health, Vol. 15, No. 9, 1805. https://doi.org/10.3390/ijerph15091805

Mukaka, M. M (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. Malawi medical journal, Vol. 24, No. 3, 69-71. PMID: 23638278; PMCID: PMC3576830.

Municipality of Tehran. (In Persian). Air Quality Control Company. (In Persian). https://air.tehran.ir/

Ouyang, X., Wei, X., Li, Y., Wang, X.C., & Klemeš, J.J (2021). Impacts of urban land morphology on PM2.5 concentration in the urban agglomerations of China. Journal of Environmental Management, Vol. 283, 112000. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112000

Rodríguez, M.C., Dupont-Courtade, L., & Oueslati, W (2016). Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 53, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.190

Ryu, C (2022). Dlookr: Tools for data diagnosis, exploration, transformation. R package version 0.6.2.9001. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dlookr

Sarvar, H., Esmailpour, M., Kirizadeh, M., & Amraei, M (2020). Spatial analysis of factors affecting air pollution in Tabriz city. Journal of Natural Environmental Hazards, Vol. 9, No. 24, 151-172. (In Persian). https://doi.org/10.22111/jneh.2020.31469.1558

She, Q., Peng, X., Xu, Q., Long, L., Wei, N., Liu, M., Jia, W., Zhou, T., Han, J., & Xiang, W (2017). Air quality and its response to satellite-derived urban form in the Yangtze River Delta, China. Ecological Indicators, Vol. 75, 297-306. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.045

Shi, K., Li, Y., Chen, Y., Li, L., & Huang, C (2019). How does the urban form-PM2.5 concentration relationship change seasonally in Chinese cities? A comparative analysis between national and urban agglomeration scales. Journal of cleaner production, Vol. 239, 118088. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118088

Spearman, C (1961). The proof and measurement of association between two things. In J. J. Jenkins & D. G. Paterson (Eds.), Studies in individual differences: The search for intelligence (45-58). Appleton-Century-Crofts. https://doi.org/10.1037/11491-005

Stankovic, S., Vaskovic, V., Petrovic, N., & Radojicic, Z (2012). Sustainable air pollution management in urban areas caused by traffic: Case study Banja Luka. Technics Technologies Education Management–TTEM, Vol. 7, No. 4, 1615-1619. https://rfos.fon.bg.ac.rs/handle/123456789/986

Stekhoven, D. J., & Bühlmann, P (2012). MissForest-non-parametric missing value imputation for mixed-type data. Bioinformatics, Vol. 28, No. 1, 112-118.
https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597

Stone Jr, B (2008). Urban sprawl and air quality in large US cities. Journal of environmental management, Vol. 86, No. 4, 688-698.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.034

Sun, C., Chen, X., Zhang, S., & Li, T (2022). Can changes in urban form affect PM2.5 concentration? A comparative analysis from 286 prefecture-level cities in China. Sustainability, Vol. 14, No. 4, 2187.
https://doi.org/10.3390/su14042187

Sun, J., Zhou, T., & Wang, D (2022). Relationships between urban form and air quality: a reconsideration based on evidence from China's five urban agglomerations during the COVID-19 pandemic. Land Use Policy, Vol. 118, 106155.
https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106155

Tao, Y., Zhang, Z., Ou, W., Guo, J., & Pueppke, S.G (2020). How does urban form influence PM2.5 concentrations: Insights from 350 different-sized cities in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region of China, 1998–2015? Cities, Vol. 98, 102581.
https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102581

Tian, Y., Yao, X.A., Mu, L., Fan, Q., & Liu, Y (2020). Integrating meteorological factors for better understanding of the urban form-air quality relationship. Landscape Ecology, Vol. 35, 2357-2373.
https://doi.org/10.1007/s10980-020-01094-6

Waked, A., Afif, C., & Seigneur, C (2015). Assessment of source contributions to air pollution in Beirut, Lebanon: a comparison of source-based and tracer-based modeling approaches. Air Quality, Atmosphere & Health, Vol. 8, 495-505.
https://doi.org/10.1007/s11869-014-0298-z

Wang, D., Zhou, T., & Sun, J (2022). Effects of urban form on air quality: A case study from China comparing years with normal and reduced human activity due to the COVID-19 pandemic. Cities, Vol. 131, 104040.
https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104040

Wang, J., Wang, S., & Li, S (2019). Examining the spatially varying effects of factors on PM2.5 concentrations in Chinese cities using geographically weighted regression modeling. Environmental pollution, Vol. 248, 792-803.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.081

Wang, K.L., Pang, S.Q., Ding, L.L., & Miao, Z (2020). Combining the biennial Malmquist–Luenberger index and panel quantile regression to analyze the green total factor productivity of the industrial sector in China. Science of the Total Environment, Vol. 739, 140280.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140280

Wei, T., & Simko, V.R (2021). Package "Corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92). Package Corrplot for R Software.
https://doi.org/10.32614/CRAN.package.corrplot

Yin, C., Yuan, M., Lu, Y., Huang, Y., & Liu, Y (2018). Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model. Science of the Total Environment, Vol. 634, 696-704.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.350

Yuan, M., Song, Y., Huang, Y., Hong, S., & Huang, L (2018). Exploring the association between urban form and air quality in China. Journal of Planning Education and Research, Vol. 38, No. 4, 413-426.
https://doi.org/10.1177/0739456X17711516

Zaki, S.A., Shuhaimi, S.S., Mohammad, A.F., Ali, M.S.M., Jamaludin, K.R., & Ahmad, M.I (2022). Development of a Prediction Model of the Pedestrian Mean Velocity Based on LES of Random Building Arrays. Buildings, Vol. 12, No. 9, 1362.
https://doi.org/10.3390/buildings12091362

Zhang, Y., Pang, X., Xia, J., Shao, Q., Yu, E., Zhao, T., She, D., Sun, J., Yu, J., Pan, X., & Zhai, X (2019). Regional patterns of extreme precipitation and urban signatures in metropolitan areas. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 124, No. 2, 641-663.
https://doi.org/10.1029/2018JD029718

Zhao, M., Cai, H., Qiao, Z., & Xu, X (2016). Influence of urban expansion on the urban heat island effect in Shanghai. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 30, No. 12, 2421-2441.
https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1178389

Zhao, X., Zhou, W., Wu, T., & Han, L (2022). The impacts of urban structure on PM2.5 pollution depend on city size and location. Environmental Pollution, Vol. 292, 118302.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118302

Zheng, L., & Na, M (2020). A pollution paradox? The political economy of environmental inspection and air pollution in China. Energy Research & Social Science, Vol. 70, 101773.
https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101773

Zhou, C., Li, S., & Wang, S (2018). Examining the impacts of urban form on air pollution in developing countries: A case study of China's megacities. International journal of environmental research and public health, Vol. 15, No. 8, 1565.
https://doi.org/10.3390/ijerph15081565

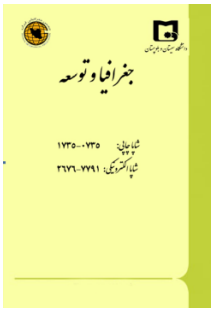
جغرافیا و توسعه
شاپا چاپی: ۰۷۳۵-۱۷۳۵ شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۱-۲۶۷۶
https://gdij.usb.ir
دانشگاه سیستان و بلوچستان

بررسی اثرات فرم شهری و عناصر هواشناسی بر آلودگی هوای تهران و تبریز

پریسا کهراری[۱]، دکتر شهریار خالدی[۲]، دکتر قاسم کیخسروی[۳*]، دکتر سیدجلیل علوی[۴]

مقاله پژوهشی

جغرافیا و توسعه، شمارهٔ ۷۹، تابستان ۱۴۰۴
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷
صفحات: ۱۳۲-۱۰۳



واژه‌های کلیدی:
آلاینده‌های جوی، پارامترهای هواشناسی، سنجه‌های سیمای سرزمین، کاربری اراضی، جنگل تصادفی.

چکیده

فرم شهری، به‌طور چشمگیری بر تولید و انتشار آلاینده‌های هوا تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین شناخت رابطهٔ بین فرم شهری و آلودگی هوا می‌تواند با بهینه‌سازی سیاست‌های برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، پیامدهای مهمی در زمینهٔ بهبود کیفیت هوا داشته باشد. هدف مطالعهٔ حاضر بررسی ارتباط فرم شهری با غلظت آلاینده‌های CO، NO_2، SO_2، O_3، PM_{10}، $PM_{2.5}$ و BC در تهران و تبریز و بازخوردهای آب‌وهوایی آن‌ها در طول ۲۰۲۱ -۲۰۱۵ است. این هدف با محاسبهٔ سنجه‌های سیمای سرزمین مرتبط با ویژگی‌های مختلف فرم شهری شامل اندازه، شکل، تکه‌تکه‌شدگی، فشردگی و پراکندگی براساس سری زمانی داده‌های کاربری اراضی ماهانه «Dynamic World» با دقت ۱۰ متر در سامانهٔ «گوگل‌ارث-انجین» و نرم‌افزار R4.3.3 و به‌کارگیری تحلیل همبستگی اسپیرمن و مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و جنگل تصادفی (RF) محقق شد. نتایج این پژوهش نشان‌می‌دهد که فرم شهری، نقش بسیار مهمی در تولید و انتشار آلاینده‌های هوا در شهرهای تهران و تبریز در طول دورهٔ آماری مورد مطالعه ایفا کرده است. علاوه بر این، مکانیسمی که توسط آن فرم شهری بر سطح غلظت آلاینده‌های هوا در تهران و تبریز تأثیر می‌گذارد، با توجه به تفاوت در ویژگی‌های منطقه‌ای این شهرها از جمله جمعیت، شرایط آب‌وهوایی و ساختار صنعتی برای برخی از آلاینده‌ها نسبتاً متفاوت است. در تهران پارامترهای هواشناسی دما، بارش و سرعت باد و در تبریز دما و سرعت باد نقش مهمی در ارتباط شاخص‌های فرم شهری با غلظت آلاینده‌های جوی دارند.

مقدمه

رشد سریع شهرنشینی در جهان امروز علی‌رغم توسعهٔ اجتماعی-اقتصادی و بهبود وضعیت رفاهی جوامع، با افزایش خطرات زیست‌محیطی به‌ویژه در شهرهای دارای زیرساخت‌های ضعیف همراه بوده است. آلودگی هوا یکی از جدی‌ترین مشکلات ناشی از گسترش شهرنشینی است (*Zheng & Na, 2020: 101773*) که بهداشت عمومی و محیط زیست را تهدید می‌کند (*Calderón-Garcidueñas & Villarreal-Ríos, 2017: 676; Johnson et al, 2017: 110; Lin & Zhu, 2018: 312*) و حتی ممکن است ثبات اجتماعی را به خطر بیندازد (*Du et al, 2018: 175*)؛ بنابراین بهبود کیفیت هوا و کاهش فشار محیطی، تأثیرات چشمگیری بر شهرنشینی پایدار خواهد داشت (*Fan et al, 2020: 122812*). کیفیت هوا در محیط‌های شهری تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی (*Stankovic et al, 2012: 1615*)، منابع انتشار (*Bereitschaft & Debbage, 2013: 615; Waked et al, 2015: 495*)، توسعهٔ صنعتی (*Wang et al, 2020: 140280*)، مصرف انرژی (*Miao et al, 2021: 116296*) و عناصر آب‌وهوایی مانند: دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و فشار هوا قرار دارد (*Ikram et al, 2015: 833; Hassan et al, 2016: 38S; Tian et al, 2020: 2357*). از منظر جغرافیا نیز

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران p_kahrari@sbu.ac.ir
۲. استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران s-khaledi@sbu.ac.ir
۳. استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) gh_keikhosravi@sbu.ac.i r
۴. دانشیار جنگلداری، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، ایران j.alavi@modares.ac.ir

فرم شهری که به پیکربندی، ساختار و آرایش فضایی عناصر شهری و محیط فیزیکی متأثر از عوامل اجتماعی-طبیعی اشاره دارد، به‌طور قابل توجهی بر نحوهٔ عملکرد شهرها و میزان آلاینده‌های هوا تأثیر می‌گذارد (*Sun et al, 2022: 106155*)؛ از این‌رو، شناخت اثرات فرم شهری بر کیفیت هوا توجه بسیاری از برنامه‌ریزان شهری و متخصصان محیط زیست را به خود جلب کرده است (*Lu & Liu, 2016: 2607; Hankey & Marshall, 2017: 491*) و در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی ارتباط بین کیفیت هوا و فرم‌های شهری در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند (*Fan et al, 2018: 405; Yuan et al, 2018: 413; Lee, 2019: 101362; Li & Zhou, 2019: 130; Li et al, 2021: 107029*). این مطالعات معمولاً از سنجه‌های سیمای سرزمین مبتنی بر داده‌های کاربری اراضی برای کمی‌سازی و توصیف فرم شهری استفاده کرده و اثرات چشمگیر شاخص‌های معرف اندازه، شکل، تکه‌تکه‌شدگی، فشردگی و پراکندگی فرم شهری بر کیفیت هوا در مناطق شهری را تأیید کرده‌اند (*Yuan et al, 2018: 414*). همچنین یافته‌ها حاکی از آن است که تأثیر فرم شهری بر انتشار و غلظت آلاینده‌های هوا در مقیاس‌های فضایی مختلف مانند سطح کلان‌شهر و سطح جاده متفاوت است (*Lee, 2019: 101363*) و مطالعات مختلف اثرات متنوع و پیچیده‌ای را در این راستا گزارش کرده‌اند. به‌عنوان مثال، از نظر وسعت شهری، گسترش شهرها در نتیجهٔ افزایش مصرف انرژی، تولید صنعتی و حجم ترافیک شهری به افزایش غلظت آلاینده‌ها در جو می‌انجامد (*Chen et al, 2011: 33*) در حالی‌که براساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعهٔ مک کارتی و کازا (*McCarty & Kaza, 2015: 168*)، اندازهٔ شهر دارای رابطه‌ای معکوس با سطح غلظت آلاینده‌هاست. در بعد شکل شهری، مناظر نامنظم شهری با افزایش مسافت حرکت افراد از محل زندگی به محل کار، میزان و مدت زمان ترافیک را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد (*Fang et al, 2015: 519*). در مقابل، یافته‌های حاصل از پژوهش‌های شی و همکاران (*She et al, 2017: 297*) و لی و ژو (*Li & Zhou, 2019: 130*) نشان می‌دهد که شهرهای با شکل نامنظم، آلودگی هوای کمتری دارند. مطالعهٔ لو و لیو (*Lu & Liu, 2016: 2607*) نشان می‌دهد که کیفیت هوای شهرهای "X" شکل یا "H" شکل معمولاً به‌دلیل چند مرکزی بودن و کمک به کاهش ترافیک بسیار بهتر از شهرهای لوزی شکل است. تکه‌تکه‌شدگی منظر شهری نیز با توجه به تأثیر بسزای پراکنش فضایی متفاوت فعالیت‌ها در نقاط مختلف شهری بر تقاضای سفر و رفتار ترافیکی شهروندان، نقش مهمی در کیفیت هوا ایفا می‌کند و با غلظت آلاینده‌هایی مانند NO_2، PM_{10} و $PM_{2.5}$ همبستگی مثبت نشان داده است (*Bartholomew & Ewing, 2008: 13; Chen et al, 2011: 33; McCarty & Kaza, 2015: 168; Rodríguez et al, 2016: 1; Liu et al, 2018: 15554; Zhou & Wang, 2018: 1565*). فشردگی فرم شهری نیز ارتباطی تنگاتنگ با آلودگی هوا دارد (*Higgins et al, 2019: 177*). در واقع، شهرهای فشرده‌تر به‌دلیل بهبود بهره‌وری صنعتی، امکان استفاده از وسایل نقلیهٔ غیر موتوری و کاهش حجم ترافیک، آلودگی هوای کمتری دارند (*Lu & Liu, 2016: 2607; Rodríguez et al, 2016: 7; Fan et al, 2018: 405; Mou et al, 2018: 1805*). در مقابل، برخی مطالعات دیگر نشان‌داده‌اند که شهرهای با تراکم بالاتر به‌دلیل افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، آلودگی هوای بیشتری تولید می‌کنند (*Liu et al, 2017: 328; Zhao et al, 2022: 118302*). از نظر پراکنده‌رویی شهری، بسیاری از محققان داخلی و خارجی اظهار کرده‌اند که به‌دلیل تأثیر مستقیم پراکندگی فرم شهری بر پراکندگی تقاضا و شاخص دسترسی و به‌دنبال آن وابستگی مردم به استفاده از وسایل نقلیهٔ شخصی، میزان غلظت آلاینده‌ها و انتشار آلودگی هوا در شهرهای پراکنده بیشتر از شهرهای فشرده است (*قدمی و یوسفیان، ۱۳۹۳: ۶۳؛ قدمی و عبداله‌وند، ۱۳۹۷: ۲۶۱؛ Bereitschaft & Debbage, 2013: 612*). با این‌حال، بر مبنای نتایج حاصل از مطالعهٔ تائو و همکاران (*Tao et al, 2020: 102581*)،

پراکندگی شهری، لزوماً منجر به تشدید آلودگی هوا در دلتای رودخانه یانگ تسه چین نمی‌شود که ممکن است به‌دلیل توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی باشد. وجود تفاوت‌های قابل توجه در عوامل غالب فرم شهری مؤثر در کیفیت هوای مناطق شهری مختلف، می‌تواند ناشی از موقعیت جغرافیایی، شرایط آب‌وهوایی و ساختارهای صنعتی مختلف در مناطق مورد مطالعه باشد (*Shi et al, 2019: 118088; Li et al, 2021: 107029*). به‌طور کلی، اندازهٔ شهر و فشردگی و پراکندگی شهری، بر تعداد منابع آلودگی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای، شکل شهر و تکه‌تکه‌شدگی منظر شهری عمدتاً بر میزان آلودگی‌های ترافیک تأثیر می‌گذارد؛ از این‌رو بررسی رابطهٔ پویا بین کیفیت هوا و فرم شهری برای اتخاذ سیاست‌های توسعهٔ شهری مناسب توسط برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران شهری ضروری است.

تحقیقات موجود در زمینهٔ تأثیر فرم شهری بر کیفیت هوا، عمدتاً بر مناطق شهری در کشورهای ایالات متحده آمریکا و چین متمرکز بوده و تاکنون مطالعهٔ جامعی با هدف بررسی ارتباط بین فرم شهری و کیفیت هوا در شهرهای ایران صورت نگرفته است. علاوه بر این، اکثر مطالعات در یک سال خاص انجام شده و از مدل «رگرسیون خطی» برای شناخت ویژگی‌های فرم شهری مؤثر در وضعیت کیفی هوا در مناطق شهری استفاده کرده‌اند. این در حالی است که به نظر می‌رسد رابطهٔ فرم شهری و کیفیت هوا رابطه‌ای غیر خطی است و با توجه به ماهیت پیچیدهٔ این روابط، برخی از مطالعات در سال‌های اخیر به بررسی تأثیر فرم شهری بر کیفیت هوا با استفاده از روش‌های غیر خطی پرداخته‌اند (*Tian et al, 2020: 2357; Sun et al, 2022: 106155; Wang et al, 2022: 104040*).

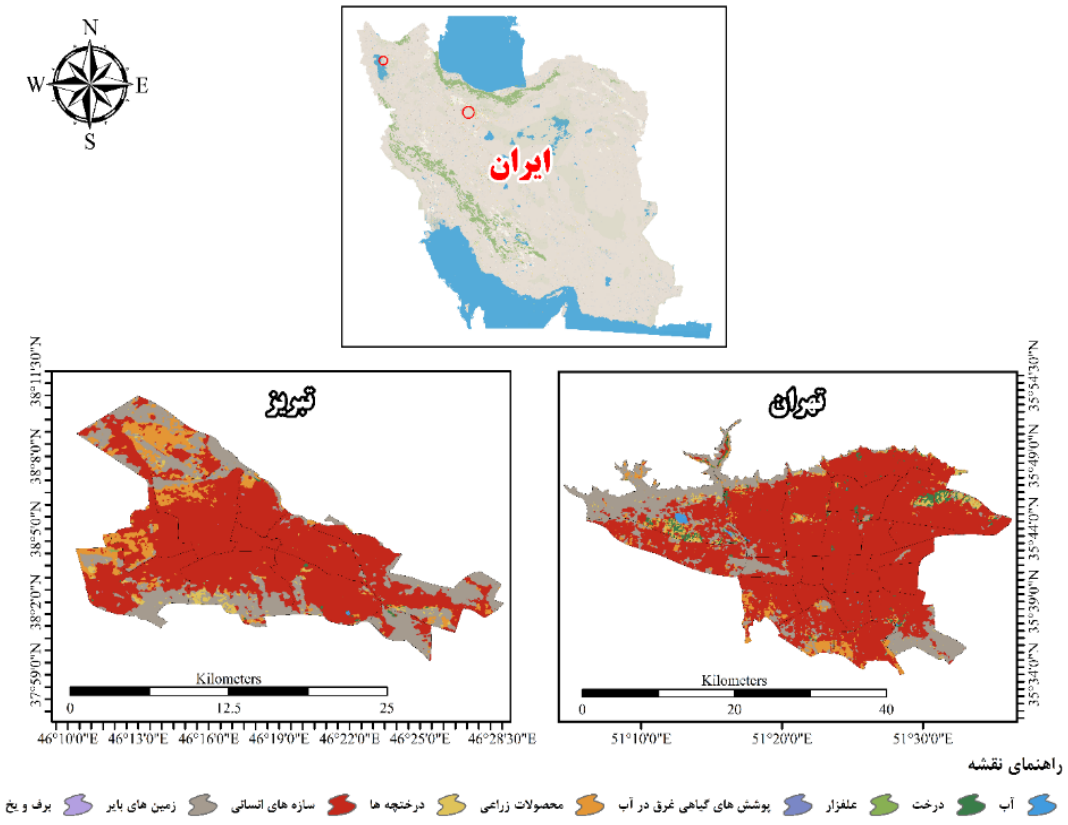
مطالعهٔ حاضر چگونگی تأثیرگذاری ویژگی‌های مختلف فرم شهری شامل؛ اندازه، شکل، تکه‌تکه‌شدگی، فشردگی و پراکندگی را بر غلظت آلاینده‌های گازی (کربن منوکسید (CO)[1]، نیتروژن دی‌اکسید (NO_2)[2]، گوگرد دی‌اکسید (SO_2)[3] و ازن (O_3)[4]) و ذرات (ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون (PM_{10})[5]، ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$)[6] و ذرات کربن سیاه (BC)[7]) در دو شهر تبریز و تهران با درنظرگرفتن دما، بارش و سرعت باد به‌عنوان عوامل واسطه در طول ۲۰۲۱ -۲۰۱۵ با استفاده از مدل جنگل تصادفی (RF)[8] بررسی می‌کند. جنبه‌های نوآورانهٔ پژوهش حاضر به شرح زیر است: (۱) در این مطالعه اثرات فرم شهری بر غلظت آلاینده‌های جوی بر خلاف مطالعات دیگر که در یک سال مشخص انجام شده‌اند، به‌صورت سری زمانی بررسی شده است که امکان اطمینان بیشتر به نتایج را فراهم می‌آورد. (۲) علاوه بر آلاینده‌های جوی معیار، رابطهٔ بین فرم شهری و غلظت ذرات کربن سیاه معلق در هوا نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. (۳) از نقشهٔ کاربری اراضی با دقت بسیار بالا (۱۰×۱۰ متر) و نرم‌افزار R برای محاسبهٔ سنجه‌های فرم شهری استفاده گردیده است در حالی‌که محققان دیگر نقشه‌های کاربری با دقت پایین‌تر و نرم‌افزار «Fragstats» را مورد استفاده قرار داده‌اند. (۴) مدل جنگل تصادفی (RF) برای درک بهتر روابط غیر خطی بین فرم شهری و آلودگی هوا به‌کار رفته و کارایی و دقت این مدل با مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR)[9] به‌عنوان مدل مبنا مورد مقایسه قرار گرفت.

1. Carbon Monoxide
2. Nitrogen Dioxide
3. Sulphur Dioxide
4. Ozone
5. Particulate matter with an aerodynamic diameter less than 10 microns
6. Particulate matter with an aerodynamic diameter less than 2.5 microns
7. Black Carbon
8. Random Forest
9. Multiple Linear Regression

داده‌ها و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

قلمروی جغرافیایی پژوهش حاضر شامل شهرهای تهران و تبریز بر اساس مرزبندی مناطق شهرداری آنهاست. شهر تهران، پایتخت ایران، مرکز استان تهران، بزرگترین و پرجمعیت‌ترین شهر کشور و شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی، چهارمین شهر بزرگ ایران و پرجمعیت‌ترین کلان‌شهر در شمال غرب کشور است. تهران حائز رتبهٔ بالایی در میان شهرهای با رشد سریع جهان است و این رشد انفجاری پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشت عمومی مانند آلودگی هوا را به‌دنبال داشته است. بلند مرتبه‌سازی و الگوی نامناسب توسعهٔ شهری، سیستم حمل‌ونقل، جانمایی نادرست صنایع، مصرف انرژی در صنایع و بخش خانگی، موقعیت خاص جغرافیایی، شرایط آب‌وهوایی و پدیدهٔ وارونگی دما در فصل سرد سال، از جمله مهم‌ترین عوامل آلودگی هوا و تشدید آن در تهران محسوب می‌شوند. رشد فزایندهٔ جمعیت و توسعهٔ صنعتی به موازات عدم رعایت معیارهای برنامه‌ریزی شهری پایدار نیز زمینه‌ساز افزایش آلودگی هوا در شهر تبریز در سال‌های اخیر شده است. دلیل انتخاب این دو شهر، تشدید بحران آلودگی هوا، وجود تفاوت‌های قابل توجه در ساختار صنعتی، فضایی، شرایط آب‌وهوایی و سایر جنبه‌های آنهاست. علاوه بر این، با توجه به این‌که سازوکار تأثیر فرم شهری بر کیفیت هوا در مناطق مختلف متفاوت است، انتخاب شهرهای تهران و تبریز امکان انجام مقایسهٔ بین شهری را به‌خوبی فراهم می‌آورد. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه و نوع پوشش/کاربری اراضی آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در مطالعهٔ حاضر شامل: غلظت آلاینده‌های جوی معیار، غلظت ذرات کربن سیاه، داده‌های فرم شهری و پارامترهای هواشناسی در طول ۰۱-۰۷-۲۰۱۵ تا ۰۱-۰۷-۲۰۲۱ است. دلیل انتخاب این دورهٔ آماری، دسترسی به داده‌های فرم شهری است. میانگین روزانهٔ غلظت آلاینده‌های کربن منوکسید (CO، mg/m^3)، نیتروژن دی‌اکسید (NO_2، $\mu g/m^3$)، گوگرد دی‌اکسید (SO_2، $\mu g/m^3$)، ازن (O_3، $\mu g/m^3$) و ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$، $\mu g/m^3$) در ۲۱ ایستگاه سنجش کیفیت هوا در تهران و ۸ ایستگاه در تبریز به‌ترتیب از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (*https://airnow.tehran.ir/*) و مرکز پایش و کنترل آلودگی هوای شهر تبریز (*https://as.doe.ir/*) دریافت گردید. مقادیر ساعتی غلظت آلایندهٔ کربن سیاه نیز از داده‌های بازتحلیل MERRA-2[1] با قدرت تفکیک مکانی ۶۹۳۷۵ متر در سامانهٔ گوگل‌ارث‌انجین (GEE)[2] که توسط ادارهٔ جهانی مدل‌سازی و همگون‌سازی در مرکز پروازهای فضایی گادرد ناسا مدل‌سازی و توزیع شده است، استخراج‌گردید (*Global Modeling and Assimilation Office, 2015*). کیفیت داده‌های آلودگی هوا از طریق شناسایی و مدیریت مقادیر مفقود و پرت موجود در مجموعه داده‌ها به‌ترتیب با به‌کارگیری روش‌های انتساب ناپارامتری مبتنی بر الگوریتم جنگل تصادفی و *capping* مورد بررسی قرار گرفت (*Stekhoven, 2012: 112; Ryu, 2022: 1*). مطالعهٔ حاضر مکانیسمی که توسط آن فرم شهری با توجه به اندازه، شکل، تکه‌تکه‌شدگی، تراکم و پراکندگی شهر بر کیفیت هوا تأثیر می‌گذارد را مورد ارزیابی قرارمی‌دهد. براساس بررسی تحقیقات موجود، ۹ شاخص؛ مساحت کل (CA)[3]، میانگین نسبت محیط به مساحت (PARA_MN)[4]، شکل سیمای سرزمین (LSI)[5]، تعداد لکه‌ها (NP)[6]، میانگین اندازه لکه‌ها (AREA_MN)[7]، فشردگی (CLUMPY)[8]، میانگین فاصله اقلیدسی نزدیک‌ترین همسایه (ENN_MN)[9]، پیوستگی (CONTAG)[10] و تجمع (AI)[11] برای توصیف فرم شهری انتخاب شد. نحوهٔ محاسبهٔ هر یک از این شاخص‌ها و تفسیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. شاخص‌های فرم شهری براساس سری زمانی داده‌های کاربری اراضی ماهانه *Dynamic World* (DW) با دقت ۱۰ متر در سامانه گوگل‌ارث‌انجین (*Brown et al, 2022:251; Gorelick et al, 2017: 20*) و با استفاده از بستهٔ *landscapemetrics* در نرم‌افزار *R 4.3.3* محاسبه شدند (*Hesselbarth et al, 2019: 1648*). «DW» یک محصول کاربری اراضی است که توسط گوگل و مؤسسه منابع جهانی (WRI)[12] توسعه یافته و احتمال تعلق پیکسل‌ها به ۹ کلاس مختلف پوشش اراضی را ارائه می‌دهد. مهمترین ویژگی DW این است که اطلاعات پوشش/ کاربری اراضی را با دقت بالا و به‌صورت پیوسته از سال ۲۰۱۵ منتشر کرده و تا زمانی‌که تصاویر ماهواره سنتینل-۲ تولید و منتشر می‌شوند، بروزرسانی خواهد شد. این محصول سطح زمین را بر اساس روش یادگیری عمیق به ۹ کلاس؛ آب، درخت، علفزار، پوشش‌های گیاهی غرق در آب، محصولات زراعی، درختچه‌ها، سازه‌های انسانی، زمین‌های بایر و برف و یخ طبقه‌بندی می‌کند.
مطالعات قبلی نشان‌داده‌اند که برخی از پارامترهای هواشناسی بر کیفیت هوا تأثیر می‌گذارند و به‌طور غیر مستقیم با فرم شهری ارتباط دارند (*Fan et al, 2018: 405; Yuan et al, 2018: 413; Li & Zhou, 2019: 130*). کنترل این

1. Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2
2. Google Earth Engine
3. Class Area
4. Perimeter-Area Ratio
5. Landscape Shape Index
6. Number of Patches
7. Mean urban Patch Area
8. Clumpiness Index
9. Euclidean Nearest-Neighbor Distance
10. Contagion Index
11. Aggregation Index
12. World Resources Institute

پارامترها می‌تواند ارزیابی آماری بهتری از همبستگی بین کیفیت هوا و فرم شهری ارائه‌دهد. به همین دلیل در این مطالعه دما (T[1]، °C)، بارش (R[2]، mm) و سرعت باد (WS[3]، m/s) به‌عنوان متغیرهای کنترل انتخاب شدند. میانگین ماهانهٔ داده‌های دما، بارش و سرعت باد در چهار ایستگاه همدیدی تهران و دو ایستگاه همدیدی تبریز از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید (*https://data.irimo.ir/*).

جدول ۱: سنجه‌های سیمای سرزمین توصیف‌کنندهٔ فرم شهری مورد استفاده در پژوهش

شاخص	فرم شهری مرتبط با شاخص	اندازه‌گیری شاخص/توصیف شاخص/تفسیر شاخص	واحد
مساحت کل مناطق ساخته‌شدهٔ شهری	اندازه	$CA = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}\left(\frac{1}{10000}\right) \quad (CA > 0)$ a_{ij} مساحت ij امین لکهٔ شهری بر حسب متر مربع CA بزرگی منطقه شهری را اندازه‌گیری می‌کند.	هکتار
میانگین نسبت محیط مناطق شهری به مساحت آن‌ها	شکل	$PARA\_MN = \frac{p_{ij}}{a_{ij}} \quad (PARA\_MN > 0)$ p_{ij} محیط ij امین لکه شهری برحسب متر، a_{ij} مساحت ij امین لکه شهری بر حسب متر مربع $PARA\_MN$ پیچیدگی شکل شهر را اندازه‌گیری می‌کند.	-
شکل سیمای سرزمین	تکه‌تکه‌شدگی	$LSI = \frac{0.25 \sum_{k=1}^{m} e_{ik}^{*}}{\sqrt{A}} \quad (LSI \geq 1)$ e_{ik}^{*} طول کل لبه در چشم‌انداز بر حسب متر، A مساحت کل چشم‌انداز برحسب مترمربع LSI تکه‌تکه‌شدگی فرم شهر را محاسبه‌می‌کند و مقادیر بالاتر آن بیانگر تراکم کمتر لکه‌های شهری است.	-
تعداد لکه‌های شهری		$NP = n_i \quad (NP \geq 1)$ n_i تعداد لکه‌های متعلق به کلاس شهر در چشم‌انداز NP تکه‌تکه‌شدگی شهر را اندازه‌گیری می‌کند و مقادیر بالاتر آن بیانگر تکه‌تکه‌شدگی بیشتر است.	-
میانگین اندازهٔ لکه‌های شهری		$AREA\_MN = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{n_i}\left(\frac{1}{10000}\right) \quad (AREA\_MN > 0)$ a_{ij} مساحت ij امین لکهٔ شهری بر حسب متر مربع، n_i تعداد لکه‌ها $AREA\_MN$ شاخصی از تکه‌تکه‌شدگی شهرمحسوب می‌شود و مقادیر کمتر آن بیانگر تکه‌تکه‌شدگی بیشتر منظر شهری است.	هکتار
فشردگی	تراکم	$CLUMPY = \frac{\left(\frac{g_{ii}}{\sum_{k=1}^{m} g_{ik}}\right) - P_i}{1 - P_i} \quad (-1 \leq CLUMPY \leq 1)$ g_{ii} تعداد مجاورت‌های مشابه بین پیکسل‌های لکه‌های متعلق به کلاس شهری، P_i نسبت چشم‌انداز اشغال‌شده توسط لکه‌های متعلق به کلاس شهری اگر فضاهای شهری کاملاً پراکنده باشند، $CLUMPY = -1$ اگر فضاهای شهری کاملاً فشرده و تجمیع شده باشند، $CLUMPY = 1$	درصد
میانگین نزدیک‌ترین همسایه		$ENN\_MN = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} h_{ij}}{N} \quad (ENN\_MN > 0)$ h_{ij} فاصله ij امین لکهٔ شهری تا نزدیک‌ترین لکهٔ شهری بعدی بر حسب متر مقادیر بالاتر ENN_MN بیانگر دور بودن لکه‌های شهری از یکدیگر و پراکندگی فرم شهری است.	متر

1. Temperature
2. Rainfall
3. Wind Speed

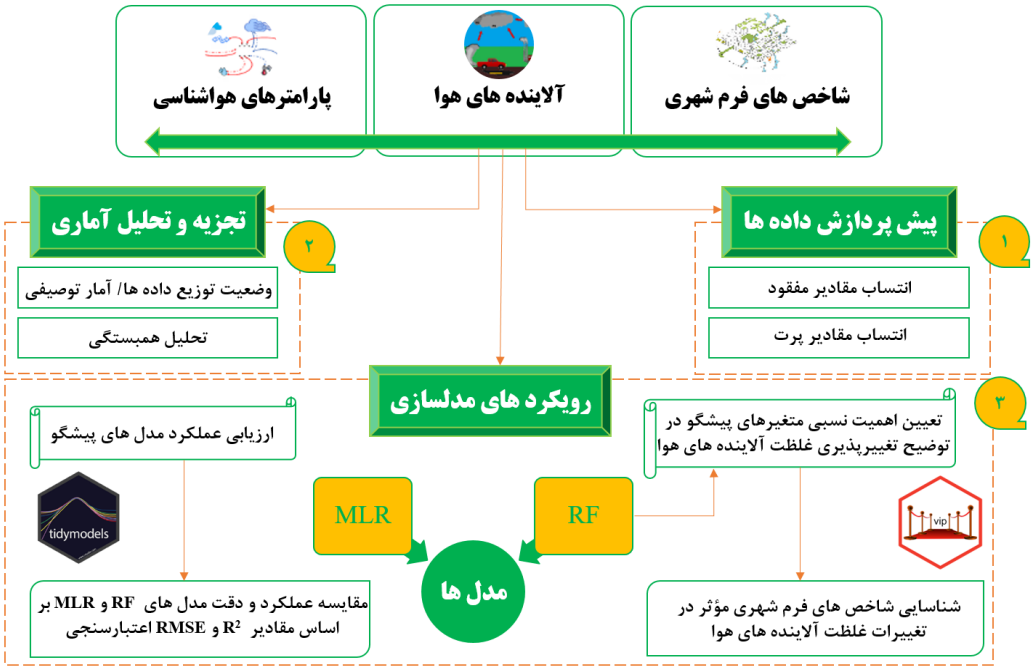
پیوستگی فضای شهری	پراکندگی	$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left[P_i\left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^{m} g_{ik}}\right)\right] * \left[\ln(P_i)\left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^{m} g_{ik}}\right)\right]}{2\ln(m)}\right](100)$ $(0 \le \text{CONTAG} \le 100)$ P_i نسبت چشم‌انداز اشغال‌شده توسط i امین لکهٔ شهری، g_{ik} تعداد مجاورت‌های بین پیکسل‌های i امین لکهٔ شهری، m تعداد لکه‌های موجود در چشم‌انداز	درصد
تجمع فضای شهری		$AI = \left[\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{g_{ii}}{max - g_{ii}}\right)\right](100) \quad (0 \le \text{AI} \le 100)$ g_{ii} تعداد مجاورت‌های مشابه بین پیکسل‌های i امین لکهٔ شهری $max\text{-}g_{ii}$ حداکثر تعداد مجاورت‌های مشابه بین پیکسل‌های i امین لکهٔ شهری AI پراکندگی شهری را اندازه‌گیری می‌کند و مقادیر بالای آن نشان‌دهندهٔ فرم شهری فشرده است. اگر فضاهای شهری کاملاً پراکنده باشند، AI = 0 اگر فضاهای شهری کاملاً فشرده و تجمیع شده باشند، AI =100	درصد

مأخذ: *Ene & McGarigal, 2023*

روش مطالعه

بررسی نرمال‌بودن توزیع متغیرهای مطالعه و محاسبهٔ آمار توصیفی آن‌ها با استفاده از بستهٔ *MVN* در نرم‌افزار R انجام شد (*Korkmaz et al, 2014: 151*). مطالعه و شناخت روابط بین شاخص‌های فرم شهری، غلظت آلاینده‌های جوی و پارامترهای هواشناسی با انتخاب روش تحلیل همبستگی مناسب براساس توزیع داده‌ها (نرمال و غیر نرمال) در سطح اطمینان ۹۵٪ و به‌کارگیری بسته *corrplot* جهت بصری‌سازی نتایج حاصل از ماتریس همبستگی و تفسیر ضرایب همبستگی براساس معیارهای ارائه‌شده توسط موکاکا (*Mukaka, 2012: 69*) صورت گرفت (*Wei, & Simko, 2021: 1-26*). به‌منظور تعیین اثرات احتمالی فرم شهری بر سطح غلظت آلاینده‌های جوی معیار و ذرات کربن سیاه در تبریز و تهران، الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و جنگل تصادفی (RF) با استفاده از نرم‌افزار R و بسته *tidymodels* پیاده‌سازی شد (*Kuhn & Wickham, 2020: 1*). MLR یک روش یادگیری ماشین نظارت‌شده جهت مطالعهٔ آماری روابط خطی بین دو یا چند متغیر مستقل و یک متغیر وابسته است. RF یک روش یادگیری ماشین ناپارامتری قدرتمند مبتنی بر روش‌های ترکیب اطلاعات است که در آن تعداد زیادی درخت تصمیم ایجاد گردیده و سپس تمامی درختان برای پیش‌بینی با هم ترکیب می‌شوند. سهولت استفاده، تفسیرپذیری، کاربرپسندی، دقت بسیار بالا، تعیین اهمیت متغیر و توانایی مدل‌سازی اثرات متقابل پیچیده میان متغیرهای پیشگو و کاهش بیش برازش از مزایای استفاده از RF در مقایسه با سایر روش‌های آماری است. تنظیم فراپارامترهای کلیدی تعداد درختان در جنگل (*ntree*) و تعداد متغیرهای پیشگوی تصادفی در هر انشعاب (*mtry*) برای بهبود عملکرد مدل جنگل تصادفی و افزایش قدرت پیش‌بینی ضروری است. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شده در مطالعهٔ حاضر به کتاب Hands-on machine learning with R مراجعه شود (*Boehmke & Greenwell, 2019: 113-137, 242-260*). مدل‌ها با در نظر گرفتن شاخص‌های فرم شهری به‌عنوان متغیرهای مستقل، غلظت آلاینده‌های هوا به‌عنوان متغیرهای وابسته و پارامترهای هواشناسی به‌عنوان متغیرهای کنترل، برازش یافتند. ارزیابی تعمیم‌پذیری نتایج مدل‌های پیشگو بر روی یک مجموعه‌داده و تنظیم فراپارامترهای مورد نیاز در هر مدل توسط اعتبارسنجی متقابل شامل تقسیم داده‌ها به دو زیرمجموعهٔ آموزشی (۷۰٪) و آزمایشی (۳۰٪)، انجام تحلیل‌ها بر روی داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آزمایشی صورت گرفت. در گام بعدی، ضریب تبیین

(R^2)[1] و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)[2] برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، اهمیت نسبی متغیرهای پیشگو در تبیین تغییرپذیری متغیر پاسخ براساس مدل RF و با استفاده از روش جایگشت در بسته *vip* مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت (*Greenwell et al, 2020: 343*). چکیدهٔ تصویری پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: چکیدهٔ تصویری پژوهش

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۳

نتایج و بحث

تحلیل آماری

وضعیت توزیع داده‌های فرم شهری، آلاینده‌های هوا (آلاینده‌های معیار و کربن سیاه) و پارامترهای هواشناسی در تهران و تبریز و اطلاعات آماری مربوط به آن‌ها شامل مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه از ۰۱-۰۷-۲۰۱۵ تا ۰۱-۰۷-۲۰۲۱ در جدول ۲ ارائه شده است. ارزیابی چگونگی توزیع متغیرها براساس برونداد آزمون تک‌متغیره کولموگروف-اسمیرنف[3] نشان‌می‌دهد که در تهران متغیرهای CLUMPY، CONTAG، AI، NO_2، SO_2، O_3، $PM_{2.5}$، T و R و در تبریز متغیرهای NP، CLUMPY، CONTAG، AI، CO، SO_2، $PM_{2.5}$، BC و R از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند. با توجه به داده‌های پوشش/کاربری اراضی در طول دورهٔ آماری مورد مطالعه، شاخص‌های فرم شهری در تهران و تبریز متفاوت است. میانگین مقدار CA در تبریز کمتر از تهران است که نشان‌می‌دهد تبریز در مقایسه با تهران از پوشش مصنوعی و تراکم کاربری اراضی شهری کمتری برخوردار است. میانگین مقدار شاخص PARA_MN در تهران بیشتر از تبریز است که نشان از پیچیدگی بیشتر شکل شهر تهران دارد. از نظر تکه‌تکه‌شدگی شهری، میانگین مقادیر شاخص‌های NP و LSI در تبریز کمتر از تهران است که نشان‌می‌دهد الگوهای کاربری اراضی شهری

1. R-Squared
2. Root Mean Square Error
3. Kolmogorov-Smirnov

در تهران پیچیده‌تر بوده و کاربری شهری در تهران در مقایسه با تبریز خردتر و از هم گسیخته‌تر است. مقایسهٔ میانگین مقادیر شاخص AREA_MN در تهران و تبریز نیز گویای بزرگتربودن اندازهٔ لکه‌های شهری در تهران است. مقدار میانگین سنجه CLUMPY در تهران و تبریز نزدیک به ۱ و بیانگر تجمیع بسیار بالای لکه‌های شهری در این شهرهاست. متوسط مقدار ENN_MN در تبریز بیشتر از تهران است که می‌تواند نشان‌دهندهٔ ارتباط فضایی کمتر لکه‌های شهری و درنتیجه پراکندگی بیشتر فرم شهر تبریز در مقایسه با تهران باشد. میانگین مقدار شاخص CONTAG در تبریز و تهران نزدیک به هم و نشان‌دهندهٔ پیوستگی بیش از ۷۰ درصدی انواع لکه‌های سیمای سرزمین در آن‌هاست. مقادیر بالا و نزدیک به هم شاخص AI در تهران و تبریز نیز حاکی از فشردگی بالای فرم شهری در این مناطق است. مقایسهٔ میانگین غلظت هفت آلاینده CO، NO_2، SO_2، O_3، PM_{10}، $PM_{2.5}$ و BC در شهرهای تهران و تبریز نشان‌می‌دهد که سطح غلظت آلاینده‌های NO_2، SO_2، PM_{10}، $PM_{2.5}$و BC در تهران بیشتر از تبریز بوده و تنها میانگین مقادیر غلظت‌های CO و O_3در تبریز اندکی بالاتر از تهران است. مقایسهٔ وضعیت جوی دو شهر نیز نشان‌می‌دهدکه میانگین مقدار پارامتر سرعت باد در تبریز بیشتر از تهران است و در عین حال، دما و بارش در تهران در مقایسه با تبریز بیشتر است.

جدول ۲: آمار توصیفی شاخص‌های فرم شهری، آلاینده‌های هوا و پارامترهای هواشناسی در تبریز و تهران (۲۰۲۱- ۲۰۱۵)

	متغیر	شاخص آماری						نرمالیته (p-value)	
		میانگین		کمینه		بیشینه			
		تهران	تبریز	تهران	تبریز	تهران	تبریز	تهران	تبریز
مستقل	CA (ha)	۵۱۴۱۶	۱۳۹۳۰/۵۸	۴۶۲۰۹	۱۳۰۲۶	۵۵۹۲۹	۱۴۸۹۵	۰/۵۶	۰/۶۳
	PARA_MN	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۱۸
	LSI	۱۶/۸۶	۱۳/۱۲	۱۳/۶۰	۱۰/۸۰	۲۱/۷۰	۱۵/۲۰	۰/۰۶	۰/۱۸
	NP	۶۸۷/۹۵	۳۰۹/۴۰	۴۷۹	۲۰۸	۹۷۲	۴۳۲	۰/۵۱	۰/۰۴
	AREA_MN (ha)	۷۶/۲۴	۴۵/۸۶	۵۶/۱۰	۳۲	۱۱۲	۶۳/۱۰	۰/۲۷	۰/۵۴
	CLUMPY (%)	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	< ۰/۰۰۱	< ۰/۰۰۱
	ENN_MN (m)	۶۵/۱۶	۷۱/۱۳	۵۱/۱۰	۵۷/۴۰	۷۶/۶۰	۸۵/۵۰	۰/۷۵	۰/۴۲
	CONTAG (%)	۷۴/۷۱	۷۳/۰۴	۷۲/۵۰	۶۹/۸۰	۷۷/۳۰	۷۶/۵۰	۰/۰۵	۰/۰۱
	AI (%)	۹۹/۳۰	۹۸/۹۸	۹۹/۱۰	۹۸/۸۰	۹۹/۵۰	۹۹/۱۰	< ۰/۰۰۱	< ۰/۰۰۱
وابسته	CO (mg/m^3)	۲/۳۶	۲/۵۱	۱/۱۸	۱/۲۷	۴/۱۹	۵/۸۳	۰/۳۶	۰/۰۳
	NO_2 ($\mu g/m^3$)	۹۴/۱۷	۴۰/۳۱	۷۱/۰۹	۲۳/۱۴	۱۳۴/۳۶	۶۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۹۴
	SO_2 ($\mu g/m^3$)	۱۹/۱۹	۱۵/۷۳	۸/۲۸	۵/۷۱	۴۶/۱۴	۴۳/۱۳	۱e-۰۴	< ۰/۰۰۱
	O_3 ($\mu g/m^3$)	۳۹/۸۲	۴۳/۱۴	۱۳/۲۳	۱۴/۶۰	۷۱/۹۴	۷۲/۵۱	۰/۰۴	۰/۱۴
	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	۷۷/۶۶	۴۱/۹۶	۴۴/۲۸	۲۳/۲۰	۱۰۹/۸۶	۶۶/۴۸	۰/۷۷	۰/۲۲
	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	۲۹/۳۰	۱۷/۰۴	۱۶/۴۴	۱۰/۴۸	۴۶/۲۴	۲۷/۲۸	۰/۰۰۲	۰/۰۲
	BC ($\mu g/m^3$)	۰/۶۸	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۳۴	۰/۹۱	۰/۷۴	۰/۲۴	۰/۰۰۲
کنترل	T (°C)	۱۷/۸۷	۱۶/۷۵	۳/۲۵	۱/۰۶	۳۲/۶۸	۲۹/۴۲	۰/۰۳	۰/۱۳
	R (mm)	۲۳/۷۸	۲۳/۲۷	۰	۰	۸۲/۰۲	۱۸۹/۷۶	۱e-۰۴	< ۰/۰۰۱
	WS (m/s)	۱/۹۲	۴/۲۴	۱/۰۷	۲/۴۵	۲/۸۷	۶/۷۴	۰/۸۹	۰/۲۳

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳

تحلیل روابط بین شاخص‌های فرم شهری، آلاینده‌های هوا و پارامترهای هواشناسی

همان‌طور که در بخش تحلیل آماری داده‌ها مشاهده گردید، برخی از متغیرهای پژوهش دارای توزیع نرمال نیستند. بر همین اساس در مطالعهٔ حاضر از آزمون ناپارامتری اسپیرمن برای بررسی و شناخت ارتباط فرم شهری با آلاینده‌های جوی و پارامترهای هواشناسی در تهران و تبریز استفاده گردید و تحلیل روابط براساس معناداری آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ صورت گرفت (*Spearman, 1961: 46*). نتایج حاصل از تحلیل همبستگی آلاینده‌های جوی نشان‌می‌دهد که در تهران آلاینده‌های CO، NO_2، SO_2، PM_{10} و $PM_{2.5}$، آلاینده‌های NO_2 و BC و آلاینده‌های $PM_{2.5}$ و BC دارای همبستگی مثبت هستند. در تبریز نیز آلاینده‌های CO و SO_2، CO و PM_{10}، SO_2 و $PM_{2.5}$، SO_2 و BC، NO_2 و $PM_{2.5}$، BC و NO_2 و PM_{10} و $PM_{2.5}$ و همچنین آلاینده‌های $PM_{2.5}$ و BC همبستگی مثبت معناداری را به‌صورت جفتی نشان داده‌اند. با توجه به این‌که احتراق سوخت یکی از منابع عمدهٔ انتشار این آلاینده‌ها در جو است؛ بنابراین می‌توان گفت آلاینده‌های مذکور از منابع مشترکی انتشار یافته و احتراق سوخت‌های فسیلی می‌تواند یکی از منابع اصلی آلایندگی در شهرهای تهران و تبریز باشد. در مقابل آلایندهٔ ثانویه O_3 که از واکنش شیمیایی اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات آلی فرار در حضور نور خورشید تولید می‌شود، دارای همبستگی منفی با آلاینده‌های CO، NO_2، SO_2، $PM_{2.5}$ و BC در تهران و آلاینده‌های NO_2، $PM_{2.5}$ و BC در تبریز است. CO و NO_2 پیش سازهای O_3 در ارتفاعات پایین هستند و تشکیل ازن نیازمند مصرف این پیش‌سازهاست. در عین حال، O_3 به‌عنوان یک اکسیدکنندهٔ قوی می‌تواند SO_2 را اکسید کرده و غلظت این آلاینده را در مناطق شهری کاهش‌دهد. همبستگی منفی O_3 با ذرات ریز معلق در هوا ($PM_{2.5}$ و BC) را نیز می‌توان با جذب تابش خورشیدی توسط ذرات و کاهش نرخ واکنش‌های فتوشیمیایی و در نتیجه کاهش تولید O_3 مرتبط دانست.

تفسیر نتایج همبستگی شاخص‌های فرم شهری و آلاینده‌های هوا، نشانگر عدم ارتباط معنادار آلاینده CO با شاخص‌های فرم شهری در تهران در طول دورهٔ آماری مورد مطالعه است. این در حالی است که آلاینده CO در تبریز دارای همبستگی منفی بسیار ضعیفی با شاخص CA است که نشان‌می‌دهد با افزایش اندازهٔ شهر غلظت این آلاینده در سطح شهر کاهش می‌یابد. آلاینده NO_2 در تهران به‌ترتیب دارای همبستگی مثبت ضعیف و بسیارضعیف با شاخص‌های PARA_MN و NP و همبستگی منفی ضعیف با ENN_MN است. همبستگی مثبت PARA_MN با غلظت NO_2 در تهران نشان‌می‌دهد که با افزایش پیچیدگی و بی‌نظمی شکل شهر، غلظت این آلاینده افزایش می‌یابد. در واقع بی‌نظمی منظر شهری با افزایش حجم ترددهای شهری به افزایش سطح غلظت NO_2 که ترافیک یکی از منابع مهم انتشار آن در شهر تهران است می‌انجامد. همچنین رابطهٔ مستقیم بین میانگین غلظت NO_2 و شاخص NP بیانگر آن است که افزایش تعداد لکه‌های شهری و در نتیجه تکه‌شدگی کاربری اراضی شهری، با توجه به موقعیت فضایی متفاوت فعالیت‌ها در سطح شهر نقش مهمی در تقاضای سفر شهروندان و رفتار ترافیکی آن‌ها و افزایش غلظت آلاینده NO_2 در شهر تهران ایفا می‌کند. رابطهٔ معکوس ENN_MN با NO_2 نیز نشان‌می‌دهد که افزایش فاصلهٔ لکه‌های شهری از یکدیگر در تهران و در نتیجه کاهش فشردگی فرم شهری با کاهش سطح غلظت NO_2 همراه است. آلاینده NO_2 در تبریز نیز دارای همبستگی مثبت ضعیفی با شاخص‌های CA و AI است؛ بنابراین می‌توان‌گفت افزایش اندازهٔ شهر و تراکم فرم شهری به‌دلیل افزایش احتراق سوخت با افزایش سطح غلظت NO_2 در تبریز همراه است. مشابه CO، آلاینده SO_2 ارتباط معنی‌داری با هیچ یک از سنجه‌های سیمای سرزمین مرتبط با فرم شهری تهران ندارد. در مقابل آلاینده SO_2 در تبریز با شاخص‌های CA و LSI ارتباط معکوس و با شاخص‌های

AREA_MN و ENN_MN ارتباط مستقیم دارد که بیانگر تأثیر مثبت افزایش اندازۀ شهر و کاهش تکه‌شدگی فرم آن در بهبود کیفیت هوای تبریز از نظر آلاینده SO_2 و تأثیر منفی پراکندگی فرم شهری در وضعیت کیفی هوا از نظر این آلاینده است. آلاینده O_3 در تهران دارای روابط معناداری با شاخص‌های فرم شهری از جمله CA، LSI، ENN_MN، CLUMPY، CONTAG و AI است. همبستگی منفی O_3 با CA نشان‌می‌دهد که افزایش مساحت مناطق ساخته‌شدۀ شهری با کاهش سطح غلظت آلاینده O_3 در شهر تهران همراه است. رابطۀ معکوس اندازۀ شهر با سطح غلظت آلاینده‌ها در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (*McCarty & Kaza, 2015: 168*). همبستگی مثبت و متوسط غلظت O_3 با شاخص LSI در تهران می‌تواند بیانگر نقش افزایش اثر قطعه‌شدگی فرم شهری در کاهش کیفیت هوا از منظر آلایندۀ ازن باشد. رابطۀ مستقیم O_3 با شاخص ENN_MN به‌معنای افزایش غلظت O_3 با افزایش پراکندگی فرم شهری و رابطۀ معکوس آن با CLUMPY، CONTAG و AI نیز بیانگر کاهش غلظت O_3 با افزایش تراکم فرم شهری در تهران است. غلظت آلاینده O_3 در تبریز همانند تهران دارای ارتباط مستقیم با LSI و ارتباط معکوس متوسط با CA، CLUMPY و AI است.

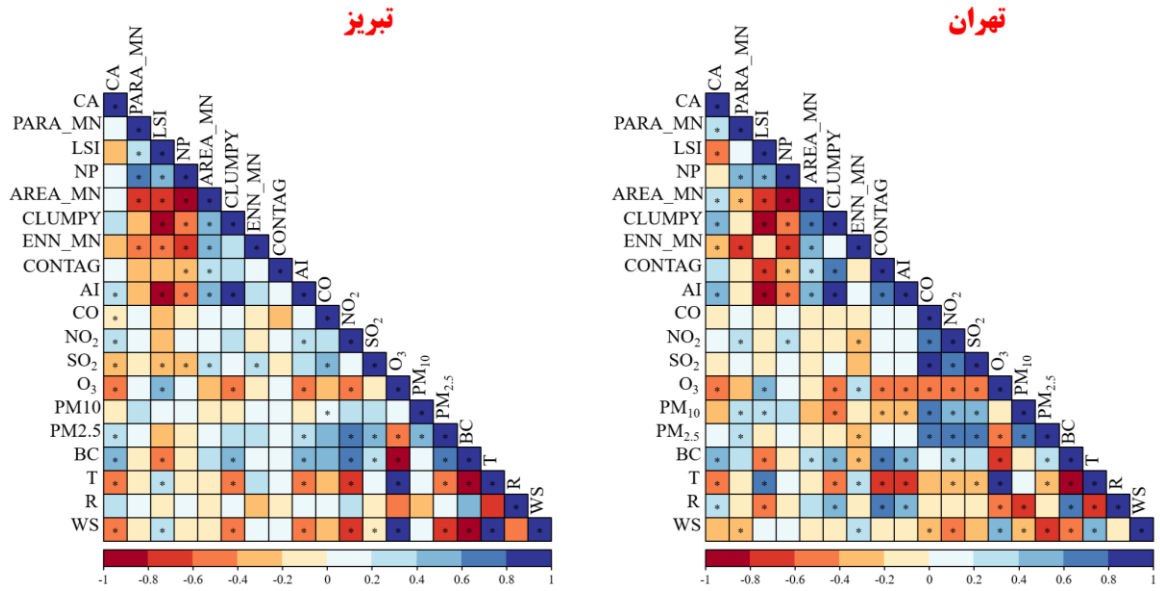
میانگین غلظت آلاینده PM_{10} در تهران دارای ارتباط مستقیم ضعیفی با شاخص معرف شکل شهر یعنی PARA_MN است که نشان‌می‌دهد شکل شهری پیچیده‌تر و نامنظم‌تر با تأثیر بر میزان تمرکز فعالیت‌های گوناگون شهری و در نتیجه افزایش حجم ترددهای درون‌شهری، انتشار ذرات آلاینده از وسایل نقلیه را افزایش می‌دهد. همبستگی مثبت آلاینده PM_{10} با شاخص LSI بیانگر آن است که افزایش قطعه‌شدگی فرم شهر تهران باعث کاهش کیفیت هوا از نظر آلاینده PM_{10} می‌شود. همانند آلاینده O_3، غلظت آلاینده PM_{10} نیز با افزایش میزان شاخص‌های CLUMPY، CONTAG و AI کاهش می‌یابد که این کاهش می‌تواند مبین تأثیر تراکم شهری در حمل‌ونقل عمومی کارآمدتر و عدم وابستگی به وسایل نقلیه شخصی ناشی از عدم پراکنش بالای تقاضا باشد. آلاینده PM_{10} در تبریز هیچ ارتباط معناداری با شاخص‌های فرم شهری و پارامترهای هواشناسی در طول دورۀ مطالعه نشان نداده است. آلاینده $PM_{2.5}$ در تهران همانند PM_{10} با شاخص پیچیدگی شکل شهر یعنی PARA_MN همبستگی مثبت نشان‌داد که تأییدکنندۀ تأثیر پیچیدگی بالای شکل شهر در افزایش تعداد و طول سفرهای روزانه و در نتیجه افزایش انتشار آلاینده $PM_{2.5}$ از منابع احتراق به‌ویژه وسایل نقلیه است. از سوی دیگر، غلظت $PM_{2.5}$ با افزایش فاصله لکه‌های شهری از یکدیگر (ENN_MN) و به‌عبارتی کاهش مجاورت و تراکم آن‌ها کاهش می‌یابد و می‌توان‌گفت فرم‌های شهری پراکنده از نظر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ از کیفیت هوای بهتری در تهران برخوردارند. متوسط غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در تبریز نیز تحت تأثیر افزایش شاخص‌های CA و AI افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان‌گفت افزایش اندازۀ شهر و فشردگی فرم شهری با تأثیر منفی بر کیفیت هوا در تبریز از نظر آلاینده $PM_{2.5}$ همراه است. تأثیر قابل توجه مقیاس شهر بر آلودگی هوا و افزایش غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ با گسترش شهر در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (*Wang et al, 2019: 792; Gao et al, 2023: 116953*). یافته‌های مطالعات محققان دیگر نیز نشان‌می‌دهد که شهرهایی با فرم تکه‌تکه‌تر، سطوح آلودگی $PM_{2.5}$ کمتری را تجربه می‌کنند (*Tao et al, 2020: 102581; Huang et al, 2021: 108407; Ouyang et al, 2021: 112000; Sun et al, 2022: 2187*). متوسط غلظت آلاینده BC که یکی از اجزای مهم ذرات ریزمعلق در هوا ($PM_{2.5}$) است با افزایش وسعت مناطق ساخته‌شدۀ شهری در تهران افزایش یافته است که می‌تواند بیانگر تأثیر توسعۀ شهر بر افزایش مصرف انرژی، توسعۀ صنعتی و افزایش بار ترافیک و در نتیجه افزایش میزان انتشار BC از صنایع و نیروگاه‌های با سوخت‌های سنگین و احتراق موتورهای دیزلی باشد. از سوی

دیگر، غلظت BC در تهران با افزایش شاخص شکل سیمای سرزمین (LSI) کاهش و با افزایش میانگین اندازهٔ لکه‌های شهری (AREA_MN) افزایش یافته است. به‌عبارت دیگر، افزایش اثر تکه‌شدگی کاربری اراضی به کاهش انتشار آلاینده BC در تهران انجامیده است. همچنین BC همانند آلاینده‌های NO_2 و $PM_{2.5}$ دارای رابطهٔ معکوس با شاخص ENN_MN و برخلاف آلاینده‌های O_3 و PM_{10} دارای همبستگی مثبت با شاخص‌های CLUMPY، CONTAG و AI است؛ بنابراین می‌توان‌گفت پراکنده‌رویی فرم شهری به بهبود کیفیت هوا و فشردگی فرم شهری به کاهش کیفیت هوا از نظر سطح غلظت آلاینده BC در تهران منجر می‌شود. مشابه وضعیت موجود در تهران، متوسط غلظت BC در تبریز نیز با افزایش اندازهٔ شهر (CA) و افزایش تراکم فرم شهری (CLUMPY و AI) افزایش و با افزایش تکه‌تکه‌شدگی فرم شهر (LSI) کاهش‌می‌یابد.

تحلیل ضرایب همبستگی اسپیرمن بین آلاینده‌های جوی و پارامترهای هواشناسی نیز بیانگر نقش مؤثر دما در کاهش سطح غلظت آلاینده‌های NO_2، SO_2، $PM_{2.5}$ و BC در تهران و آلاینده‌های NO_2، $PM_{2.5}$ و BC در تبریز در نتیجه جریان عمودی هوای گرم و ایجاد شرایط مناسب برای پراکنش آلاینده‌ها و همچنین تأثیر مستقیم دما در افزایش سطح غلظت آلاینده O_3 ناشی از تسریع سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی و افزایش نرخ انتشار پیش‌سازهای O_3 در این شهرهاست. بارش در تهران دارای همبستگی منفی با غلظت O_3 و $PM_{2.5}$ و همبستگی مثبت با غلظت ذرات BC است که می‌تواند بیانگر اثر نهشت مرطوب در کاهش غلظت آلاینده‌ها در روزهای بارانی و تأثیر ذرات BC در میزان بارش به‌واسطهٔ جذب تابش خورشیدی و تغییر نرخ گرمایش جو باشد. پارامتر سرعت باد نیز نقش مؤثری در پراکندگی و کاهش غلظت آلاینده‌های CO، NO_2، PM_{10}، $PM_{2.5}$ و BC در تهران و آلاینده‌های NO_2، SO_2، $PM_{2.5}$ و BC در تبریز و افزایش غلظت O_3 در تهران و تبریز از طریق افزایش ارتفاع لایهٔ مرزی و تقویت حرکت عمودی و در نتیجه انتقال O_3 به سطح زمین دارد.

فرم شهری عمدتاً با درنظرگرفتن عناصر اقلیمی به‌عنوان عوامل واسطه بر انتشار آلودگی هوا تأثیر می‌گذارد (*Stone, 2008: 688*). همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد در تهران پارامترهای هواشناسی دما، بارش و سرعت باد و در تبریز دما و سرعت باد نقش مهمی در ارتباط شاخص‌های فرم شهری با غلظت آلاینده‌های جوی ایفا می‌کنند. همبستگی منفی دما با شاخص‌های CA، CLUMPY، CONTAG و AI و همبستگی مثبت آن با شاخص‌های LSI و ENN_MN در تهران به معنای کاهش دما با افزایش اندازهٔ شهر و فشردگی فرم شهری و افزایش دما با افزایش تکه‌تکه‌شدگی و پراکندگی فرم شهری است. در تبریز نیز دما دارای رابطه‌ای معکوس با شاخص‌های CA، CLUMPY و AI و رابطه‌ای مستقیم با شاخص LSI است. در واقع، فرم شهری با اثر جزیره گرمایی شهری مرتبط است و ویژگی‌های مختلف فرم شهری مانند: اندازه، تکه‌تکه‌شدگی، فشردگی و پراکنده‌رویی با تأثیر بر دمای شهر، سطح انتشار آلودگی هوا در محیط‌های شهری را تغییر می‌دهند (*Zhao et al, 2016: 2421; Yin et al, 2018: 696*). با توجه به نتایج چن و همکاران، افزایش دما به پراکندگی آلاینده‌ها کمک می‌کند (*Chen et al, 2018: 5343*). با این‌حال، یافته‌های لیانگ و همکاران نشان‌می‌دهد که اثر جزیره گرمایی برای پراکندگی آلاینده‌های هوا مفید نیست (*Liang et al, 2020: 135011*). از سوی دیگر، افزایش دمای هوای شهرها با افزایش مصرف انرژی و تولید گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) همراه است (*Li et al, 2021: 107029*). نتایج پژوهش حاضر نشان‌می‌دهد که افزایش پراکنده‌رویی فرم شهری از طریق افزایش دما، غلظت آلاینده‌های NO_2 و $PM_{2.5}$ در سطح شهر تهران را کاهش داده است. در تبریز نیز افزایش اندازهٔ شهر و تراکم فرم آن با کاهش دما به افزایش میانگین غلظت آلاینده‌های NO_2 و

$PM_{2.5}$ در سطح شهر انجامیده است. افزایش اندازهٔ شهر و فشردگی فرم شهری از طریق کاهش دما منجر به کاهش غلظت O_3 و افزایش تکه‌تکه‌شدگی شهر و پراکنده‌رویی فرم آن از طریق افزایش دما باعث افزایش سطح غلظت این آلاینده در شهرهای تهران و تبریز می‌شود. عکس این وضعیت برای آلاینده BC نیز صادق است. افزایش اندازهٔ شهر و تراکم فرم شهری به‌واسطهٔ کاهش پارامتر دما منجر به افزایش غلظت ذرات BC و قطعه‌شدگی و پراکنده‌رویی فرم شهری به‌واسطهٔ افزایش دما باعث کاهش سطح غلظت این آلاینده در تهران و تبریز می‌شود. بارش در تهران دارای همبستگی مثبت با CA، CLUMPY، CONTAG و AI و همبستگی منفی با LSI است که می‌تواند نشان‌دهندهٔ افزایش میزان بارش با افزایش اندازهٔ شهر و فشردگی فرم شهری و کاهش مقدار این پارامتر هواشناسی با افزایش تکه‌تکه‌شدگی فرم شهر باشد؛ بنابراین، اندازه، تراکم و قطعه‌شدگی فرم شهر تهران تأثیر غیر مستقیمی بر انتشار آلاینده‌های O_3، PM_{10} و BC در سطح این شهر از طریق بارش دارد. افزایش اندازهٔ شهر از طریق افزایش بارش باعث کاهش غلظت آلاینده O_3 در سطح شهر تهران شده است. افزایش تکه‌تکه‌شدگی و تراکم فرم شهری نیز با تأثیر بر کاهش بارش، افزایش غلظت آلاینده‌های O_3 و PM_{10} را به‌دنبال داشته است. در مقابل، بزرگی شهر و تراکم فرم شهری با تأثیر غیر مستقیم بر غلظت BC از طریق افزایش پارامتر بارش به افزایش آلودگی هوا از نظر این آلاینده منجرمی‌شود و افزایش تکه‌شدگی فرم شهر از طریق کاهش این پارامتر به کاهش آلودگی هوا در تهران از نظر آلاینده BC می‌انجامد. تأثیر غیر مستقیم اندازهٔ شهر و تکه‌تکه‌شدگی فرم شهری بر انتشار آلاینده‌های هوا از طریق بارش توسط ژانگ و همکاران نیز نشان داده شده است (*Zhang et al, 2019: 641*). میانگین سرعت باد در تهران دارای همبستگی منفی با PARA_MN و همبستگی مثبت با ENN_MN است؛ بنابراین می‌توان‌گفت افزایش پیچیدگی شکل شهر تهران با کاهش سرعت باد منجر به تجمع آلاینده‌های NO_2، PM_{10} و $PM_{2.5}$ در سطح شهر شده است. در مقابل، افزایش پراکندگی فرم شهری از طریق افزایش سرعت باد سبب افزایش غلظت آلاینده O_3 و کاهش غلظت ذرات کربن سیاه در شهر تهران شده است. همبستگی منفی سرعت باد با شاخص‌های CA، CLUMPY و AI در تبریز نیز به معنای کاهش سرعت باد با افزایش اندازهٔ شهر و تراکم فرم شهری و همبستگی مثبت آن با شاخص LSI به‌معنای افزایش سرعت باد با افزایش تکه‌شدگی فرم شهر است. افزایش اندازهٔ شهر تبریز از طریق کاهش سرعت باد غلظت آلاینده‌های NO_2، $PM_{2.5}$ و BC را افزایش و در عین حال، غلظت آلاینده O_3 را کاهش‌می‌دهد. تکه‌تکه‌شدگی منظر شهر تبریز نیز با افزایش سرعت باد، غلظت SO_2 و BC را کاهش و غلظت O_3 را افزایش‌می‌دهد. کاهش سرعت باد در نتیجهٔ افزایش فشردگی فرم شهری باعث افزایش غلظت آلاینده‌های NO_2، $PM_{2.5}$ و BC و کاهش میانگین غلظت آلاینده O_3 در سطح شهر تبریز شده است. به‌طورکلی می‌توان‌گفت یک شهر تکه‌تکه‌تر دارای دره‌های خیابانی بیشتری است که جهت و سرعت باد را تغییر می‌دهد (*Huang et al, 2019: 1152*). مناطق شهری با تراکم بالا نیز بر سرعت باد و شرایط تهویه تأثیر می‌گذارد (*Zaki et al, 2022: 1362*). از آنجایی که افزایش سرعت باد منجر به پراکندگی آلاینده‌ها می‌شود، تکه‌تکه‌شدگی و فشردگی فرم شهری ممکن است بر انتشار آلودگی هوا از طریق محیط باد تأثیر بگذارد. اثربخشی تکه‌تکه‌شدگی و تراکم فرم شهری بر انتشار آلودگی هوا از طریق باد در مطالعات دیگر نیز تأیید شده است (*McCarty & Kaza, 2015: 168*).



شکل ۳: همبستگی اسپیرمن بین شاخص‌های فرم شهری، آلاینده‌های هوا و عناصر هواشناسی در تهران و تبریز
(* معناداری آماری درسطح اطمینان ۹۵٪ را نشان‌می‌دهد)
مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳

تأثیر شاخص‌های فرم شهری بر سطح غلظت آلاینده‌های جوی در تبریز و تهران

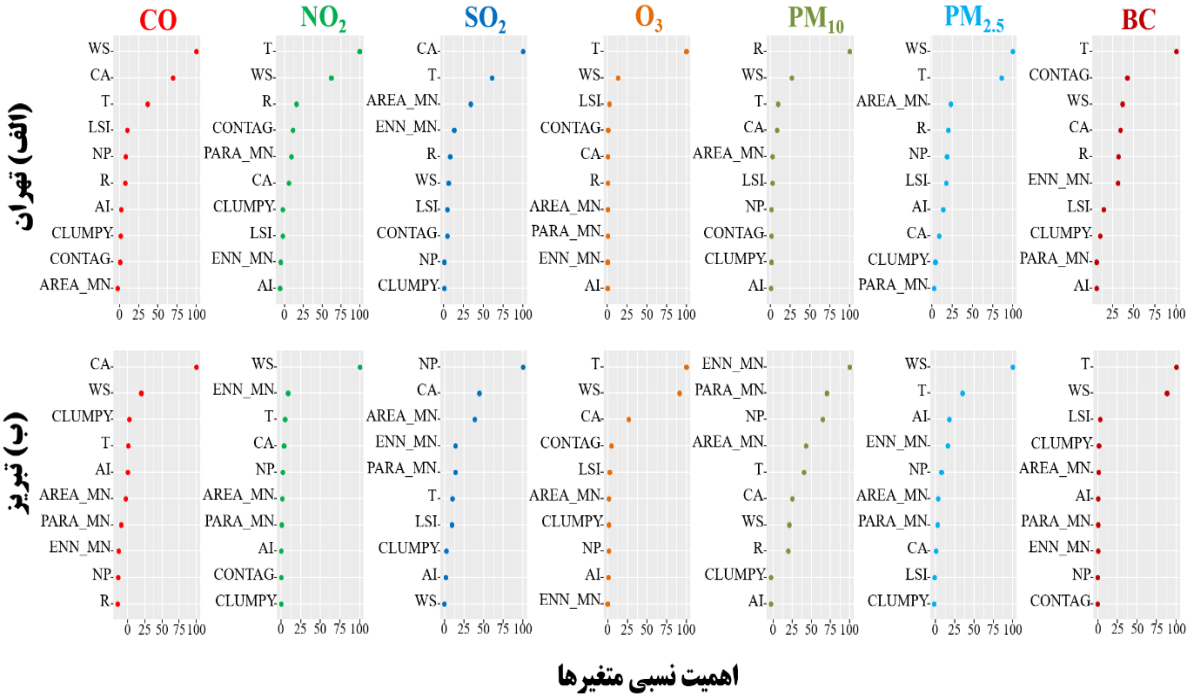
در مجموع ۲۸ مدل (۱۴ مدل برای تهران و ۱۴ مدل برای تبریز) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (MLR و RF) برای آگاهی بهتر از تأثیرات احتمالی شاخص‌های فرم شهری (CA، PARA_MN، LSI، NP، AREA_MN، CLUMPY، ENN_MN، CONTAG و AI) و پارامترهای هواشناسی (T، R و WS) بر سطح غلظت آلاینده‌های جوی معیار و ذرات کربن سیاه در تهران و تبریز از ژوئیه ۲۰۱۵ تا ژوئیه ۲۰۲۱ ساخته شد. شکل ۴ رتبه‌بندی شاخص‌های فرم شهری و متغیرهای هواشناسی در تبیین تغییرپذیری غلظت آلاینده‌های هوا در تهران و تبریز را براساس اهمیت نسبی مبتنی بر جایگشت آن‌ها در داده‌های آموزشی با استفاده مدل جنگل تصادفی نشان‌می‌دهد. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل خطی MLR و مدل غیر خطی RF شامل مقادیر R^2 و RMSE نیز در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد WS، CA و T به‌ترتیب از مهمترین متغیرهای پیشگوی تأثیرگذار در تغییرات سطح غلظت آلاینده CO در تهران محسوب می‌شوند. در شهر تبریز نیز شاخص CA و پارامتر WS به‌عنوان عوامل اصلی مؤثر در تغییرات غلظت CO شناخته شده است. این نتایج نشان‌می‌دهد که مقیاس شهر در ارزیابی کیفیت هوا از نظر این آلاینده ضروری است. برای آلاینده NO_2 در تهران، پارامترهای هواشناسی T، WS و R به‌عنوان مهمترین متغیرهای تأثیرگذار شناسایی شدند نه شاخص‌های فرم شهری. با این‌حال، اهمیت نسبی بالای این پارامترها به معنای عدم تأثیرگذاری فرم شهری بر کیفیت هوا از نظر آلاینده NO_2 نیست و تنها نقش برجستهٔ عوامل جوی به‌ویژه دما و سرعت باد حتی در مواقع کنترل منابع انتشار آلاینده‌ها را تأیید می‌کند. شاخص‌های CONTAG و PARA_MN که به‌ترتیب معرف پراکندگی و پیچیدگی فرم شهری هستند، در مقایسه با سایر شاخص‌های فرم شهری از اهمیت بیشتری در تبیین تغییرپذیری غلظت NO_2 در تهران برخوردارند. در یکی از شهرهای ملی مرکزی چین نیز ارتباط معنادار مهمی بین غلظت NO_2 و شاخص CONTAG

مشاهده شده است (*Sun et al, 2022: 106155*). در تبریز نیز سه متغیر WS، ENN_MN و T به‌عنوان مؤثرترین متغیرها در توضیح تغییرات سطح غلظت NO_2 شناخته شدند. نمودارهای رتبه‌بندی اهمیت نسبی شاخص‌های فرم شهری و پارامترهای هواشناسی مؤثر در آلاینده SO_2 بیانگر نقش بسیار مهم متغیرهای CA، T و AREA_MN در پیش‌بینی مقادیر SO_2 در تهران و اثرگذاری متغیرهای NP، CA و AREA_MN در سطح غلظت این آلاینده در تبریز است؛ بنابراین می‌توان گفت اندازهٔ شهر و تکه‌تکه‌شدگی فرم شهری تأثیر قابل توجهی در تغییرات غلظت آلاینده SO_2 در شهرهای تهران و تبریز ایفا می‌کنند. نقش بسیار مهم اندازهٔ شهر در تغییرات غلظت SO_2 در مطالعات دیگر نیز تأیید شده است (*Wang et al, 2022: 104040*). پارامترهای دما و سرعت باد مهمترین متغیرهای اثرگذار در توضیح تغییرات غلظت آلاینده O_3 در تهران و تبریز هستند و نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش غلظت این آلایندهٔ ثانویه در محیط‌های شهری دارند. شاخص‌های LSI، CONTAG و CA نیز سه شاخص فرم شهری مؤثر بر سطح غلظت O_3 در تهران و تبریز هستند که نشان‌می‌دهد غلظت O_3 علاوه بر پارامترهای هواشناسی تحت تأثیر تکه‌تکه‌شدگی، پراکنده‌رویی شهری و اندازهٔ شهر نیز قرار دارد. پارامترهای R، WS و T مهمترین متغیرهای تأثیرگذار در سطح غلظت ذرات PM_{10} در شهر تهران هستند و شاخص‌های CA، AREA_MN و LSI در رتبه‌های بعدی اهمیت نسبی قرار دارند. این نتایج نشان‌می‌دهد که علاوه بر پارامترهای هواشناسی، شاخص‌های اندازهٔ شهر و تکه‌تکه‌شدگی فرم شهر نیز در انتشار PM_{10} در تهران سهیم‌اند. این در حالی است که غلظت PM_{10} در تبریز بیشتر تحت تأثیر شاخص‌های فرم شهری به‌ویژه ENN_MN، PARA_MN، NP و AREA_MN که به‌ترتیب بیانگر تراکم شهری، پیچیدگی شکل شهری و تکه‌تکه‌شدگی فرم شهری هستند قرار داشته و پارامتر هواشناسی دما در جایگاه بعدی اثرگذاری دیده می‌شود. در مطالعات دیگر نیز ارتباط مهم معناداری میان غلظت PM_{10} و پیچیدگی شکل شهر دیده شده است (*Sun et al, 2022: 106155*). سرعت باد و دما تأثیر چشمگیری در انتشار ذرات ریز معلق در هوا ($PM_{2.5}$) در تهران و تبریز دارند و به‌عنوان مهمترین متغیرهای توضیحی در پیش‌بینی مقادیر ذرات $PM_{2.5}$ در این شهرها در طول دورهٔ آماری مورد مطالعه شناخته می‌شوند. در تهران AREA_MN که شاخصی از تکه‌تکه‌شدگی فرم شهری محسوب می‌شود و بارش در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در تبریز نیز تراکم و تکه‌تکه‌شدگی فرم شهری مهمترین شاخص‌های فرم شهری مؤثر در تغییرات غلظت $PM_{2.5}$ هستند. اندازهٔ شهر، تکه‌تکه‌شدگی فرم و شکل شهر نیز اثرات قابل توجهی بر غلظت $PM_{2.5}$ در مناطق شهری چین با سطوح مختلف شهرنشینی داشته است (*Gao et al, 2023: 116953*). دمای هوا به‌عنوان تأثیرگذارترین متغییر در تغییرات سطح غلظت ذرات کربن سیاه در تهران و تبریز مشاهده می‌شود. در تهران، CONTAG، WS، CA و R و در تبریز WS، LSI و CLUMPY به‌ترتیب متغیرهای پیشگوی مؤثر بعدی هستند. این نتایج نشان‌می‌دهد که پراکنده‌رویی شهری و اندازهٔ شهر تأثیر قابل توجهی بر غلظت BC در تهران دارد و در تبریز تکه‌تکه‌شدگی شهر و فشردگی فرم آن از اهمیت بیشتری برخوردارند.

بنابراین به‌طورکلی می‌توان‌گفت فرم شهری نقش مهمی در انتشار آلاینده‌های هوا در طول دورهٔ مورد مطالعه در شهرهای تهران و تبریز ایفا کرده است. براساس میزان اهمیت شاخص‌های فرم شهری مؤثر بر هفت آلایندهٔ هوا، اندازهٔ شهر (CA) به‌عنوان یک عامل بسیار مهم تأثیرگذار بر غلظت بیشتر آلاینده‌ها در تهران و تبریز از جمله CO، SO_2، O_3، PM_{10} و BC شناخته شد. تأثیر قابل توجه اندازهٔ شهر بر آلودگی هوا در مطالعات دیگر نیز نشان داده شده است (*Liu et al, 2018: 15554; Shi et al, 2019: 118088*). تکه‌تکه‌شدگی فرم شهری نیز عامل مهم دیگری است که

با تأثیر بر تولید، انتشار و پالایش آلودگی هوا نقش مهمی در غلظت آلاینده‌هایی چون؛ SO_2، PM_{10} و $PM_{2.5}$ در تهران و تبریز بازی می‌کند. به‌طور مشابه، لی (*Lee, 2020: 103935*)، مک‌کارتی و کازا (*McCarty & Kaza, 2015: 168*) و رودریگز و همکاران (*Rodriguez et al, 2016: 1*) دریافتند که تکه‌تکه‌شدگی بیشتر فرم شهری با غلظت بالاتر آلاینده‌های هوا در طول دوره‌های عادی همراه است. علاوه بر این، شایان ذکر است که پیچیدگی شکل شهری تأثیر نسبتاً قوی بر غلظت برخی آلاینده‌ها از جمله NO_2 در تهران و PM_{10} در تبریز داشته است. نتایج مطالعات فن و همکاران (*Fan et al, 2018: 405*) و لی و ژو (*Li & Zhou, 2019: 130*) نیز بیانگر تأثیر بی‌نظمی شکل شهری بر کاهش ارتباطات ترافیکی بین نقاط مختلف و در نتیجه بهبود کیفیت هوا است. تراکم/پراکنده‌رویی فرم شهری نیز تأثیر قابل توجهی بر غلظت آلاینده‌های NO_2، $PM_{2.5}$ و BC در تهران و تبریز دارد.

نتایج حاصل از مقایسهٔ کارایی مدل خطی MLR و مدل غیر خطی RF براساس مقادیر معیارهای ارزیابی ارائه‌شده در جدول ۳ نیز حاکی از عملکرد بهتر مدل جنگل تصادفی در پیش‌بینی غلظت تمامی آلاینده‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص‌های فرم شهری و پارامترهای هواشناسی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه است. در واقع دقت بالا و توانایی الگوریتم جنگل تصادفی در مدل‌سازی روابط پیچیده میان متغیرها، به ارائهٔ مقادیر بالاتر ضریب R^2 و مقادیر کمتر خطای پیش‌بینی توسط این روش انجامیده است.



شکل ۴: اهمیت نسبی استانداردشده مبتنی بر جایگشت شاخص‌های فرم شهری و پارامترهای هواشناسی در تبیین تغییرپذیری غلظت آلاینده‌های جوی معیار و ذرات کربن سیاه در الف)تهران و ب) تبریز توسط مدل جنگل تصادفی (RF)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳

جدول ۳: مقایسهٔ عملکرد مدل‌های MLR و RF در پیش‌بینی مقادیر غلظت آلاینده‌های جوی در تبریز و تهران

شهر	آلاینده	الگوریتم‌های مدل‌سازی			
		جنگل تصادفی (RF)		رگرسیون خطی چندگانه (MLR)	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
تهران	CO (mg/m^3)	۰/۸۷	۰/۳۶	۰/۵۹	۰/۴۸
	NO_2 ($\mu g/m^3$)	۰/۹۵	۵/۷۳	۰/۵۷	۱۰/۵۸
	SO_2 ($\mu g/m^3$)	۰/۹۲	۲/۹۲	۰/۴۳	۶/۰۴
	O_3 ($\mu g/m^3$)	۰/۹۸	۲/۷۱	۰/۸۸	۵/۷۸
	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	۰/۹۵	۴	۰/۷۴	۷/۵۰
	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	۰/۹۸	۱/۹۳	۰/۸۳	۲/۹۰
	BC ($\mu g/m^3$)	۰/۹۷	۰/۰۲	۰/۸۰	۰/۰۴
تبریز	CO ($\mu g/m^3$)	۰/۸۸	۰/۴۸	۰/۷۷	۰/۵۴
	NO_2 ($\mu g/m^3$)	۰/۹۳	۲/۲۴	۰/۷۹	۳/۴۵
	SO_2 ($\mu g/m^3$)	۰/۹۴	۳/۷۱	۰/۷۸	۵/۰۶
	O_3 ($\mu g/m^3$)	۰/۹۶	۳/۴۰	۰/۸۶	۵/۵۸
	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	۰/۹۶	۳/۶۴	۰/۳۹	۷/۸۴
	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	۰/۹۲	۱/۱۲	۰/۶۹	۱/۸۶
	BC ($\mu g/m^3$)	۰/۹۳	۰/۰۳	۰/۸۰	۰/۰۵

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳

نتیجه‌گیری

مطالعهٔ حاضر اثرات ویژگی‌های مختلف فرم شهری شامل: اندازه، شکل، تکه‌تکه‌شدگی و فشردگی/پراکندگی بر غلظت آلاینده‌های CO، NO_2، SO_2، O_3، PM_{10}، $PM_{2.5}$ و BC در شهرهای تهران و تبریز در طول ۲۰۲۱ -۲۰۱۵ را با در نظر گرفتن دما، بارش و سرعت باد به‌عنوان عوامل واسطه مورد بررسی قرار داده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش اندازهٔ شهر باعث بهبود کیفیت هوا از نظر آلاینده‌های CO، SO_2 و O_3 و کاهش کیفیت هوا از نظر آلاینده‌های NO_2، $PM_{2.5}$ و BC شده است؛ بنابراین رابطهٔ بین گسترش شهری و کیفیت هوا رابطهٔ پیچیده‌ای است و می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند: برنامه‌ریزی شهری، در دسترس‌بودن فضاهای سبز شهری و اقدامات کنترل آلودگی قرارگیرد. افزایش پیچیدگی شکل شهر غلظت آلاینده‌های NO_2، PM_{10} و $PM_{2.5}$ را در سطح شهر تهران افزایش داده است. اثر تکه‌شدگی بالا باعث افزایش سطح غلظت آلاینده‌های NO_2، O_3 و PM_{10} و کاهش غلظت آلاینده‌های SO_2 و BC شده است. پراکنده‌رویی فرم شهری با کاهش کیفیت هوا از منظر آلاینده‌های SO_2، O_3 و PM_{10} و بهبود کیفیت هوا از نظر آلاینده گازی NO_2 و ذرات ریزمعلق در هوا ($PM_{2.5}$ و BC) همراه بوده است. نتایج مطالعهٔ قدمی و عبداله‌وند (۱۳۹۷) درخصوص بررسی تأثیر سناریوهای ساختار فضایی بر آلودگی هوای شهر تهران نشان‌می‌دهد که ساختار فضایی بی‌مرکز یا پراکنده تأثیر معناداری بر افزایش میزان آلودگی هوای تهران دارد. سرور و همکاران (۱۳۹۹) نیز با تحلیل فضایی مؤلفه‌های تأثیرگذار بر آلودگی هوای شهر تبریز، افزایش سطح غلظت آلایندهٔ دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) را با افزایش تراکم ساختمان‌ها، جمعیت و صنایع مرتبط دانستند. با توجه به نتایج این مطالعات و یافته‌های پژوهش حاضر، می‌توان‌گفت اثرات کلی پراکندگی/تراکم فرم شهری بر آلودگی هوا به عوامل مختلفی از جمله؛ دسترسی به حمل‌ونقل عمومی، سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری و شرایط محلی بستگی دارد. همچنین، نتایج مطالعهٔ حاضر نشان‌می‌دهد فرم شهری به‌طور مستقیم بر تعداد منابع تولید آلاینده‌های هوا تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، فرم‌های مختلف شهری با درنظرگرفتن دما، بارش و سرعت باد به‌عنوان عوامل واسطه به‌طور غیر مستقیم بر انتشار آلودگی هوا در سطح شهرهای تهران و تبریز تأثیر می‌گذارند. اندازه، تکه‌تکه‌شدگی، فشردگی و پراکندگی فرم شهری با تشکیل جزایر

گرمایی شهری مرتبط هستند و از طریق دما بر سطح غلظت آلاینده‌های NO_2، O_3، $PM_{2.5}$ و BC در تهران و تبریز و تجمع یا پراکندگی این آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارند. حسین‌آبادی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی روند وارونگی‌های دمایی کلان‌شهرهای تهران و تبریز نشان‌دادند که توسعهٔ جزیره گرمایی شهری و افزایش آلودگی هوا باعث کاهش معنادار وارونگی تابشی در همهٔ ماه‌های سال شده است و روند افزایشی وارونگی فرونشستی را پیامد تشدید گنبد آلودهٔ این کلان‌شهرها در هنگام حاکمیت سامانهٔ پرفشار دانسته‌اند. با توجه به یافته‌های پژوهش حاضر، اندازه، تراکم و قطعه‌شدگی فرم شهر تهران تأثیر غیر مستقیمی بر انتشار آلاینده‌های O_3، PM_{10} و BC در سطح این شهر از طریق بارش دارد. پیچیدگی شکل و پراکنده‌رویی فرم شهر تهران و اندازهٔ شهر تبریز، تکه‌تکه‌شدگی و تراکم فرم آن از طریق تأثیر بر سرعت وزش باد منجر به تجمع یا پراکندگی آلاینده‌ها در سطح این شهرها شده است.

نتایج این مطالعه نشان‌می‌دهد که بهبود کیفیت هوا در مناطق شهری تهران و تبریز مستلزم توجه بیشتر به تأثیر اندازهٔ شهر، تکه‌تکه‌شدگی فرم شهری، پیچیدگی شکل شهر، پراکنده‌رویی و تراکم فرم شهری بر انتشار آلاینده‌های هوا در این شهرهاست. علاوه بر این، سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری و کاربری زمین باید به ارتباطات فضایی بین الگوهای مختلف کاربری زمین اهمیت داده و از فرم‌های شهری معقول‌تری حمایت شود. همچنین رابطهٔ بین فرم شهری و کیفیت هوا در مناطق مختلف متفاوت است؛ بنابراین سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری و کاربری اراضی باید مطابق با ساختار صنعتی، شرایط آب‌وهوایی، سبک زندگی و سایر عوامل در مناطق مختلف تدوین شود. رابطهٔ فرم شهری با کیفیت هوا رابطهٔ پیچیده‌ای بوده و شناخت آن نیازمند تحقیقات بیشتری است. مطالعات آینده می‌تواند با درنظرگرفتن طرح اولیه و فاز توسعهٔ شهر و دیگر ویژگی‌های منطقهٔ مورد مطالعه، مانند جمعیت و شرایط اجتماعی-اقتصادی هنگام بررسی اثرات فرم‌های شهری بر کیفیت هوا به درک بهتر این روابط کمک کنند. از سوی دیگر این مطالعه در سطح دو شهر صورت گرفته است و درنظرگرفتن تعداد بیشتری از شهرهای آلودهٔ ایران و انجام مقایسهٔ بین شهری می‌تواند پیشرفت مهمی در زمینهٔ شناخت تأثیر فرم شهری بر کیفیت هوا در سطح کشور فراهم آورد. همچنین یافته‌های محققان حاکی از تأثیر متفاوت فرم شهری بر انتشار و غلظت آلاینده‌های هوا در مقیاس‌های فضایی مختلف مانند سطح کلان‌شهر و سطح جاده است؛ بنابراین بررسی اثرات فرم شهری بر آلودگی هوا در سطح مناطق شهرداری نیز می‌تواند نتایج ارزنده‌ای ارائه‌دهد.

منابع

اداره کل حفاظت محیط زیست استان آذربایجان شرقی. مرکز پایش و کنترل آلودگی هوای شهر تبریز.
https://as.doe.ir/

حسین‌آبادی، نسرین؛ تقی طاووسی؛ عباس مفیدی؛ محمود خسروی (۱۳۹۸). بررسی روند وارونگی‌های دمایی کلان‌شهرهای ایران (تهران، مشهد، و تبریز)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. دوره ۵۱. شماره ۴. ۷۱۳-۶۹۳.
https://doi.org/10.22059/JPHGR.2019.277884.1007353

سازمان هواشناسی کشور. سامانه درخواست داده‌های هواشناسی.
https://data.irimo.ir/

سرور، هوشنگ؛ مرضیه اسمعیل‌پور؛ منصور خیری‌زاده؛ مهتاب امرایی (۱۳۹۹). تحلیل فضایی مؤلفه‌های تأثیرگذار بر آلودگی هوای شهر تبریز، مخاطرات محیط طبیعی. دوره ۹. شماره ۲۴. ۱۷۲-۱۵۱.
https://doi.org/10.22111/jneh.2020.31469.1558

شهرداری تهران. شرکت کنترل کیفیت هوا.
https://air.tehran.ir/

قدمی، مصطفی؛ پریناز یوسفیان (۱۳۹۳). تحلیلی بر تغییرات ساختار فضایی شهر اصفهان با گریزی بر آلودگی هوا، مطالعات و ساختار کارکرد شهری. دوره ۲. شماره ۸. ۸۶-۶۳.

قدمی، مصطفی؛ هادی عبداله‌وند (۱۳۹۷). بررسی تأثیر سناریوهای ساختار فضایی شهر بر آلودگی هوا (نمونه مورد مطالعه: شهر تهران)، جغرافیا و توسعهٔ فضای شهری. دوره ۵. شماره ۱. ۲۸۰-۲۶۱.

https://doi.org/10.22067/gusd.v5i1.73356

References

Bartholomew, K., & Ewing, R (2008). Land use–transportation scenarios and future vehicle travel and land consumption: A meta-analysis. Journal of the American Planning Association, 75(1), 13-27.
https://doi.org/10.1080/01944360802508726

Bereitschaft, B., & Debbage, K (2013). Urban form, air pollution, and CO2 emissions in large US metropolitan areas. The Professional Geographer, 65(4), 612-635.
https://doi.org/10.1080/00330124.2013.799991

Boehmke, B., & Greenwell, B.M (2019). Hands-on machine learning with R. Chapman and Hall/CRC., 1st Eds, 514p.
https://doi.org/10.1201/9780367816377

Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S.B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V.J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., & Schwehr, K (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data, 9(1), 251.
https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4

Calderón-Garcidueñas, L., & Villarreal-Ríos, R (2017). Living close to heavy traffic roads, air pollution, and dementia. The Lancet, 389(10070), 675-677.
https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)32596-X

Chen, Y., Li, X., Zheng, Y., Guan, Y., & Liu, X (2011). Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: A case study in the Pearl River Delta, 2005–2008. Landscape and urban planning, 102(1), 33-42.
https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.007

Chen, Z., Xie, X., Cai, J., Chen, D., Gao, B., He, B., Cheng, N., & Xu, B (2018). Understanding meteorological influences on PM2.5 concentrations across China: a temporal and spatial perspective. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(8), 5343-5358.
https://doi.org/10.5194/acp-18-5343-2018

Du, G., Shin, K.J., & Managi, S (2018). Variability in impact of air pollution on subjective well-being. Atmospheric Environment, 183, 175-208.
https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.018

Ene, E., & McGarigal, K (2023). FRAGSTATS User Guidelines.
https://www.fragstats.org/index.php/documentation

Fan, C., Tian, L., Zhou, L., Hou, D., Song, Y., Qiao, X., & Li, J (2018). Examining the impacts of urban form on air pollutant emissions: Evidence from China. Journal of Environmental Management, 212, 405-414.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.001

Fan, W., Wang, H., Liu, Y., & Liu, H (2020). Spatio-temporal variation of the coupling relationship between urbanization and air quality: A case study of Shandong Province. Journal of Cleaner Production, 272, 122812.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122812

Fang, C., Wang, S., & Li, G (2015). Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: A case study of 30 provincial capital cities. Applied energy, 158, 519-531.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.095

Gao, G., Pueppke, S.G., Tao, Q., Wei, J., Ou, W., & Tao, Y (2023). Effect of urban form on PM2.5 concentrations in urban agglomerations of China: Insights from different urbanization levels and seasons. Journal of Environmental Management, 327, 116953.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116953

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015). MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d, 1-Hourly, Time-averaged, single-level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: March 20, 2024.
https://doi.org/10.5067/KLICLTZ8EM9D

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote sensing of Environment, Vol. 202, 18-27.
https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
Greenwell, B. M., Boehmke, B. C., & Gray, B (2020). Variable Importance Plots-An Introduction to the vip Package. The R Journal, 12(1), 343-366.
https://doi.org/10.32614/rj-2020-013
Hankey, S., & Marshall, J.D (2017). Urban form, air pollution, and health. Current environmental health reports, 4, 491-503.
https://doi.org/10.1007/s40572-017-0167-7
Hassan, N.A., Hashim, Z., & Hashim, J.H (2016). Impact of climate change on air quality and public health in urban areas. Asia Pacific Journal of Public Health, 28(2_suppl), 38S-48S.
https://doi.org/10.1177/1010539515592951
Hesselbarth, M. H., Sciaini, M., With, K. A., Wiegand, K., & Nowosad, J (2019). landscapemetrics: an open- source R tool to calculate landscape metrics. Ecography, 42(10), 1648-1657.
https://doi.org/10.1111/ecog.04617
Higgins, C.D., Adams, M.D., Réquia, W.J., & Mohamed, M (2019). Accessibility, air pollution, and congestion: Capturing spatial trade-offs from agglomeration in the property market. Land Use Policy, 84, 177-191.
https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.002
Huang, Q., Xu, C., Jiang, W., Yue, W., Rong, Q., Gu, Z., & Su, M (2021). Urban compactness and patch complexity influence PM2.5 concentrations in contrasting ways: Evidence from the Guangdong-Hong Kong Macao Greater Bay Area of China. Ecological Indicators, 133, 108407.
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108407
Huang, Y.D., Hou, R.W., Liu, Z.Y., Song, Y., Cui, P.Y., & Kim, C.N (2019). Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon. Aerosol and Air Quality Research, 19(5), 1152-1171.
https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0344
Ikram, M., Yan, Z., Liu, Y., & Qu, W (2015). Seasonal effects of temperature fluctuations on air quality and respiratory disease: a study in Beijing. Natural Hazards, 79(2), 833-853.
https://doi.org/10.1007/s11069-015-1879-3
Johnson, T., Mol, A.P., Zhang, L., & Yang, S (2017). Living under the dome: Individual strategies against air pollution in Beijing. Habitat International, 59, 110-117.
https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.11.014
Korkmaz, S., Göksülük, D., & Zararsiz, G. Ö. K. M. E. N (2014). MVN: An R package for assessing multivariate normality. The R Journal, 6(2), 151-162.
https://doi.org/10.32614/RJ-2014-031
Kuhn, M., & Wickham, H (2020). Tidymodels: A Collection of Packages for Modeling and Machine Learning using Tidyverse Principles.
https://doi.org/10.32614/CRAN.package.tidymodels
Lee, C (2019). Impacts of urban form on air quality in metropolitan areas in the United States. Computers, Environment and Urban Systems, 77, 101362.
https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101362
Lee, C (2020). Impacts of multi-scale urban form on PM2.5 concentrations using continuous surface estimates with high-resolution in US metropolitan areas. Landscape and Urban Planning, 204, 103935.
https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103935
Li, F., & Zhou, T (2019). Effects of urban form on air quality in China: An analysis based on the spatial autoregressive model. Cities, 89, 130-140.
https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.025
Li, F., Zhou, T., & Lan, F (2021). Relationships between urban form and air quality at different spatial scales: A case study from northern China. Ecological Indicators, 121, 107029.
https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106155
Liang, Z., Wu, S., Wang, Y., Wei, F., Huang, J., Shen, J., & Li, S (2020). The relationship between urban form and heat island intensity along the urban development gradients. Science of the Total Environment, 708, 135011.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135011

Lin, B., & Zhu, J (2018). Changes in urban air quality during urbanization in China. Journal of Cleaner Production, 188, 312-321.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.293
Liu, Y., Arp, H.P.H., Song, X., & Song, Y (2017). Research on the relationship between urban form and urban smog in China. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 44(2), 328-342.
https://doi.org/10.1177/0265813515624687
Liu, Y., Wu, J., Yu, D., & Ma, Q (2018). The relationship between urban form and air pollution depends on seasonality and city size. Environmental Science and Pollution Research, 25(16), 15554-15567.
https://doi.org/10.1007/s11356-018-1743-6
Lu, C., & Liu, Y (2016). Effects of China's urban form on urban air quality. Urban studies, 53(12), 2607-2623.
https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.025
McCarty, J., & Kaza, N (2015). Urban form and air quality in the United States. Landscape and Urban Planning, 139, 168-179.
https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.03.008
Miao, Z., Chen, X., & Baležentis, T (2021). Improving energy use and mitigating pollutant emissions across "Three Regions and Ten Urban Agglomerations": A city-level productivity growth decomposition. Applied Energy, 283, 116296.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116296
Mou, Y., Song, Y., Xu, Q., He, Q., & Hu, A (2018). Influence of urban-growth pattern on air quality in China: A study of 338 cities. International journal of environmental research and public health, 15(9), 1805.
https://doi.org/10.3390/ijerph15091805
Mukaka, M. M (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. Malawi medical journal, 24(3), 69-71. PMID: 23638278; PMCID: PMC3576830.
Ouyang, X., Wei, X., Li, Y., Wang, X.C., & Klemeš, J.J (2021). Impacts of urban land morphology on PM2.5 concentration in the urban agglomerations of China. Journal of Environmental Management, 283, 112000.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112000
Rodríguez, M.C., Dupont-Courtade, L., & Oueslati, W (2016). Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1-9.
https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.190
Ryu, C (2022). dlookr: Tools for data diagnosis, exploration, transformation. R package version 0.6.2.9001.
https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dlookr
She, Q.,Peng, X., Xu, Q., Long, L., Wei, N., Liu, M., Jia, W., Zhou, T., Han, J., & Xiang, W (2017). Air quality and its response to satellite-derived urban form in the Yangtze River Delta, China. Ecological Indicators, 75, 297-306.
https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.045
Shi, K., Li, Y., Chen, Y., Li, L., & Huang, C (2019). How does the urban form-PM2.5 concentration relationship change seasonally in Chinese cities? A comparative analysis between national and urban agglomeration scales. Journal of cleaner production, 239, 118088.
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118088
Spearman, C (1961). The proof and measurement of association between two things. In J. J. Jenkins & D. G. Paterson (Eds.), Studies in individual differences: The search for intelligence (45-58). Appleton-Century-Crofts.
https://doi.org/10.1037/11491-005
Stankovic, S., Vaskovic, V., Petrovic, N., & Radojicic, Z (2012). Sustainable air pollution management in urban areas caused by traffic: Case study Banja Luka. Technics Technologies Education Management–TTEM, 7(4), 1615-1619.
https://rfos.fon.bg.ac.rs/handle/123456789/986
Stekhoven, D. J., & Bühlmann, P (2012). MissForest-non-parametric missing value imputation for mixed-type data. Bioinformatics, 28(1), 112-118.
https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597
Stone Jr, B (2008). Urban sprawl and air quality in large US cities. Journal of environmental management, 86(4), 688-698.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.034
Sun, C., Chen, X., Zhang, S., & Li, T (2022). Can changes in urban form affect PM2.5 concentration? A comparative analysis from 286 prefecture-level cities in China. Sustainability, 14(4), 2187.
https://doi.org/10.3390/su14042187

Sun, J., Zhou, T., & Wang, D (2022). Relationships between urban form and air quality: a reconsideration based on evidence from China's five urban agglomerations during the COVID-19 pandemic. Land Use Policy, 118, 106155.
https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106155
Tao, Y., Zhang, Z., Ou, W., Guo, J., & Pueppke, S.G (2020). How does urban form influence PM2.5 concentrations: Insights from 350 different-sized cities in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region of China, 1998-2015? Cities, 98, 102581.
https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102581
Tian, Y., Yao, X.A., Mu, L., Fan, Q., & Liu, Y (2020). Integrating meteorological factors for better understanding of the urban form-air quality relationship. Landscape Ecology, 35, 2357-2373.
https://doi.org/10.1007/s10980-020-01094-6
Waked, A., Afif, C., & Seigneur, C (2015). Assessment of source contributions to air pollution in Beirut, Lebanon: a comparison of source-based and tracer-based modeling approaches. Air Quality, Atmosphere & Health, 8, 495-505.
https://doi.org/10.1007/s11869-014-0298-z
Wang, D., Zhou, T., & Sun, J (2022). Effects of urban form on air quality: A case study from China comparing years with normal and reduced human activity due to the COVID-19 pandemic. Cities, 131, 104040.
https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104040
Wang, J., Wang, S., & Li, S (2019). Examining the spatially varying effects of factors on PM2.5 concentrations in Chinese cities using geographically weighted regression modeling. Environmental pollution, 248, 792-803.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.081
Wang, K.L., Pang, S.Q., Ding, L.L., & Miao, Z (2020). Combining the biennial Malmquist–Luenberger index and panel quantile regression to analyze the green total factor productivity of the industrial sector in China. Science of The Total Environment, 739, 140280.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140280
Wei, T., & Simko, V.R (2021). Package "Corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92). Package Corrplot for R Software.
https://doi.org/10.32614/CRAN.package.corrplot
Yin, C., Yuan, M., Lu, Y., Huang, Y., & Liu, Y (2018). Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model. Science of the Total Environment, 634, 696-704.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.350
Yuan, M., Song, Y., Huang, Y., Hong, S., & Huang, L (2018). Exploring the association between urban form and air quality in China. Journal of Planning Education and Research, 38(4), 413-426.
https://doi.org/10.1177/0739456X17711516
Zaki, S.A., Shuhaimi, S.S., Mohammad, A.F., Ali, M.S.M., Jamaludin, K.R., & Ahmad, M.I (2022). Development of a Prediction Model of the Pedestrian Mean Velocity Based on LES of Random Building Arrays. Buildings, 12(9), 1362.
https://doi.org/10.3390/buildings12091362
Zhang, Y., Pang, X., Xia, J., Shao, Q., Yu, E., Zhao, T., She, D., Sun, J., Yu, J., Pan, X., & Zhai, X (2019). Regional patterns of extreme precipitation and urban signatures in metropolitan areas. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(2), 641-663.
https://doi.org/10.1029/2018JD029718
Zhao, M., Cai, H., Qiao, Z., & Xu, X (2016). Influence of urban expansion on the urban heat island effect in Shanghai. International Journal of Geographical Information Science, 30(12), 2421-2441.
https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1178389
Zhao, X., Zhou, W., Wu, T., & Han, L (2022). The impacts of urban structure on PM2.5 pollution depend on city size and location. Environmental Pollution, 292, 118302.
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118302
Zheng, L., & Na, M (2020). A pollution paradox? The political economy of environmental inspection and air pollution in China. Energy Research & Social Science, 70, 101773.
https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101773
Zhou, C., Li, S., & Wang, S (2018). Examining the impacts of urban form on air pollution in developing countries: A case study of China's megacities. International journal of environmental research and public health, 15(8), 1565.
https://doi.org/10.3390/ijerph15081565