



Spatio-Temporal Modeling of Local-Scale Carbon Monoxide Dispersion from Traffic Using the GRAL Model in Urban Environments (Case Study: North Kargar Street, Tehran)

Atena Bagheri¹ , Hani Rezayan² , Javad Sadidi³ , Shahab Moradi-pour⁴ 

1. Department of Remote Sensing & GIS, Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran. Email: atenab868@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Remote sensing & GIS, Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran. Email: hani.rezayan@khu.ac.ir
3. Department of Remote Sensing & GIS, Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran. Email: jsadidikhu@khu.ac.ir
4. Department of Remote Sensing & GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: shahab.moradii@ut.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:
Received 22 May 2025
Received in revised form 23 October 2025
Accepted 26 October 2025
Available online 15 June 2026

Keywords:
carbon monoxide,
GRAL,
local-scale dispersion,
spatio-temporal modeling,
urban environment

Objective: This study uses a spatio-temporal approach to investigate the dispersion pattern of carbon monoxide emitted by vehicle traffic at near-ground altitude levels, on a local scale and within a part of Tehran, an environment whose complex and heterogeneous urban structure significantly influences the dispersion process of air pollutants.

Method: After identifying the parameters affecting the movement of carbon monoxide, these parameters were classified into 3 categories: climatic, spatial, and traffic-related criteria. The GRAL model was used to analyze the behavior of carbon monoxide. The movement dynamics and concentration of CO were modeled within a one-hour period after emission, at 5 altitude levels along a section of North Kargar Street in Tehran. To evaluate the model's performance, the Pearson correlation coefficient and the mean bias error statistical indices were evaluated.

Results: The highest correlation between predicted and measured values was obtained at the altitude level of 10.5 meters, and the lowest value at a height of 26 meters. It shows that building walls and the height of the sampling station play an effective role. At lower altitudes (2 and 4.5 meters), due to the presence of building obstacles and weak wind currents, higher CO concentrations and a positive model bias were observed. Nevertheless, the results obtained were statistically significant. Besides, the highest concentration of carbon monoxide was recorded at street level and near the entrances of alleys. If the wind direction is aligned with the street axis, the street acts as a duct for the evacuation of carbon monoxide; however, if the wind blows perpendicular to the traffic direction, the alley entrances become focus point for the accumulation and evacuation of pollutant.

Conclusions: Variables such as the geometry of urban thoroughfares, building heights, wind direction, and atmospheric stability give rise to various scenarios of CO dispersion in the urban environment. The evidence obtained indicates that the highest density of carbon monoxide, both in terms of persistence duration and accumulation volume, occurs at altitudes below 30 meters, coinciding with the typical human breathing height. These findings underscore the critical importance of local-scale air quality modeling that accounts for the complex morphological features and turbulent flow regimes characteristic of the urban environment.

Cite this article: Bagheri, A., Rezayan, H., Sadidi, J., & Moradi-pour Sh. (2026). Spatio-Temporal Modeling of Local-Scale Carbon Monoxide Dispersion from Traffic Using the GRAL Model in Urban Environments (Case Study: North Kargar Street, Tehran). *Journal of Environmental Studies*, 52 (1), 21-40. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.395717.1008608>



Introduction

Urban pollutant dispersion modeling is essential for designing effective air quality management strategies, conducted across global, regional, and local scales. Local-scale modeling in particular is crucial for capturing the fine-scale heterogeneity of urban environments, such as complex morphology, traffic emissions, and microclimatic dynamics. In dense urban areas, pollutant distribution is influenced by factors like street geometry, building height, wind patterns, and traffic intensity especially during peak hours. spatio-temporal modeling is a robust approach for simulating pollutant behavior at the local-scale, integrating small-scale atmospheric processes and dynamic conditions. Differential equation-based bottom-up simulation techniques are highly effective for capturing pollutant dispersion in complex urban settings. In Tehran, over 90% of air pollution is caused by vehicular emissions, with carbon monoxide (CO) being a major contributor, especially during the colder months. This study investigates the short-term dispersion of CO from traffic emissions in Tehran using the GRAL spatio-temporal framework, focusing on five vertical layers at street level.

Method

This study was conducted in four main phases. First, a representative urban area was selected based on the objectives of the research. Then GRAL dispersion model was adopted from various available dispersion models due to its suitability for high-resolution, local-scale air quality simulations, and the necessary input datasets were gathered, focusing on meteorological, topographic, morphological, and traffic-related parameters known to influence pollutant dispersion. Finally, the model was executed and its outputs were validated against known conditions. The study area is a segment of Kargar Street located in District 6 of Tehran. This site was selected due to its complex urban and traffic characteristics, including the presence of major educational and healthcare institutions, which contribute to high levels of both pedestrian and vehicular activity. The corridor serves as a major north-south route, linking key highways and arterial roads. Features such as narrow road width, multiple intersections, frequent U-turns, and recurrent traffic congestion during midday and evening peaks significantly contribute to elevated emissions from mobile sources. Moreover, the area is characterized by high building density and narrow urban canyons, which limit natural ventilation and facilitate pollutant accumulation. For dispersion modeling, the GRAL model was selected due to its hybrid Eulerian-Lagrangian framework and its demonstrated effectiveness in simulating CO transport in complex urban geometries. Meteorological conditions, particularly wind speed and direction were treated as key input variables. Atmospheric stability classes were determined using the Pasquill-Gifford classification scheme, and additional meteorological parameters such as ambient temperature, inversion layers, and cloud cover were incorporated. Meteorological data corresponding to autumn 2023 during the midday traffic peak (12:00-13:00) were obtained from the National Meteorological Organization. Urban morphology also plays a significant role in shaping pollutant concentrations. Building heights within the domain were estimated based on the number of floors, assuming a standard height of 3 meters per floor, with observed values ranging from 3 to 24 meters. Traffic volume data were used to estimate CO emissions, as vehicular activity is a major contributor to urban air pollution. The emission rate of CO was calculated using the following equation:

$$TA_h = \sum_{l_i} TV_{h,l} \times l_{km} \times VF_{t,km,v} \quad (1)$$

Model parameters were calibrated using site-specific information on climatology, topography, morphology, and traffic characteristics. The GRAL output included spatial concentration maps of CO for five vertical layers, showing hourly distributions after 12:00 PM.

Results

To assess the reliability and accuracy of the GRAL model in simulating CO dispersion, the predicted hourly concentrations were compared with observational data obtained at 1:00 PM from the local air quality monitoring station situated within the study domain. The Pearson correlation coefficient analysis revealed

the highest agreement at the height of 10.5 meters, indicating a strong correspondence between modeled and observed values. Conversely, the lowest correlation was found at 26 meters, a discrepancy most likely attributable to the elevation mismatch between the fixed height of the monitoring station and the discrete vertical layers used in the model configuration. Nonetheless, the model exhibited acceptable levels of correlation across all examined vertical layers, validating its overall performance in urban atmospheric modeling. The mean bias error at the lower heights of 2 and 4.5 meters equal $159.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $105.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively that is notably positive. These biases are primarily attributed to the elevation discrepancy relative to the monitoring station as well as the presence of weak, localized wind currents constrained by the surrounding buildings, which hinder pollutant dispersion and promote accumulation near the surface. In contrast, at higher levels 16.5 and 26 meters the bias turned negative ($-123.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $-351.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively), reflecting the diminishing influence of surface-level obstacles and enhanced pollutant transport due to increased vertical mixing and airflow. Despite these differences in bias across altitudes, the GRAL model successfully replicated the vertical distribution patterns of CO, showing good agreement with realistic dispersion dynamics in a dense urban context.

Specifically, at the near ground level of 2 meters, the average CO concentration reached $1498.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, with the highest levels recorded along Kargar Street and adjacent alley entrances. Here, buildings with minimum heights of 3 meters obstructed natural ventilation, leading to pollutant entrapment. Easterly winds were deflected by irregular building geometries, causing pollutant plumes to shift toward leeward zones in the west, while some western alleys acted as ventilation corridors, aiding partial dispersion.

At 4.5 meters, the average concentration decreased to $1121.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, with pollutants beginning to migrate toward rooftop zones and rear areas of low-rise buildings, enhancing dilution. Nevertheless, the effects of urban morphology, including tall buildings and turbulent wakes, remained prominent.

By 10.5 meters, concentrations had declined to $821.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, facilitated by increased wind velocities and reduced obstruction from lower structures. Yet, even at this height, the presence of three-story buildings contributed to downward eddies and recirculating flows, locally influencing pollutant concentrations.

At 16.5 meters, average CO levels dropped further to $476.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicating that most physical barriers to airflow had been surpassed, allowing for more effective advection. However, within narrow alleyways adjacent to tall structures, complex wind interactions produced nonlinear pollutant profiles. At the uppermost layer, at about 26 meters, the mean concentration reduced to $206.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$. This elevation, situated above the majority of rooftop levels, experienced optimal dispersion with minimal interference from surface roughness. However, turbulent eddies generated near elevated structures such as hospital rooftops led to sporadic fluctuations in pollutant levels, potentially enabling re-deposition and, under specific meteorological conditions, infiltration into indoor environments. Spatial analysis of the simulation output confirmed a consistent vertical and horizontal decrease in CO concentrations. Notably, higher pollutant retention was observed along the north–south axis, which can be attributed to both the distribution of emission sources and the prevailing wind direction. These findings underscore the critical role of urban geometry, building height, and wind flow patterns in shaping pollutant behavior across multiple elevations in compact cityscapes.

Conclusions

This study highlights the significant impact of urban geometry, building height, and wind patterns on CO dispersion in densely built environments. The GRAL model effectively captured the pollutant's spatial distribution, showing good agreement with observational data, especially at intermediate heights. The observed pollutant accumulation in lower layers and increased dispersion at higher levels are consistent with previous studies, confirming the model's reliability. These findings highlight the need to include detailed urban morphology in air quality simulations for accurate pollution risk assessment in urban environments.

Author Contributions

Atena Bagheri: Responsible for data collection, model implementation, result interpretation, and manuscript drafting.

Hani Rezayan: Supervised conceptual design, scientific guidance, and evaluation of findings.

Javad Sadidi: Contributed to research methodology, scientific oversight, and content review.

Shahab Moradi-pour: Assisted in data collection, modeling, and result analysis.

Data Availability Statement

Data are proprietary and not available on request.

Acknowledgments

We thank the Iranian Meteorological Organization and the Tehran Air Quality Control Company for providing the necessary data for this study.

Ethical Considerations

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مدل‌سازی مکانی - زمانی انتشار محلی مونوکسیدکربن ناشی از ترافیک با استفاده از مدل GRAL در محیط شهری (مطالعه موردی: خیابان کارگرشمالی، تهران)

آتنا باقری^۱، هانی رضاییان^۲✉، جواد سدیدي^۳، شهاب مرادی‌پور^۴

۱. گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: atenab868@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: hani.rezayan@khu.ac.ir
۳. گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: jsadidikhu@khu.ac.ir
۴. گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: shahab.moradii@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: این پژوهش با رویکردی مکانی- زمانی، به بررسی الگوی انتشار ذرات آلاینده مونوکسیدکربن ناشی از ترافیک وسایل نقلیه در ترازهای ارتفاعی نزدیک به سطح زمین، در مقیاسی محلی و در بخشی از شهر تهران می‌پردازد؛ محیطی که با ساختار شهری پیچیده و ناهمگن خود تأثیر بسزایی بر روند پراکندگی ذرات آلاینده دارد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

روش: پس از شناسایی پارامترهای مؤثر بر حرکت ذرات آلاینده، این عوامل در سه دسته معیارهای اقلیمی، مکانی و ترافیکی طبقه‌بندی شدند. برای تحلیل رفتار ذرات آلاینده از مدل GRAL استفاده شد. در ادامه، دینامیک حرکت و غلظت ذرات در بازه زمانی یک ساعت پس از انتشار، در پنج سطح ارتفاعی و در بخشی از خیابان کارگرشمالی شهر تهران، مدل‌سازی شد. همچنین، به منظور ارزیابی عملکرد مدل، از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی پیرسون و میانگین خطای سوگیری بهره گرفته شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

یافته‌ها: بیشترین همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در تراز ارتفاعی ۱۰/۵ متر و کمترین مقدار آن در ارتفاع ۲۶ متر به‌دست آمد. در این زمینه، دیوارهای ساختمانی و ارتفاع ایستگاه نمونه‌برداری نقش مؤثری ایفا می‌کنند. در ارتفاعات پایین‌تر (۲ و ۴/۵ متر)، به‌دلیل وجود موانع ساختمانی و جریان‌های ضعیف باد، تمرکز ذرات بیشتر و سوگیری مدل، مثبت مشاهده شد. با این حال، نتایج به‌دست آمده از معناداری آماری برخوردار بودند. همچنین، بیشترین غلظت ذرات آلاینده در سطح خیابان و در نزدیکی ورودی کوچه‌ها ثبت شد. چنانچه جهت باد همسو با محور خیابان باشد، خیابان به منزله دالانی برای تخلیه ذرات آلاینده عمل می‌کند؛ اما در صورت وزش باد عمود بر جهت عبور و مرور، ورودی کوچه‌ها به کانون تمرکز و تخلیه آلاینده‌ها تبدیل می‌شود.

کلیدواژه‌ها:

GRAL

انتشار محلی،

محیط شهری،

مدل‌سازی مکانی-زمانی،

مونوکسیدکربن

نتیجه‌گیری: متغیرهایی چون هندسه معابر شهری، ارتفاع ساختمان‌ها، جهت باد و میزان پایداری جو، سناریوهای متنوعی از انتشار ذرات آلاینده را در محیط شهری رقم می‌زنند. شواهد به‌دست آمده نشان می‌دهند که بیشترین تراکم ذرات آلاینده هم از نظر مدت زمان ماندگاری و هم از نظر حجم تجمع، در ارتفاعی کمتر از ۳۰ متر نسبت به سطح زمین که با محدوده تنفسی ساکنان شهر منطبق است، رخ می‌دهد. این یافته‌ها بر ضرورت مدل‌سازی آلودگی هوا در مقیاس محلی، با لحاظ کردن ویژگی‌های هندسی و جریان‌پذیری محیط‌های شهری تأکید می‌کنند.

استناد: باقری، آتنا؛ رضاییان، هانی؛ سدیدي، جواد، و مرادی‌پور، شهاب (۱۴۰۵). مدل‌سازی مکانی- زمانی انتشار محلی مونوکسیدکربن ناشی از ترافیک با استفاده از مدل GRAL در محیط شهری (مطالعه موردی: خیابان کارگرشمالی، تهران). *نشریه محیط‌شناسی*، ۲۱(۱)، ۴۰-۲۱.

<https://doi.org/10.22059/jes.2025.395717.1008608>



مقدمه

تحقیق در زمینه شبیه‌سازی حرکت ذرات آلاینده در محیط‌های شهری، اطلاعات ضروری را برای طراحی استراتژی‌های کنترل آلودگی هوا فراهم می‌آورد. این مهم در سطوح مکانی مختلف همانند، فراگیر، منطقه‌ای و محلی (محدوده‌های با شعاع زیر یک کیلومتر)، بررسی می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تحلیل‌های مبتنی بر مقیاس محلی، به دلیل بررسی دقیق‌تر ناهمگنی‌های محیطی، اطلاعات کاربردی‌تری برای مدیریت هوای شهرها فراهم می‌آورند (Berchet et al., 2017). از این‌رو، توزیع عمودی و افقی ذرات آلاینده، تحت تأثیر عواملی چون هندسه معابر، ارتفاع ساختمان‌ها، جریان‌های باد و تردد وسایل نقلیه قرار دارد. به همین دلیل، مدل‌سازی مکانی-زمانی برای شبیه‌سازی انتشار ذرات آلاینده در محدوده‌های محلی پیشنهاد شده است (Oettl, 2015). در میان روش‌های مختلف شبیه‌سازی، تکنیک‌های مبتنی بر مدل‌سازی پایین به بالا، در مطالعات متعددی به‌عنوان راهکار مناسب برای مطالعه تأثیر مکان و زمان در شکل‌گیری الگوهای حرکت ذرات آلوده‌کننده توصیه شده‌اند (Vardoulakis et al., 2003; Katharopoulos et al., 2022). در شهر تهران، بیش از ۹۰ درصد آلودگی هوا به تردد وسایل نقلیه مرتبط است (شرکت کنترل کیفیت هوا، ۱۴۰۰). آلاینده مونوکسیدکربن^۱ به دلیل احتراق ناقص سوخت تولید می‌شود و تحقیقات نشان می‌دهند، این ذرات تأثیر بسزایی در آلودگی هوای تهران دارند (آل‌شیخ و همکاران، ۱۳۹۱). نظر به اهمیت موضوع، پژوهش حاضر به بررسی نحوه انتشار مونوکسیدکربن ناشی از ترافیک در بازه زمانی یک ساعته پرداخته و از مدل مکانی-زمانی GRAL^۲، برای شبیه‌سازی دینامیک حرکت ذرات آلاینده در پنج تراز ارتفاعی نسبت به سطح زمین در مقیاس محلی و در بستر محیط شهر تهران استفاده می‌کند.

پیشینه پژوهش

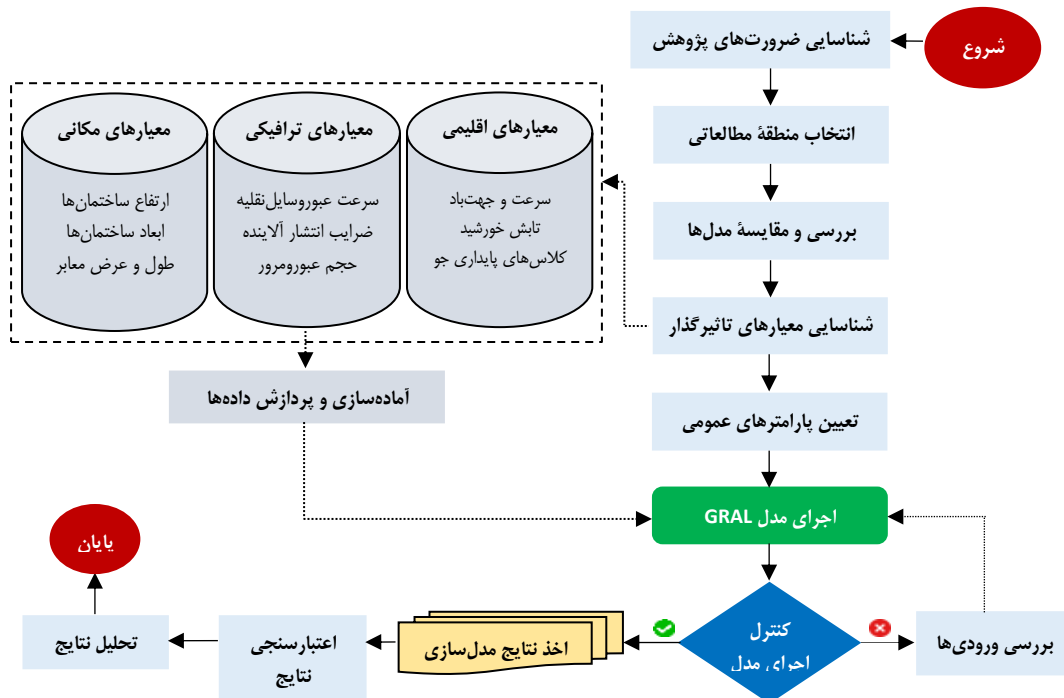
تا کنون تحقیقات بسیاری در زمینه کاربرد انواع مدل‌های پیش‌بینی مسیر حرکت ذرات آلاینده انجام شده است (Gertler et al., 2004; Zhang & Chen, 2007; El-Harbawi, 2013; Oettl, 2015; Pantusheva et al., 2022; Gianquintieri et al., 2024). همچنین، مطالعات داخلی و بین‌المللی متعددی به بررسی تجربی و مدل‌سازی حرکت ذرات آلاینده در محیط‌های شهری پرداخته‌اند؛ بخشی‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل GRAL در تقاطع ولیعصر-فاطمی شهر تهران، نشان دادند که غلظت گازهای آلاینده مانند اکسیدهای نیتروژن^۳ تحت تأثیر ویژگی‌های هندسی معابر و پارامترهای هواشناسی از جمله سرعت و جهت باد قرار دارد. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد، خیابان‌هایی که عمود بر جهت باد غالب قرار دارند، بالاترین میزان تمرکز آلاینده‌ها را تجربه می‌کنند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۹). در این راستا، نسبت ارتفاع ساختمان‌ها به عرض خیابان و همچنین افزایش سرعت باد، از عوامل کلیدی در بهبود تهویه طبیعی و تسهیل فرآیند تخلیه ذرات از فضاهای بین ساختمانی محسوب می‌شوند (کیان‌مهر و بحرینی، ۱۳۹۵). حیدری‌اصل و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از روش‌های درون‌یابی معکوس وزنی-فاصله‌ای^۴ و کو-کریجینگ^۵، نتیجه گرفتند که بیشترین غلظت آلاینده‌ها مربوط به نواحی پرتردد مرکزی شهر است و روش کو-کریجینگ به لحاظ آماری عملکرد دقیق‌تری دارد. در این راستا محدودیت‌های مدل‌های آماری همانند روش‌های درون‌یابی را در توصیف روابط علی و پیش‌بینی تغییرات آینده مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Srivastava & Rao, 2011). در تحقیقی با استفاده از مدل GRAL، پراکنش آلاینده‌ها را در بازه‌های زمانی متفاوت (چهار روزه و یک ساله) شبیه‌سازی کردند و دریافتند که دقت مدل در بازه‌های کوتاه‌تر و در فصل تابستان بیشتر است (Oettl & Uhrner, 2011). در تحقیقی دیگر با بهره‌گیری از مدل GRAMM^۶، به این نتیجه رسیدند که غلظت آلاینده‌ها در مدل‌سازی بیش از مقادیر واقعی برآورد می‌شود که دلیل آن را تأثیرات ترافیک سنگین و نقش ساختمان‌ها در ایجاد آشفستگی هوا عنوان کرده‌اند (Berchet et al., 2017). در پژوهش دیگری تأکید شده است

1. CO (Carbon Monoxide)
2. Graz lagrangian model
3. NOx (Nitrogen oxides)
4. IDW (Inverse distance weighting)
5. Co-Kriging
6. Graz mesoscale model

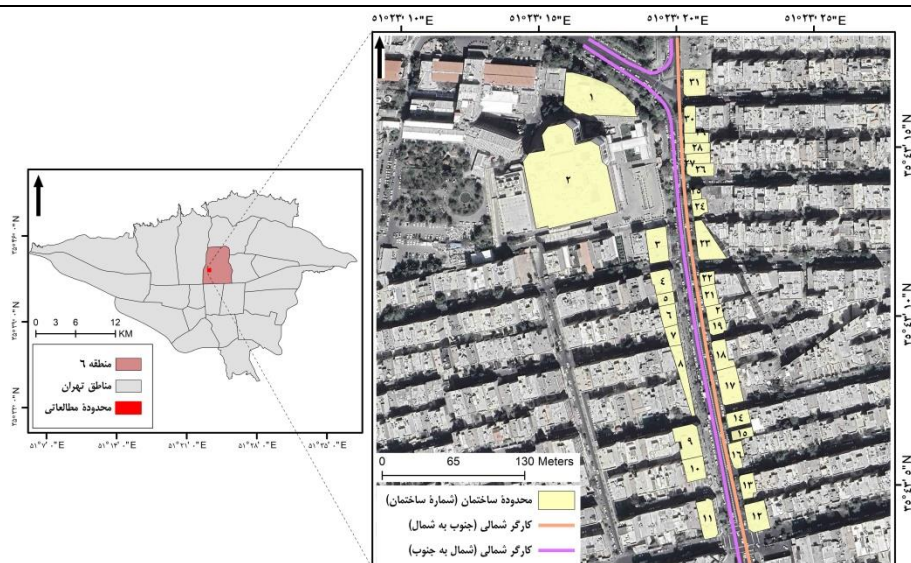
که تنظیم دقیق پارامترهای مدل GRAL، نقشی حیاتی در کاهش خطاهای شبیه‌سازی به‌ویژه در نواحی مرزی جریان و در بافت‌های متراکم شهری دارد (Katharopoulos et al., 2022). توزیع غیریکنواخت ذرات در فضاهای سه‌بعدی به‌طور مستقیم متأثر از هندسه معابر و ساختارهای شهری می‌باشند (Lee et al., 2023). در این راستا برای تحلیل حرکت ذرات آلاینده در بافت شهری، از مدل‌های ترکیبی و مدل‌های با توان تفکیک‌پذیری مکانی بالا استفاده شود (Liu et al., 2024). مطالعه دیگر نشان می‌دهد افزایش نسبت ارتفاع ساختمان‌ها به عرض معبر، ناپایداری جریان‌ها را تشدید کرده و تمرکز ذرات آلاینده را در نواحی سایه‌باد افزایش می‌دهد. همچنین، در شرایط باد متقاطع، ورود جریان به کوچه‌ها باعث ایجاد الگوهای تجمع موضعی می‌شود و تغییرات در هندسه خیابان‌ها یا ارتفاع ساختمان‌ها منجر به جابه‌جایی غیریکنواخت آلاینده‌ها به‌صورت افقی و عمودی می‌گردد (Ruda Sarria et al., 2025). در سالیان اخیر، توجه به مطالعات مدل‌محور برای تحلیل دینامیک ذرات آلاینده در محیط‌های شهری افزایش یافته است؛ با این حال، بیشتر پژوهش‌ها در مقیاس منطقه‌ای و بازه‌های بلندمدت متمرکز بوده‌اند و تحقیقات در مقیاس محلی به‌ویژه در بافت‌های متراکم، کمتر انجام شده است. در ایران نیز رویکردهای آماری و درونی‌یابی غالب بوده که اگر چه در پهنه‌بندی مؤثرند، اما دقت محدودی در نمایش تعاملات ساختار شهری و شرایط اقلیمی دارند. در این راستا، مدل‌های خردمقیاس مانند GRAL می‌توانند ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی دقیق این تعاملات باشند.

روش‌شناسی پژوهش

روش‌شناسی این پژوهش در چهار مرحله سازمان یافته است (شکل ۱). ابتدا بخشی از خیابان کارگرشمالی در منطقه ۶ تهران به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد (شکل ۲). این انتخاب بر مبنای ویژگی‌های کالبدی و عملکردی منطقه از جمله، تراکم بالای ساختمانی، عرض محدود معبر، گره‌های ترافیکی و حضور مراکز آموزشی و درمانی پرتردد نظیر، دانشکده‌های وابسته به دانشگاه تهران و بیمارستان مرکز قلب تهران صورت گرفته است. این شرایط منطقه را به نمونه‌ای مناسب برای تحلیل موضعی تبدیل می‌کند. در مرحله دوم، پس از بررسی مدل‌های شبیه‌سازی حرکت ذرات و انتخاب مدل GRAL، داده‌های مورد نیاز بر اساس عوامل اقلیمی، مکانی و ترافیکی گردآوری (مرحله سوم) و در نهایت مدل اجرا و نتایج تحلیل شدند (مرحله چهارم).



شکل ۱. روند اجرای پژوهش



شکل ۲. نقشه محدوده مطالعاتی پژوهش

آماده‌سازی داده‌ها

جهت بازنمایی شرایط اقلیمی، داده‌های موثر برای بازه زمانی ظهرگاهی پاییز سال ۱۴۰۲، از سازمان هواشناسی کشور دریافت و مورد پردازش قرار گرفتند (جدول ۱). برای شبیه‌سازی توان محیط در پراکندگی ذرات آلاینده، کلاس‌های پایداری جوی طبق مستندات مدل GRAL (GRAL, 2020) و به روش پاسکیل-گیفورد^۱ (Kahl & Chapman, 2018)، محاسبه و در چهار کلاس از A (پایدارترین شرایط جوی) تا D (ناپایدارترین شرایط جوی)، رتبه‌بندی شدند.

جدول ۱. داده‌های اقلیمی مورد استفاده در پژوهش

نام داده	بازه زمانی	تفکیک زمانی	ساعت برداشت	واحد اندازه‌گیری
سرعت باد	۱۴۰۲/۷/۱ - ۱۴۰۲/۹/۳۰	یک ساعته	ظهر ۱۲:۰۰	متر بر ثانیه
جهت باد	۱۴۰۲/۷/۱ - ۱۴۰۲/۹/۳۰	یک ساعته	ظهر ۱۲:۰۰	۰ - ۳۶۰ درجه در جهت ساعت‌گرد
تابش خورشید	۱۴۰۲/۷/۱ - ۱۴۰۲/۹/۳۰	یک ساعته	ظهر ۱۲:۰۰	وات بر متر مربع
کلاس‌های پایداری جوی	۱۴۰۲/۷/۱ - ۱۴۰۲/۹/۳۰	یک ساعته	ظهر ۱۲:۰۰	کلاس‌بندی شده از A تا D

جدول ۲. کلاس‌های پایداری جوی در ساعات روز، روش پاسکیل-گیفورد (Kahl & Chapman, 2018)

تابش خورشید (وات بر متر مربع)				سرعت باد (متر بر ثانیه)
<= ۱۷۵	۱۷۵-۶۷۵	۶۷۵-۹۲۵	۹۲۵ <=	
D	B	A	A	< ۲
D	C	B	A	۲-۳
D	C	B	B	۳-۵
D	D	C	C	۵-۶
D	D	D	C	>= ۶

به‌منظور بررسی پارامترهای هندسی موثر بر تخلیه ذرات، نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان به‌دقت بررسی شد. همچنین،

ضریب زبری سطح به عنوان شاخصی از تغییرات ارتفاعی، بر اساس مستندات مدل GRAL مشخص گردید (GRAL, 2020). سایر داده‌های مورد نیاز شامل طول، عرض و جهت معابر نیز استخراج و پردازش شدند و ارتفاع ساختمان‌ها نیز از طریق شمارش طبقات ساختمان‌ها با فرض میانگین ۳ متر برای هر طبقه، برآورد گردید. در ادامه، محاسبه میزان انتشار مونوکسیدکربن ناشی از تردد وسایل نقلیه (جدول ۳)، با استفاده از مدل ژانگ و همکاران (۲۰۱۶)، صورت گرفت (رابطه ۱).

$$TA_h = \sum_{l_i} TV_{h,l} \times l_{km} \times VF_{t,km,v} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، TA_h میزان انتشار آلاینده از وسایل نقلیه برحسب گرم بر ساعت در هر کیلومتر، $TV_{h,l}$ تعداد وسایل نقلیه عبورکننده از مسیر، l_{km} طول مسیر برحسب کیلومتر و $VF_{t,km,v}$ ضریب انتشار آلاینده بر اساس نوع وسیله نقلیه و متوسط سرعت عبور است (Zhang et al., 2016). با توجه به محدودیت زیرساخت‌های داده‌ای حمل و نقل در کشور، شمارش میدانی خودروها در بازه زمانی ۱۲ الی ۱۳، در منطقه مطالعاتی انجام گرفت. ضرایب انتشار آلاینده‌ها برای خودروهای سواری از پژوهش مرکز تحقیقات سوخت، احتراق و آلودگی (۱۳۹۴)، استخراج شدند (مرکز تحقیقات سوخت، احتراق و آلودگی، ۱۳۹۴). برای موتورسیکلت‌ها نیز از ضرایب ارائه شده در پژوهش شفیع پور و کمالان (۲۰۰۵)، استفاده شد (Shafiepor & kamalan, 2005). در گام بعد، سرعت عبور وسایل نقلیه از طریق سامانه گوگل مپ^۱ محاسبه و استخراج شد.

جدول ۳. میزان انتشار آلاینده مونوکسیدکربن توسط وسایل نقلیه در محدوده مطالعاتی

نام مسیر	طول و عرض مسیر (متر)	تعداد وسایل نقلیه	نوع وسیله نقلیه	سرعت متوسط (کیلومتر/ساعت)	ضریب انتشار (گرم/کیلومتر)	میزان انتشار (کیلوگرم/ساعت)
کارگرشمالی (جنوب-شمال)	۷/۵ - ۴۰۵	۴۷۵	سواری	۱۰	۶/۸	۱/۳
کارگرشمالی (جنوب-شمال)	۷/۵ - ۴۰۵	۱۸۸	موتورسیکلت	۲۱	۲۸/۲۷	۲/۱۵
کارگرشمالی (شمال-جنوب)	۷/۵ - ۴۱۷	۳۵۸	سواری	۱۶	۵/۲	۰/۷۷
کارگرشمالی (شمال-جنوب)	۷/۵ - ۴۱۷	۱۰۳	موتورسیکلت	۳۰	۲۸/۲۷	۱/۲۱

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

در این پژوهش، برای ارزیابی عملکرد مدل از دو شاخص آماری استفاده شد؛ ضریب همبستگی پیرسون^۲ که ارتباط خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد میانگین خطای سوگیری^۳ که تفاوت سیستماتیک بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی را بررسی می‌کند. مقادیر مثبت این شاخص به بیش‌برآوردی و مقادیر منفی به کم‌برآوردی اشاره دارند. هر چقدر مقدار این نمایه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است (Willmott et al., 2005). این شاخص‌ها در مدل‌هایی که از داده‌های جهت‌دار همانند باد استفاده می‌کنند، اهمیت ویژه‌ای دارند (Lazić et al., 2010).

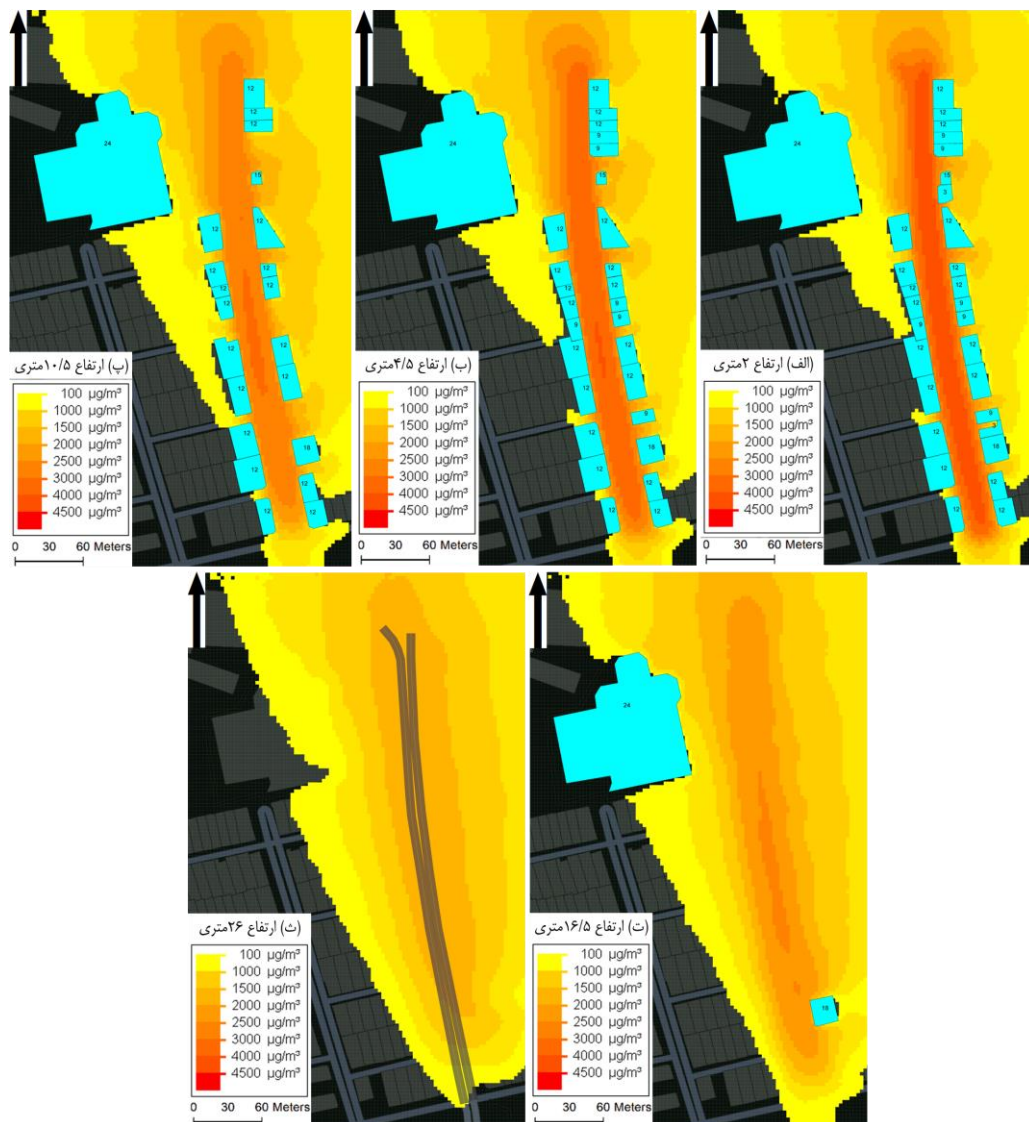
پیکربندی و اجرای مدل

در ادامه، پارامترهای مدل (جدول ۴)، با توجه به ویژگی‌های خاص نمونه مطالعاتی، مستندات مدل (GRAL, 2020) و بررسی مطالعات معتبر پیشین (Oettl & Uhrner, 2011; Berchet et al., 2017; Lee et al., 2023) تعیین شدند. پس از اعمال پارامترهای تعریف شده و اجرای مدل، خروجی‌های حاصله به صورت نقشه‌های توزیع مکانی غلظت ذرات مونوکسیدکربن در پنج تراز ارتفاعی و در بازه زمانی یک ساعته (۱۲:۰۰-۱۳:۰۰)، به دست آمدند (شکل ۳).

1. Google map
2. Pearson's correlation coefficient
3. MBE (Mean Bias Error)

جدول ۴. متغیرهای ورودی تعیین شده جهت اجرای مدل GRAL (GRAL, 2020).

نام پارامتر	مقدار پارامتر	توضیحات
زمان پراکندگی	۳۶۰۰ ثانیه	این پارامتر، دامنه زمانی لازم برای ردیابی مکان ذرات را تعریف می‌کند.
تعداد ذرات در ثانیه	۱۰۰	تعداد ذرات لاگرانژی آزاد شده در هر موقعیت انتشار ذرات را تعریف می‌کند.
ضریب زبری سطح	۰/۵ متر	مقدار این متغیر مطابق با مستندات مدل، برای کاربری شهری تنظیم شد.
اندازه شبکه افقی	۳ متر	نشان‌دهنده ابعاد هر سلول محاسباتی در راستای محورهای افقی (X, Y)، در نقشه خروجی است.
اندازه شبکه عمودی	۱ متر	نشان‌دهنده ابعاد هر سلول محاسباتی در راستای محور قائم (Z)، در نقشه خروجی است.
اندازه برش‌های ارتفاعی	۲، ۴/۵، ۱۰/۵، ۱۶/۵، ۲۶ (متر)	-
مدل جریان باد	رویکرد پیش‌آگهی ^۱	این رویکرد مطابق با مستندات مدل، برای مناطق با وسعت کم تا متوسط انتخاب گردید.
حداکثر تکرار لازم	۲۱۰۰ تکرار	عددی است که در آن مقدار، واگرایی بین پارامترها به حداقل مقدار ممکن می‌رسد.
میزان انتشار آلاینده	۵/۴۳ کیلوگرم در ساعت	به بخش ۱.۳ و جدول ۳، مراجعه شود.
دامنه اجرای مدل	۳۹۰×۵۰۰ (مترمربع)	نمایانگر ابعاد محدوده‌ای است که مدل‌سازی محلی در آن صورت گرفته است.



شکل ۳. نقشه‌های پیش‌بینی غلظت ذرات آلاینده مونوکسید کربن در پنج تراز ارتفاعی تعریف شده در مدل، ساعت ۱۳ ظهر

1. Prognostic flow field model

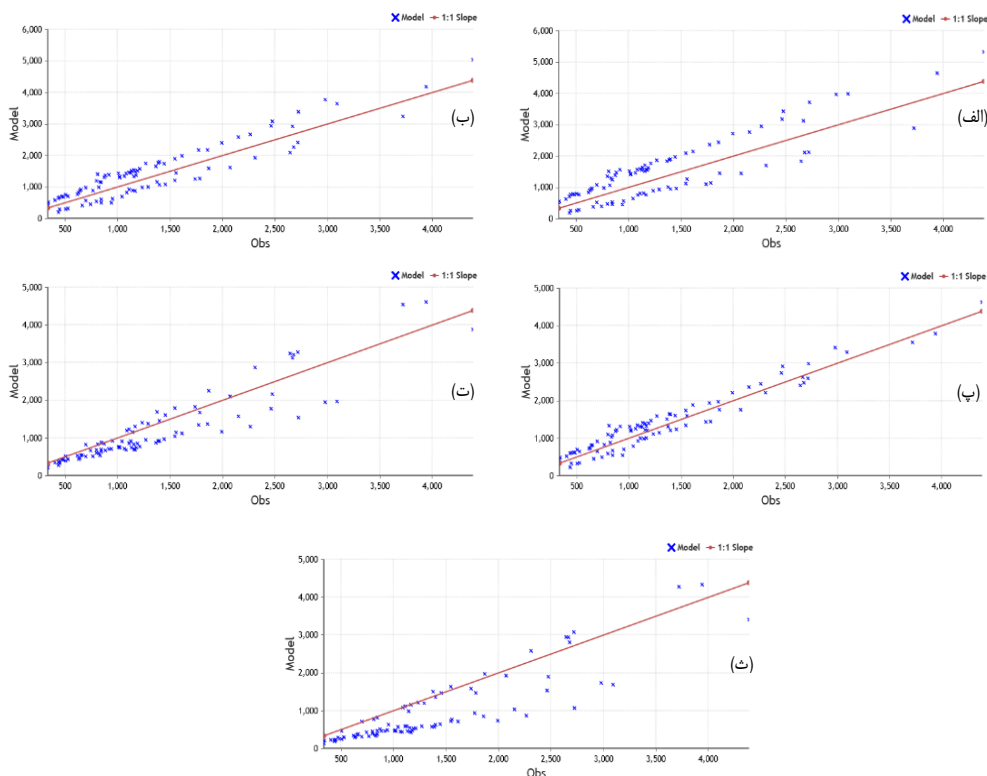
یافته‌های پژوهش

اعتبارسنجی نتایج

برای ارزیابی عملکرد مدل، مقادیر غلظت ساعتی مونوکسیدکربن به‌عنوان داده‌های پیش‌بینی شده استفاده شدند. همچنین، داده‌های مشاهده شده در ساعت ۱۳ از ایستگاه پایش کیفی هوا، تأمین و در تحلیل‌های مقایسه‌ای به‌کار رفتند (جدول ۵). سپس، جهت سنجش تطابق پیش‌بینی‌ها با مشاهدات، نمودار همبستگی پیرسون برای هر تراز ارتفاعی رسم گردید (شکل ۴).

جدول ۵. داده‌های مورد استفاده در فرآیند ارزیابی نتایج مدل‌سازی

نوع داده	بازه زمانی	صفت
غلظت آلاینده مونوکسیدکربن در ارتفاع ۲ متری	ساعت ۱۳ تمام روزهای پاییز سال ۱۴۰۲	مقدار پیش‌بینی شده
غلظت آلاینده مونوکسیدکربن در ارتفاع ۴/۵ متری	ساعت ۱۳ تمام روزهای پاییز سال ۱۴۰۲	مقدار پیش‌بینی شده
غلظت آلاینده مونوکسیدکربن در ارتفاع ۱۰/۵ متری	ساعت ۱۳ تمام روزهای پاییز سال ۱۴۰۲	مقدار پیش‌بینی شده
غلظت آلاینده مونوکسیدکربن در ارتفاع ۱۶/۵ متری	ساعت ۱۳ تمام روزهای پاییز سال ۱۴۰۲	مقدار پیش‌بینی شده
غلظت آلاینده مونوکسیدکربن در ارتفاع ۲۶ متری	ساعت ۱۳ تمام روزهای پاییز سال ۱۴۰۲	مقدار پیش‌بینی شده
غلظت آلاینده مونوکسیدکربن، اخذ شده از ایستگاه سنجش کیفیت هوا	ساعت ۱۳ تمام روزهای پاییز سال ۱۴۰۲	مقدار مشاهده شده



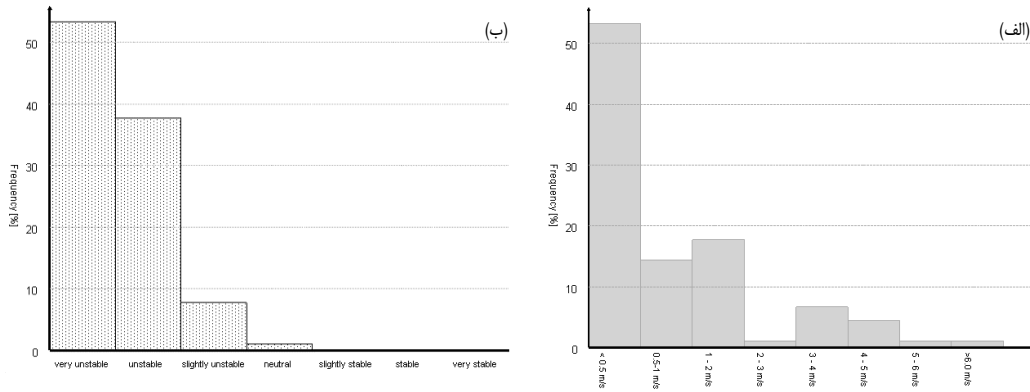
شکل ۴. ضریب همبستگی پیرسون در ترازهای مدل‌سازی، الف) ۲ متر، ب) ۴/۵ متر، پ) ۱۰/۵ متر، ت) ۱۶/۵ متر و ث) ۲۶ متر

بر اساس داده‌های جدول ۶، بیشترین میزان همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۱۰/۵ متری و کمترین آن در ارتفاع ۲۶ متری مشاهده شد؛ این اختلاف به نزدیکی ارتفاع ایستگاه نمونه‌برداری (حدود ۷ متر) به تراز ۱۰/۵ متری مرتبط است. میانگین خطای سوگیری در ترازهای نزدیک به سطح زمین (۲ و ۴/۵ متر)، مثبت و به ترتیب ۱۵۹/۱۲ و ۱۰۵/۸۵ به‌دست آمد که ناشی از اختلاف ارتفاع ایستگاه با ترازهای مدل و تأثیر جریان‌های ضعیف باد در مجاورت ساختمان‌هاست. سرعت باد غالب در این نواحی کمتر از

۲ متربرثانیه (شکل ۵-الف) و شرایط پایداری جوی (شکل ۵-ب) منجر به تجمع بیشتر آلاینده‌ها می‌شود. در ارتفاعات ۱۶/۵ و ۲۶ متری، میانگین خطای سوگیری منفی و نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل است که به دلیل فاصله ارتفاعی زیاد و کاهش نسبی اثر موانع شهری در این ترازها رخ داده است؛ در حالی که ایستگاه اندازه‌گیری هنوز تحت تأثیر این موانع قرار دارد. با وجود تفاوت‌ها، همبستگی در تمام ترازهای ارتفاعی قابل قبول و معنی‌دار ارزیابی می‌شود.

جدول ۶. مقادیر آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون و میانگین خطای سوگیری

ارتفاع مدل‌سازی		ضریب همبستگی پیرسون		میانگین خطای سوگیری	
مقدار	تفسیر	مقدار	تفسیر	مقدار	تفسیر
۲ متری	۰/۷۷۱	همبستگی قوی، رابطه واضحی وجود دارد.	۱۵۹/۱۲	سوگیری مثبت	سوگیری مثبت
۴/۵ متری	۰/۸۱۵	همبستگی قوی، رابطه واضحی وجود دارد.	۱۰۵/۸۵	سوگیری مثبت	سوگیری مثبت
۱۰/۵ متری	۰/۸۷۱	همبستگی قوی، رابطه واضحی وجود دارد.	۶۰/۶۹	سوگیری مثبت	سوگیری مثبت
۱۶/۵ متری	۰/۸۲۲	همبستگی قوی، رابطه واضحی وجود دارد.	-۱۲۳/۷۲	سوگیری منفی	سوگیری منفی
۲۶ متری	۰/۷۲۳	همبستگی قوی، رابطه واضحی وجود دارد.	-۲۵۱/۲۸	سوگیری منفی	سوگیری منفی



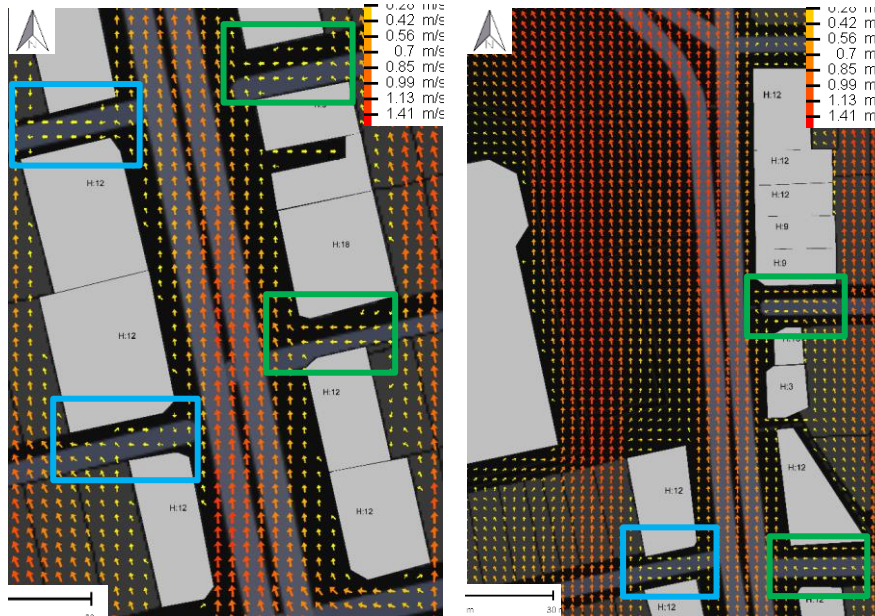
شکل ۵. الف) نمودار ستونی سرعت باد، ب) نمودار ستونی کلاس‌های پایداری جوی در محدوده مطالعاتی

تحلیل نتایج مدل‌سازی به تکنیک طبقات ارتفاعی

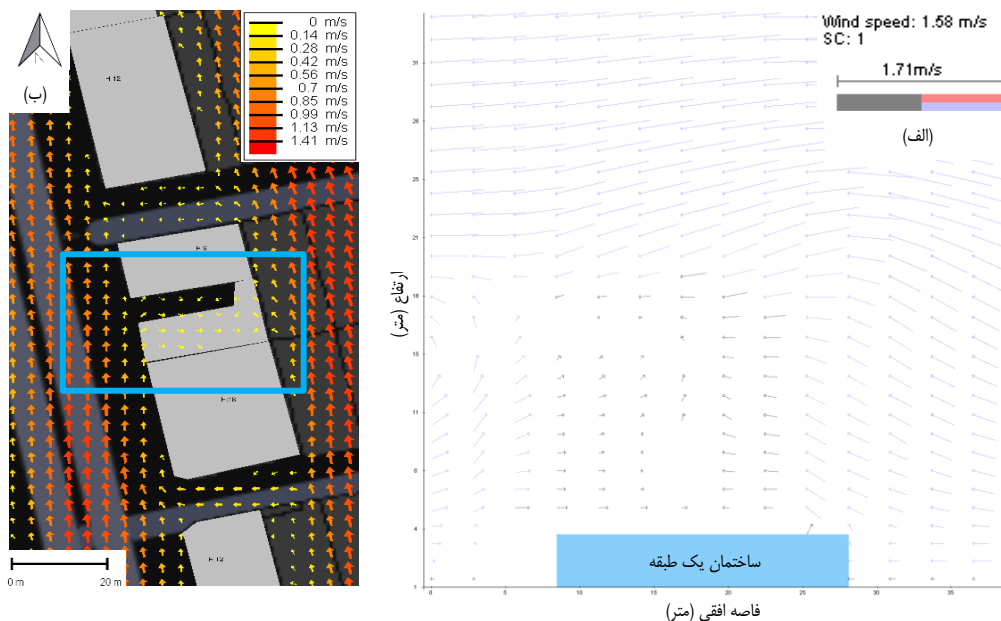
در ارتفاع ۲ متری از سطح خیابان، میانگین غلظت ذرات آلاینده مونوکسیدکربن برابر با ۱۴۹۸/۷۹ میکروگرم بر مترمکعب برآورد شد. طبق نقشه ارائه شده در شکل ۳-الف، بیشترین مقادیر غلظت در امتداد خیابان کارگرشمالی، به‌ویژه در ورودی کوچه‌ها و معابر منتهی به خیابان اصلی مشاهده می‌شود. با توجه به این که ارتفاع حداقلی ساختمان‌های اطراف حدود ۳ متر است، تمامی بناها به‌عنوان موانع مؤثر جریان باد عمل کرده و از پراکندگی آلاینده‌ها جلوگیری می‌کنند. این فرآیند، باعث افزایش زمان ماندگاری آلاینده‌ها در محدوده خیابان شده و رسوب‌گذاری ذرات در مجاورت جداره‌های شهری تشدید می‌شود. در چنین شرایطی، مسیرهای خروجی برای انتشار آلاینده‌ها عمدتاً از طریق تقاطع‌ها، معابر فرعی و روزنه‌ها تأمین می‌شود. تحلیل میدان باد در ارتفاع ۲ متری (شکل ۶)، نشان می‌دهد که جریان‌های باد ورودی از معابر شرقی، تحت تأثیر هندسه نامنظم ساختمان‌ها و توپوگرافی عوارض شهری، دچار انحراف شده‌اند و این پدیده نه تنها به تخلیه مؤثر آلاینده‌ها از خیابان اصلی کمکی نمی‌کند، بلکه منجر به انتقال ذرات به سمت نواحی بادگیر سازه‌های ضلع غربی خیابان می‌شود. در این نواحی، سرعت جریان کاهش یافته و شرایط برای انباشت موضعی ذرات آلاینده مهیا می‌شود. در مقابل، کوچه‌ها و خیابان‌های فرعی واقع در بخش غربی به‌عنوان کانال‌های تخلیه عمل می‌کنند. در نتیجه، تمرکز قابل توجهی از آلاینده‌ها در پشت ساختمان‌های غربی و در نواحی سایه‌باد ایجاد می‌شود.

در ارتفاع ۴/۵ متری، میانگین غلظت مونوکسیدکربن ۱۱۲۱/۵۱ میکروگرم بر مترمکعب برآورد شد (شکل ۳-ب). این کاهش نسبت

به تراز ۲ متری عمدتاً به نقش پشت‌بام ساختمان‌های یک‌طبقه در انتقال جریان هوا و بازتوزیع آلاینده‌ها بازمی‌گردد (شکل ۷-الف). برخورد باد با دیواره این ساختمان‌ها بخشی از آلاینده‌ها را به پشت‌بام یا نواحی پشتی هدایت کرده و موجب پراکنش موضعی می‌شود. با این حال، حضور ساختمان‌های مرتفع‌تر در مجاورت سازه‌های یک طبقه می‌تواند مسیر و شدت جریان انتقالی را تغییر داده و الگوهای پیچیده‌تری از آشفته‌گی هوا ایجاد کند (شکل ۷-ب). این وضعیت باعث ناهمگنی توزیع آلاینده‌ها و شکل‌گیری نواحی پرریسک، به‌صورت موضعی در اطراف ساختمان‌ها می‌شود. همچنین، در شرایط جوی پایدار و باد کمتر از ۲ متربرثانیه، کاهش تلاطم و تهویه موجب ماندگاری آلاینده‌ها در نواحی نزدیک پشت‌بام‌ها، به‌ویژه در سایه‌بادهای محلی می‌گردد.

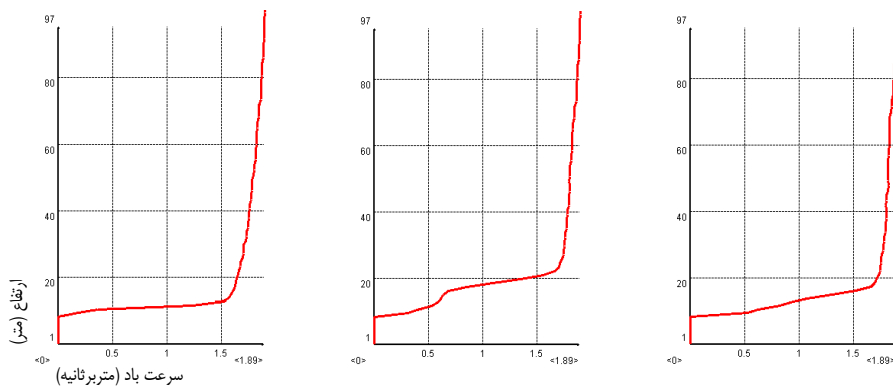


شکل ۶. نقشه میدان باد در ارتفاع ۲ متری. مستطیل‌های سبز ورودی معابر شرقی و محدوده‌های آبی ورودی معابر غربی هستند

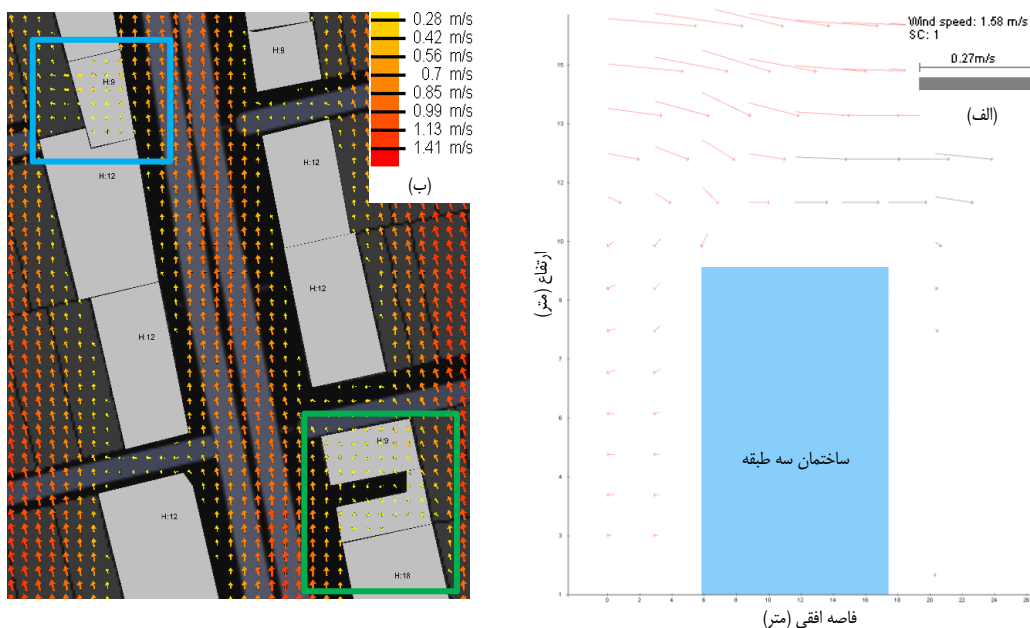


شکل ۷. الف) صعود جریان باد از جدار ساختمان یک طبقه، ب) نقشه میدان باد در پشت‌بام ساختمان یک طبقه

در تراز ۱۰/۵ متری از سطح خیابان، میانگین غلظت مونوکسیدکربن معادل ۸۲۱/۱۹ میکروگرم بر مترمکعب برآورد شد (شکل ۳-پ). افزایش تدریجی ارتفاع در این لایه موجب بهبود نسبی شرایط تهویه طبیعی شده و جریان‌های باد، در مقایسه با ترازهای پایین‌تر با موانع کمتری مواجه می‌شوند. مطابق با نمودار ارائه شده در شکل ۸، این بهبود در تهویه به افزایش اختلاط عمودی و رقیق‌سازی مؤثرتر آلاینده‌ها منجر شده و سبب کاهش محسوس غلظت ذرات می‌گردد. در این ارتفاع، تأثیر ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه (یک و دو طبقه) بر الگوی جریان، به‌طور چشمگیری کاهش یافته و امکان توسعه جریان‌های افقی و انتقال ذرات در فضای بین سازه‌ها افزایش می‌یابد. با این حال، ساختمان‌های سه و چهار طبقه همچنان نقشی تعیین‌کننده در تغییر رفتار جریان‌های موضعی دارند. این سازه‌ها از طریق ایجاد جریان‌های پایین‌شونده، بخشی از باد را به سطح خیابان هدایت کرده و موجب تمرکز موضعی آلاینده‌ها در نواحی بادگیر می‌شوند. هم‌زمان تعامل باد با سطوح جانبی و پشتی این ساختمان‌ها، الگوهای آشفته‌ای از جریان را در پشت‌بام‌ها ایجاد می‌کند که به توزیع غیریکنواخت آلاینده‌ها می‌انجامد (شکل ۹). این الگوی پیچیده از توزیع، مشابه نتایج مطالعه Buccolieri et al. (2010) است که تأکید دارند اختلاف ارتفاع میان سازه‌های شهری در مقیاس خرد می‌تواند به تقویت جریان‌های ثانویه، ایجاد گردابه‌های پشتی و در نهایت به انباشت موضعی ذرات در نواحی پشت به باد ساختمان‌های کوتاه‌تر منجر شود.

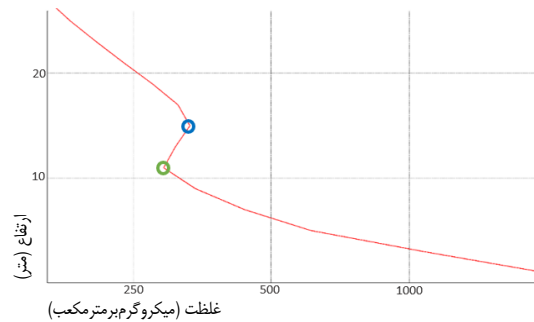


شکل ۸. افزایش سرعت باد در حوالی ارتفاع ۱۰ متری تحت تأثیر نقش محدود کننده ساختمان‌های سه طبقه

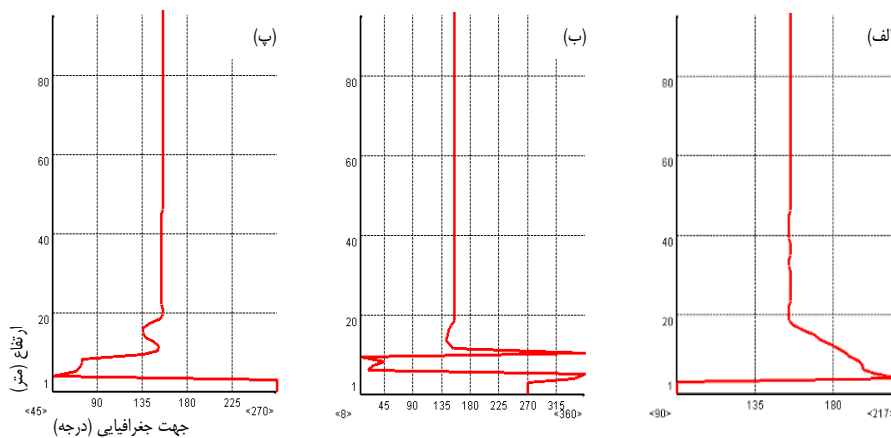


شکل ۹. (الف) بروز پدیده پایین‌شویی، (ب) نقشه میدان باد در ارتفاع ۱۰/۵ متر

در ارتفاع ۱۶/۵ متری از سطح خیابان، میانگین غلظت مونوکسیدکربن ۴۷۶/۹۸ میکروگرم بر مترمکعب برآورد شد (شکل ۳-ت). در این تراز، به دلیل قرارگیری بالاتر از ارتفاع غالب ساختمان‌ها (۲۸ مورد از ۳۱ ساختمان ارتفاعی کمتر از ۱۶/۵ متر دارند)، موانع فیزیکی کاهش یافته و شرایط برای پراکنش مؤثر آلاینده‌ها تسهیل می‌شود. این امر در مقایسه غلظت بین ترازهای ۱۰/۵ و ۱۶/۵ متر (شکل ۱۰)، به صورت روند کاهشی مشخص دیده می‌شود. با این حال، در ارتفاعات میانی و در معابر باریک یا بن‌بست‌های مجاور سازه‌های بلند، جریان هوا پیچیده‌تر شده و این فضاهای کم‌فشار به نقاطی با کاهش سرعت باد، ایجاد جریان‌های چرخشی و انحراف موضعی آن تبدیل می‌شوند. تحلیل پروفیل عمودی انحراف جریان (شکل ۱۱)، نشان می‌دهد که جریان باد پس از ورود به کوچه، انحرافش تا نقطه میانی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. یافته‌های پیشین نیز تأیید می‌کنند که در بافت‌های متراکم با تغییرات ارتفاعی ناهمگون، تمرکز آلاینده‌ها در لبه‌ها و فضاهای میان‌ساختمانی بیشتر است (Soulhac et al., 2011).



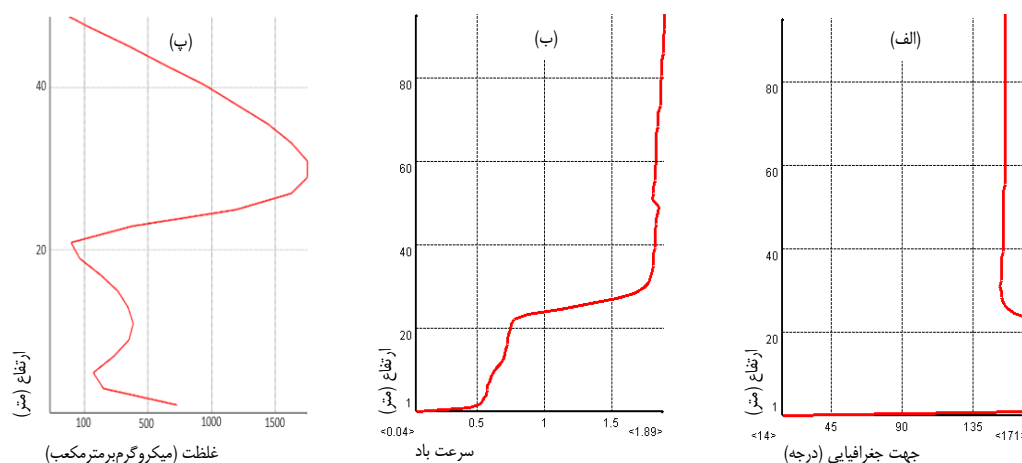
شکل ۱۰. نقاط عطف کاهش غلظت ذرات آلاینده مونوکسیدکربن در ارتفاعات ۱۰/۵ و ۱۶/۵ متر



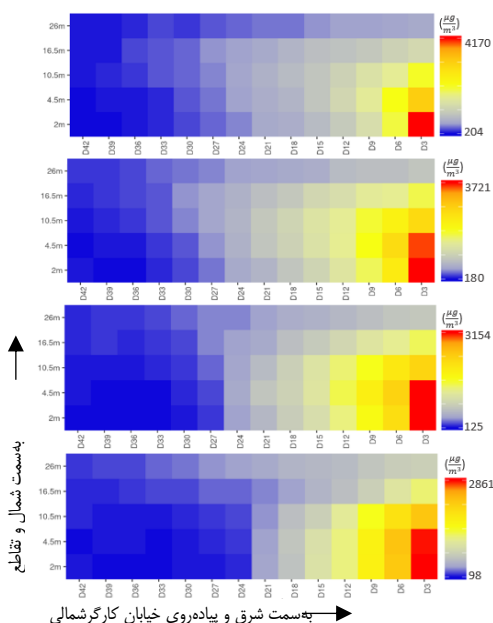
شکل ۱۱. پروفیل تغییر جهت باد در کوچه‌های کم‌عرض. (الف) ابتدای کوچه، (ب) اواسط کوچه، (پ) انتهای کوچه

در ارتفاع ۲۶ متری از سطح خیابان، میانگین غلظت مونوکسیدکربن برابر با ۲۰۶/۴۶ میکروگرم بر مترمکعب برآورد شد. این تراز با قرارگیری بالاتر از ارتفاع اغلب ساختمان‌های اطراف به‌ویژه بیمارستان قلب تهران، شرایط مناسب‌تری برای پراکنش آلاینده‌ها فراهم می‌آورد (شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب). در ارتفاعات پایین‌تر، دیواره شرقی سازه بیمارستان که در راستای جهت عبور و مرور در خیابان کارگرشمالی قرار دارد، به‌عنوان یک سد مؤثر در برابر جریان هوا عمل می‌کند. این مانع باعث کاهش سرعت باد و انتقال محدود آلاینده‌ها به پشت ساختمان شده و منجر به ماندگاری بیشتر ذرات در ناحیه بادگیر می‌شود. این الگو با پدیده جلوه‌گیری آیرودینامیک^۱ مطابقت دارد که طی آن، موانع مرتفع موجب انباشت آلاینده‌ها در بخش پیش‌باد سازه می‌شوند (Blocken et al., 2007). در ارتفاعات

بالتر، عبور جریان از لبه ساختمان باعث انتقال ذرات به پشت‌بام و نواحی پشت‌باد می‌گردد. الگوی نوسانی غلظت در مجاورت پشت‌بام (شکل ۱۲-پ)، ناشی از تلاطم‌های ناشی از عبور جریان از لبه ساختمان و پدیده پراکندگی انفجاری^۱ است (Britter & Hanna, 2003). در شرایط جوی پایدار و جریان‌های نزولی، این نواحی می‌توانند محل تجمع ثانوی آلاینده‌ها شده و حتی موجب نفوذ آنها به داخل ساختمان از طریق بازشوهای فعال (پنجره‌ها و ورودی‌های بیمارستانی) شوند (Baik & Kim, 2002). همچنین، نقشه گرمایی توزیع غلظت در محوطه بیمارستان (شکل ۱۳)، نشان می‌دهد که غلظت ذرات در راستای افقی از خیابان به سمت ساختمان به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد و در راستای قائم با افزایش ارتفاع، کاهش تدریجی غلظت آلاینده‌ها مشاهده می‌شود. در محور شمالی به دلیل تجمع منابع آلاینده، مقادیر غلظت در هر مقطع افزایش می‌یابد که نشانگر اثر تجمعی منابع انتشار و نقش جهت غالب باد در تشدید آلودگی است.



شکل ۱۲. الف) پروفیل عمودی تغییر جهت باد، ب) پروفیل عمودی تغییر سرعت باد، پ) پروفیل عمودی تغییرات غلظت ذرات آلاینده مونوکسیدکربن در مجاورت دیواره شرقی بیمارستان قلب



شکل ۱۳. نقشه گرمایی محوطه بیمارستان در چهار مقطع با ۵ سطر، ۱۴ ستون و با ابعاد ۳ مترمربعی. هر سطر نشان‌دهنده سطوح ارتفاعی مدل و مقاطع ترسیم شده، نمایان گر چهار برش از محوطه بیمارستان با فاصله ۲۴ متری هستند

1. Explosive dispersion

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط باد غالب با سرعت کمتر از ۲ متر بر ثانیه، مدل‌سازی تمایل به بیش‌برآورد غلظت آلاینده‌ها دارد؛ پدیده‌ای که در سایر تحقیقات مرتبط نیز گزارش شده است (Berchet et al., 2017; Ling et al., 2020). این امر مؤید آن است که مدل‌های اولرین- لاگرانژین در محیط‌های شهری متراکم و ناهمگون، به‌ویژه در مقیاس خرد، در برابر خطاهای ساختاری آسیب‌پذیرند و نیازمند تنظیم دقیق پارامترها متناسب با ویژگی‌های محلی و اعمال فرآیند اعتبارسنجی به‌صورت کنترل شده و میدانی هستند (Gertler et al., 2004). تحلیل داده‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد که در ترازهای نزدیک به سطح زمین، پراکنش آلاینده‌ها به‌شدت متأثر از هندسه شهری و آرایش معابر است؛ در حالی که با افزایش ارتفاع، اثر محدودکننده دیواره‌های ساختمانی کاهش یافته و توزیع ذرات یکنواخت‌تر می‌شود. این الگو با یافته‌های کیان‌مهر و بحرینی (۱۳۹۵) و مویدی و آزادی‌طلب (۱۴۰۰)، هم‌راستا است. همچنین مشخص شد که در شرایط باد متقاطع، گردابه‌های موضعی و بازچرخانی جریان، موجب ماندگاری بیشتر ذرات در محدوده می‌شوند (Ruda Sarria et al., 2025). در مقابل، در باد موازی با امتداد خیابان اصلی، معابر فرعی مانند کانال‌های تخلیه عمل کرده و باعث افزایش تمرکز موضعی در خروجی‌ها می‌شوند (Lee et al., 2023). بررسی موردی دیواره ساختمانی بیمارستان قلب نیز نشان داد که نسبت ارتفاع ساختمان به عرض معبر، نقش کلیدی در شکل‌گیری الگوهای انباشت آلاینده دارد. در شرایط باد ضعیف، تمرکز آلاینده‌ها در سطوح بادگیر افزایش یافته اما در شرایط جوی باد شدید، جابه‌جایی ذرات آلوده‌کننده به پشت‌بام یا نواحی پشتی رخ می‌دهد؛ رفتاری که با مشاهده تحقیقات مشابه (Lee et al., 2023; Ruda Sarria et al., 2025) و تحلیل در خصوص تشدید ناپایداری جریان در نسبت‌های ارتفاع به عرض بالا مطابقت دارد. همچنین، داده‌های ما نشان داد که اختلاف ارتفاع میان ساختمان‌های مجاور، موجب تقویت آشفته‌گی‌های موضعی و شکل‌گیری جریان‌های ثانویه می‌شود که به انباشت ذرات در پناه‌باد ساختمان‌های کوتاه‌تر و فضاهای نیمه‌محصور می‌انجامد که در مطالعات پیشین نیز تأیید شده است (Buccolieri et al., 2010; Hang et al., 2012).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش نشان داد که مدل‌های شبیه‌سازی پایین به بالا مانند GRAL، ابزاری قدرتمند برای بازنمایی دقیق و جزئیات محور الگوهای انتشار آلاینده‌ها در محیط‌های شهری متراکم هستند. تمرکز بالای آلاینده‌ها عمدتاً در ارتفاعات کمتر از ۳۰ متر و در نواحی بادپناه و مجاور جداره ساختمان‌های با تهویه محدود رخ می‌دهد؛ یافته‌ای که اهمیت مدل‌سازی خردمقیاس را در محیط‌های با هندسه پیچیده و ناهمگن برجسته می‌سازد. با توجه به نقش تعیین‌کننده دقت داده‌ها در کیفیت شبیه‌سازی پیشنهاد می‌شود. در مطالعات آینده، نمونه‌برداری‌های میدانی نظام‌مند برای اعتبارسنجی مدل، داده‌های مورفولوژیک با دقت بالا مانند لیدار برای استخراج جزئیات بافت شهری و ترکیب مدل‌های خردمقیاس اقلیمی با سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) برای ارزیابی سناریوهای مختلف توسعه شهری به کار گرفته شوند. همچنین، مدل‌سازی عامل‌محور می‌تواند در شبیه‌سازی اثر تغییرات کالبدی یا افزایش فضاهای سبز بر الگوهای پراکنش آلاینده‌ها نقشی کلیدی ایفا کند. بهره‌گیری از داده‌های جمع‌سپاری^۲ و GIS مشارکتی^۳ نیز مسیرهای نوینی را برای تصمیم‌سازی شهری و زیست‌محیطی فراهم خواهد کرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاقی پژوهش

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

1. Geographic information system
2. VGI (Volunteered Geographic Information)
3. PGIS (Participatory GIS)

مشارکت نویسندگان

آتنا باقری، مسئولیت گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، اجرای مدل، تفسیر نتایج و نگارش پیش‌نویس مقاله را بر عهده داشته است. هانی رضاییان به‌عنوان استاد راهنما، طراحی مفهومی پژوهش، هدایت علمی فرآیند اجرا و ارزیابی یافته‌ها را بر عهده داشته است. جواد سدیدی، به‌عنوان استاد مشاور، در طراحی روش‌شناسی پژوهش و بازبینی محتوای مقاله همکاری نموده است. شهاب مرادی‌پور، در فرآیند گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، مدل‌سازی و تحلیل نتایج، مشارکت فعال داشته است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از سازمان هواشناسی کشور و شرکت کنترل کیفیت هوا به‌دلیل تأمین داده‌های مورد نیاز این پژوهش، تشکر به‌عمل می‌آید.

منابع

- آل‌شیخ، علی‌اصغر؛ قراگوزلو، علیرضا و سجادیان، مهیار (۱۳۹۱). بررسی آلودگی هوای منتج از ترافیک شهر تهران با بهره‌گیری از مدل LUR در تلفیق با GIS و ضرایب انتشار. فصل‌نامه جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس، ۴(۱۱)، ۱۴۳-۱۵۸. <https://sid.ir/paper/175656/fa>
- بخشی‌زاده، فریماه؛ رضاییان، هانی، و اکبری، مهری (۱۳۹۴). مدل‌سازی مکانی-زمانی سه‌بعدی پراکنش آلاینده اکسیدهای ازت هوا ناشی از ترافیک در تقاطع خیابان ولیعصر- فاطمی شهر تهران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۱)، ۴۳-۶۲. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.1.43>
- حیدری‌اصل، سحر؛ مرادی، حسین، و سلیمانی، محسن (۱۴۰۰). مدل‌سازی پراکنش ذرات معلق هوای شهر اصفهان با بهره‌گیری از روش‌های IDW و Co-Kriging. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۳(۶)، ۱۸۷-۲۰۰.
- شرکت کنترل کیفیت هوا، گزارش سالانه کیفیت هوای تهران در سال ۱۴۰۰، تهران.
- کریمی، مصطفی؛ خوشنواز، سمانه؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر، و مقبل، معصومه (۱۳۹۹). مدل‌سازی اثر جهت خیابان در پراکنش آلودگی هوا (مطالعه موردی: ناحیه ۲ منطقه ۶ شهرداری تهران). مطالعات شهری، ۹(۳۴)، ۷۷-۹۰.
- کیان‌مهر، آیدا، و بحرینی، سید حسین (۱۳۹۵). بررسی تاثیر سرعت و جهت باد بر شرایط تهویه و میزان تمرکز آلاینده‌ها در دالان‌های خیابانی. فصلنامه علوم محیطی، ۱۴(۲)، ۹۷-۱۰۸. https://envs.sbu.ac.ir/article_97719.html?lang=fa
- مویدی، محمدکاظم، و آزادی‌طلب، وحید (۱۴۰۰). مدل‌سازی لایه مرزی اتمسفری آشفته و پراکنش ذرات آلاینده ریزمقیاس جامد در یک محدوده شهری به کمک الگوی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۳(۵)، ۲۸۳۹-۲۸۵۶. <https://doi.org/10.22060/mej.2020.17685.6656>
- معاونت حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران و مرکز تحقیقات سوخت، احتراق و آلودگی (۱۳۹۴). ضرایب انتشار آلاینده‌های هوا برای خودروهای بنزین سوز تولید داخل بر اساس استاندارد آلودگی یورو ۲، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک.

References

- Alesheikh, A. A., Gharagozlu, A., & Sajadian, M. (2012). Study of air pollution resulting from the transportation traffic in Tehran metropolis by using LUR model combined with GIS and emission factors. *Geographical Journal of Chashmandaz-e-Zagros*, 4(11), 143-158. <https://sid.ir/paper/175656/en> [in Persian]
- Bakhshizadeh, F., Rezayan, H., & Akbary, M. (2015). 3D spatio-temporal modeling of NO_x air pollution of vehicular traffic in Vali-e-Asr and Fatemi Streets intersection, Tehran city. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 2(1), 43-62. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsach.2.1.43> [in Persian]
- Baik, J. J., & Kim, J. J. (2002). On the escape of pollutants from urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 36(3), 527-536.
- Berchet, A., Zink, K., Oetl, D., Brunner, J., Emmenegger, L., & Brunner, D. (2017). Evaluation of high-resolution GRAMM-GRAL (v15.12/v14.8) NO_x simulations over the city of Zürich, Switzerland. *Geoscientific Model Development*, 10(9), 3441-3459. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3441-2017>.
- Buccolieri, R., Sandberg, M., & Di Sabatino, S. (2010). City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. *Atmospheric Environment*, 44(15), 1894-1903. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.02.022>.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: Wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41(2), 238-252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>.
- Britter, R. E., & Hanna, S. R. (2003). Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35, 469-496. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147>.
- Department of Transportation & Traffic Organization of Tehran Municipality and Fuel, Combustion and Pollution Research Center. (2015). The hot exhaust pollution emission factors for petrol cars manufactured domestically based on pollutant standard Euro-2. Sharif University of Technology, Mechanical Engineering Department. [in Persian]
- El-Harbawi, M. (2013). Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review. *Environmental Reviews*, 21(3), 149-179. <https://doi.org/10.1139/er-2012-0056>.
- Gertler, A. W., Koracin, D. R., Koracin, J., Lewis, J. M., Luria, M., Sagebiel, J. C., & Stockwell, W. R. (2004). Development and Validation of a Predictive Model to Assess the Impact of Coastal Operations on Urban Scale Air Quality. In: Borrego, C., Incecik, S. (eds) *Air Pollution Modeling and Its Application XVI*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8867-6_69.
- Gianquintieri, L., Oxoli, D., Caiani, E. G., & Brovelli, M. A. (2024). State-of-art in modelling particulate matter (PM) concentration: A scoping review of aims and methods. *Environmental Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04781-5>.
- GRAL, (2020), GRAL-Graz Lagrangian Model. Documentation and User Guides. Available online: <https://gral.tugraz.at/index.php/files/category/3-documentation-and-user-guides> (accessed 28 November 2020).
- Hang, J., Li, Y., Sandberg, M., Buccolieri, R., & Di Sabatino, S. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Building and Environment*, 56, 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.023>.
- Heidari Asl, S., Moradi, H., & Soleimani, M. (2021). Modeling of air particulate matter in the city of Isfahan with the use of IDW and Cokriging methods. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(6), 187-200. [in Persian]
- Karimi, M., Khosnavaz, S., Shamsipour, A., & Moghbel, M. (2020). Modeling the effect of street orientation on the air pollution dispersion (District Six of Tehran Municipality). *Motaleate Shahri*, 9(34), 77-90. [in Persian]
- Katharopoulos, A., Galmarini, S., & Schmidli, J. (2022). Lagrangian particle dispersion models in the grey zone of turbulence: Adaptations to FLEXPART COSMO for simulations at 1 km grid resolution. *Boundary-Layer Meteorology*, 184, 241-267. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00728-3>.
- Kahl, J. D., & Chapman, H. L. (2018). Atmospheric stability characterization using the Pasquill method: A critical evaluation. *Atmospheric Environment*, 187, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.058>.
- Kianmehr, A., & Bahrainy, H. (2016). The effect of wind direction and speed on ventilation and pollutant concentrations in street canyons. *Advanced Environmental Sciences*, 14(2), 97-108. https://envs.sbu.ac.ir/article_97719.html?lang=en [in Persian]
- Lazić, L., Pejanović, G., & Živković, M. (2010). Wind forecasts for wind power generation using the Eta model. *Renewable Energy*, 35(6), 1236-1243. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.028>.
- Lee, C.-H., Lung, S.-C. C., & Chen, J.-P. (2023). Three-dimensional spatial inhomogeneity of traffic-generated urban PM_{2.5} in street canyons. *Atmospheric Pollution Research*, 14(5), 101748. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101748>.

- Ling, H., Lung, S.-C. C., & Uhrner, U. (2020). Micro-scale particle simulation and traffic-related particle exposure assessment in an Asian residential community. *Environmental Pollution*, 266, 115046. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115046>.
- Liu, W., Ling, X., Xue, Y., Wu, S., Gao, J., Zhao, L., & He, B. (2024). Study on the concentration of top air pollutants in Xuzhou city in winter 2020 based on the WRF-Chem and ADMS-Urban models. *Atmosphere*, 15(1), 129. <https://doi.org/10.3390/atmos15010129>.
- Moayyedi, M. K., & Talab, V. A. (2021). Modeling of turbulent atmospheric boundary layer and dispersion of solid pollutant particles in an urban area using large eddy simulation. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(5), 2839-2856. <https://doi.org/10.22060/mej.2020.17685.6656> [in Persian]
- Oettl, D. (2015). Evaluation of the revised Lagrangian particle model GRAL against wind-tunnel and field observations in the presence of obstacles. *Boundary-Layer Meteorology*, 155(2), 271-287. <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9993-4>.
- Oettl, D., & Uhrner, U. (2011). Development and evaluation of GRAL-C dispersion model, a hybrid Eulerian-Lagrangian approach capturing NO-NO₂-O₃ chemistry. *Atmospheric Environment*, 45(4), 839-847. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.028>.
- Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P. O., & Petrova-Antonova, D. (2022). Air pollution dispersion modelling in urban environment using CFD: A systematic review. *Atmosphere*, 13(10), 1640. <https://doi.org/10.3390/atmos13101640>.
- Ruda Sarria, F., Guerrero Delgado, M., Monge Palma, R., Palomo Amores, T., Sánchez Ramos, J., & Álvarez Domínguez, S. (2025). Modelling pollutant dispersion in urban canyons to enhance air quality and urban planning. *Applied Sciences*, 15(4), 1752. <https://doi.org/10.3390/app15041752>.
- Shafiepor, M., & Kamalan, H. (2005). Air quality deterioration in Tehran due to motorcycles. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2(3), 145-152. <http://hdl.handle.net/1807/9094>.
- Srivastava, A., & Rao, B. P. S. (2011). Urban air pollution modeling. In *Air Quality-Models and Applications* (p. 364). <https://doi.org/10.5772/16776>.
- Soulhac, L., Salizzoni, P., Cierco, F. X., & Perkins, R. (2011). The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; Part I, presentation of the model. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7379-7395. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.008>
- Tehran Air Quality Control Company. (1400). *Annual report on Tehran air quality*. [in Persian]
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37(2), 155-182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9).
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79-82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>.
- Zhang, S., Wu, Y., Huang, R., Wang, J., Yan, H., Zheng, Y., & Hao, J. (2016). High-resolution simulation of link-level vehicle emissions and concentrations for air pollutants in a traffic-populated eastern Asian city. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(15), 9965-9981. <https://doi.org/10.5194/acp-16-9965-2016>.
- Zhang, Z., & Chen, Q. (2007). Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces. *Atmospheric Environment*, 41(25), 5236-5248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.086>.