



Investigating and Identifying of Suitable Point for Installing Low-Cost Sensors in IoT Monitoring of Urban Air Pollution

Masoud Ebrahimi Ghadi,¹ Ahmad Nohegar^{2*} , Zeinab Sazvar³, Mahmoud Behrouzi⁴ 

¹Department of Environmental Engineering, Air Pollution, Faculty of Environment, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

²Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴Department of Environmental Hazards, Marine Science Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 03 February 2025

Revised: 07 May 2025

Accepted: 13 May 2025

Available Online: 14 May 2025

Keywords:

Particulate Matter
(PM_{2.5} and PM₁₀)

Fuzzy Logic and Membership
Functions

Moran's I Spatial
Autocorrelation

Geographically Weighted
Regression (GWR)

Urban Air Pollution – Tehran

ABSTRACT

The use of low-cost sensors based on the Internet of Things (IoT) has become a novel approach in urban air pollution monitoring. This study aimed to determine the optimal placement of such sensors in Tehran using a multi-criteria decision-making (MCDM) method. Eleven sub-criteria were identified under two main criteria: air pollution levels and pollution sources. Each sub-criterion was mapped as a digital layer in a GIS environment. These layers were then integrated using overlay operators, and the optimal operator was selected based on Ordinary Least Squares (OLS) regression. Spatial clusters were identified using the Hot Spot Analysis and Moran's I statistics. Geographically Weighted Regression (GWR) was used for sensitivity analysis between the sub-criteria and the final suitability map. Results indicated that PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations, and proximity to transportation terminals and fuel stations, were the most influential sub-criteria, with membership weights of 0.170, 0.151, 0.139, and 0.113, respectively. The OLS model showed that the SUM operator had the strongest correlation with the sub-criteria. GWR analysis produced high model accuracy (AICc = 4484, R² = 0.98). The final suitability map revealed that 13% of Tehran's area is highly suitable and 17% is moderately suitable for sensor installation, mostly located in the central, southern, and southwestern zones, where pollution levels are highest.

* Corresponding author: Dr. Ahmad Nohegar

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

How to cite this article: Ebrahimi Ghadi, M., Nohegar, A., Sazvar, Z., & Behrouzi, M. (2025). Investigating and Identifying of Suitable Point for Installing Low-Cost Sensors in IoT Monitoring of Urban Air Pollution. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 145-172. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.92002.1546>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The monitoring of air pollutants by the traditional method is very expensive, and complete citywide coverage is practically impossible. In this situation, it is possible to switch to low-cost sensors. With a cost of less than \$1,000 per sensor package, compared to multi-million-dollar reference monitoring stations, this solution is economical and feasible at the city scale. One of the key issues related to sensors is their precise spatial location and distribution within the city. By identifying optimal points for installing sensors, it is possible to provide comprehensive air pollution coverage in Tehran. The present research was conducted with the aim of identifying suitable points for installing low-cost air pollution sensors in Tehran using geostatistical methods combined with geographic models.

Material and Methods

The present study was conducted in the urban area of Tehran. The required information includes data on the concentration of air pollutants and the identification of pollution sources. The concentration of air pollutants at air quality monitoring stations in Tehran is measured on a daily basis. In this research, data related to the concentration of gases (NO₂, SO₂, CO, and O₃) and suspended particles (PM10 and PM2.5) were collected from 24 air quality monitoring stations in Tehran on an hourly basis during the years 2013 to 2023 (1392 to 1402). After reviewing scientific literature, 11 sub-criteria were identified under 2 main criteria for sensor placement. Based on the mentioned sources, a digital layer was prepared for each sub-criterion in ArcGIS Pro. These layers were classified by importance using the Reclassify tool in GIS. For superimposing layers and identifying suitable sensor locations, the layers were fuzzified using the Large and Small membership tools. As a result, 11 fuzzy layers were generated. To determine the relative importance of each sub-criterion and its effectiveness compared to others, the Analytic Network Process (ANP) was used. The resulting weights were multiplied by each raster using the Raster Calculator in ArcGIS Pro, producing a weighted fuzzy map for each sub-criterion. These maps were then superimposed using fuzzy operators including AND, OR, SUM, PRODUCT, and GAMMA (0.9, 0.7, and 0.5). To identify the best operator, Ordinary Least Squares (OLS) regression was applied. Sub-criteria were treated as independent variables, while the map resulting from each operator was treated as the dependent variable. The operator with the highest correlation coefficient was selected as the final method for layer combination. To investigate the spatial distribution pattern of suitable sensor locations, Moran's I autocorrelation and Hot Spot Analysis were conducted in ArcGIS Pro. In the final stage, the spatial relationship between the 11 sub-criteria (independent variables) and the final suitability map (dependent variable) was analyzed using Geographically Weighted Regression (GWR).

Results and Discussion

The results showed that PM concentrations were the most important factor in selecting sensor locations, as these particles indicate both the intensity and spatial extent of pollution. Following PM, urban transportation stations including terminals, bus, and taxi stations were ranked second in importance. Regression results showed that the SUM operator had the best performance based on regression coefficients and the coefficient of determination. The correlation between the SUM map and the sub-criteria was significant, confirming the SUM operator as the best option for the final map. Therefore, the final SUM map was adopted to assess suitability of land in Tehran for low-cost sensor installation. Analysis of spatial distribution patterns showed a Moran's I value of 0.532, indicating strong spatial autocorrelation and a clustered pattern. The Z-score and p-value (0.000) confirmed the clustering pattern. Cold spots (blue) represent low suitability, while hot spots (red) identify highly suitable areas for sensor installation. These red zones are concentrated in southern Tehran, while blue zones are in northern, northeastern, and northwestern areas.

The hotspot model confirmed Moran's index, verifying clustered spatial suitability. Evaluation of the GWR model confirmed its accuracy and reliability, with an AIC of 4484 and $R^2 = 0.98$. Approximately 16 hectares of suitable land were identified in central, southern, southwestern, and in some cases northern Tehran—particularly near highways, gas stations, transportation terminals, and industrial centers. Based on the final maps, sub-criteria analysis, and field verification, 44 specific locations in Tehran were identified as optimal sensor sites. A distribution map of these points was prepared for implementation.

Conclusion

Low-cost monitoring stations in urban areas can provide valuable insights into spatial patterns of air pollution. These online and affordable systems are viable given the availability of low-cost monitors, which can either be mounted on existing infrastructure or distributed across the city. However, the data generated from these systems must be properly evaluated and validated.

A strategically placed network of such monitors allows for dense spatial coverage, offering a cost-effective and reliable alternative to traditional monitoring networks. Lands located at least 200 meters away from pollution sources, where pollution levels are low, are unsuitable for sensor installation. Approximately 20%, 20%, and 29% of Tehran's land was classified as marginally unsuitable, unsuitable, and completely unsuitable, respectively. Nevertheless, 44 highly suitable locations were identified, mostly in central, southern, and southwestern Tehran. Each sensor package costs about \$900, making the total implementation cost \$400,000 (approximately 20 billion IRR) significantly lower than the 80 billion IRR required for a single traditional monitoring station. Thus, low-cost sensors offer a highly economical solution for air pollution monitoring in Tehran.



بررسی و شناسایی نقاط مناسب جهت نصب حسگرهای کم‌هزینه در پایش برخط آلودگی هوای شهری

مسعود ابراهیمی قادی^۱، احمد نوحه‌گر*^۲، زینب سازور^۳، محمود بهروزی^۴

^۱ گروه مهندسی محیط‌زیست، گرایش آلودگی هوا، دانشکده محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳ گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۴ گروه مخاطرات محیطی، پژوهشکده علوم دریایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳	استفاده از حسگرهای کم‌هزینه مبتنی بر اینترنت اشیا به روشی نوین برای پایش آلودگی هوای شهری تبدیل شده است. این پژوهش با هدف تعیین مکان بهینه نصب این حسگرها در شهر تهران انجام شد و از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره گرفت. یازده زیرمعیار در دو معیار اصلی «میزان آلودگی» و «منابع آلاینده» شناسایی و برای هرکدام لایه‌ای رقومی در محیط GIS تولید شد. ترکیب لایه‌ها با عملگرهای مختلف انجام شد و به کمک رگرسیون OLS عملگر بهینه (SUM) انتخاب گردید. برای شناسایی الگوهای فضایی، شاخص‌های موران و هات‌اسپات به کار رفت. همچنین، برای تحلیل حساسیت ارتباط زیرمعیارها با نقشه نهایی، از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) استفاده شد. نتایج نشان داد که زیرمعیارهای غلظت PM10، PM2.5 فاصله از پایانه‌های حمل‌ونقل و جایگاه‌های سوخت، بیشترین تأثیر را در جانمایی دارند. خروجی مدل GWR با AICc برابر ۴۴۸۴ و ضریب تعیین ۰.۹۸، دقت بالای مدل را نشان داد. نقشه نهایی مکان‌یابی نشان داد که ۱۳٪ از اراضی تهران کاملاً مناسب و ۱۷٪ مناسب برای نصب حسگرها هستند. این مناطق عمدتاً در مرکز، جنوب و جنوب‌غرب تهران واقع شده‌اند؛ جایی که آلودگی هوا و منابع آلاینده متمرکزتر است.
کلمات کلیدی: ذرات معلق (PM10 و PM2.5) منطق فازی و توابع عضویت همبستگی فضایی شاخص موران رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) آلودگی هوای شهری - تهران	

مقدمه

با وجود تلاش‌های مداوم مقامات دولتی، کیفیت هوا همچنان یکی از نگرانی‌های اصلی برای سلامت انسان است. شواهدی از کاهش بار آلودگی و بهبود کیفیت هوا ناشی از قرنطینه همه‌گیری کرونا، بیان‌گر تأثیر فعالیت‌های انسانی در تشدید آلودگی محیط-زیست است (Toscano & Murena, 2020). بسیاری از ویروس‌های مزمن و سرطانی توسط غبارهای شهری-صنعتی پخش می‌شوند (Schwela et al., 2012). به این ترتیب، نظارت بر کیفیت هوا برای مدیریت محیط‌زیست شهری و بهداشت بسیار حائز اهمیت است که در چارچوب‌های قانونی تنظیم می‌شود (WHO, 2021). معمولاً این چارچوب‌ها به ایستگاه‌های پایش پُرهزینه که نیاز به نگهداری و کالیبراسیون مداوم دارند، متکی است. این شرایط در همه‌جا باعث استقرار شبکه پراکنده از این ایستگاه‌ها شده است که قادر به مقابله با تغییرات مکانی-زمانی بالا و اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها نیستند (UNION, 2008). استقرار و نگهداری تعداد زیادی از این شبکه‌های پایش ثابت هوا بسیار پُرهزینه است. حداقل ۱۰ هزار دلار برای هر ایستگاه، بدون احتساب هزینه‌های نصب و نگهداری نیاز است. همچنین این ایستگاه‌های پایش عموماً در مناطقی که فعالیت‌ها و جمعیت‌های انسانی متمرکز هستند، قرار ندارند. کنار جاده‌ها و مناطق ترافیکی نیز بسیار دور از ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند که ممکن است بر دقت تخمین توزیع فضایی آلاینده‌ها در مناطق شهری تأثیر بگذارد. برای رسیدگی به این چالش‌ها، اخیراً توجه به استفاده از واحدهای سنجش آنلاین و کم‌هزینه معطوف شده است. در دهه‌های گذشته، مقامات دولتی یک رویکرد یکپارچه برای مدیریت کیفیت هوا اتخاذ کرده‌اند که شامل اندازه‌گیری مستقیم و مدل‌سازی غلظت آلاینده‌ها است. در حالی که اندازه‌گیری‌های مستقیم اطلاعات مستقیمی از سطح آلودگی هوا در موقعیت‌های مشخص ارائه می‌کنند. مدل‌های پراکندگی، تصویر جامعی از توزیع آلودگی هوا در سراسر مناطق شهری ارائه می‌دهند. غلظت آلاینده‌ها همیشه توسط شبکه‌های نظارتی پراکنده اندازه‌گیری شده است؛ اما اخیراً حسگرهای ارزان قیمت وارد بازار رقابتی شده است (De Vito, Esposito, Castell, Schneider & Bartonova, 2020). استقرار این حسگرها برای تکمیل پایش‌های نظارتی استفاده می‌شود که تفکیک مکانی خوبی فراهم کرده است. مزیت استفاده از این شبکه‌های حسگر، کسب اطلاعات مکانی-زمانی دقیق‌تری از اندازه‌گیری‌ها با هزینه‌های نصب و عملیاتی کمتر است (Sung, Lee, Kim & Park, 2019). در چندین مطالعه نشان داده شده است که غلظت آلاینده‌های هوا دارای تغییرات فضایی در مقیاس خرد است که توسط مانیتورهای نظارتی ثبت نمی‌شود (Tan, Lipsky, Saleh, Robinson & Presto, 2014). در شهر پیتسبورگ از ایالات متحده لی و همکاران (Li et al., 2019) گاز NO₂ و در شهر لس‌آنجلس میسکل و همکاران (Miskell et al., 2019) گاز O₃ تغییرات فضایی درون همسایگی زیادی دارند و در نقاط داغ، غلظت آن پنج برابر بیشتر از غلظت پس‌زمینه‌ای است که توسط مانیتورها اندازه‌گیری می‌شود و در میانگین منطقه‌ای، این غلظت‌ها نادیده گرفته می‌شود.

حسگرهای کم‌هزینه برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های هوای شهری، در قالب یک جعبه با ابعاد ۵۰×۱۰۰ سانتی‌متر قرار می‌گیرد. حسگرهای لیزری در درون جعبه قرار دارند. یک فن، هوای بیرون را به داخل جعبه مکیده و لیزر پراکنش نور توسط ذرات معلق در هوا را اندازه‌گیری کرده و غلظت ذرات را محاسبه می‌کند (Sayahi, Butterfield & Kelly, 2019). همچنین حسگرهایی برای اندازه‌گیری غلظت گازها وجود دارد که در داخل جعبه قرار می‌گیرد. جعبه بر روی دیوار و یا پایه با ارتفاع ۳ متری از سطح زمین نصب می‌شود. هسته مرکزی، اطلاعات را دریافت کرده و از طریق فضای ابری و اینترنت، اطلاعات را به سرور مرکزی انتقال می‌دهد. با استفاده از شبکه حسگرهای کم‌هزینه (محرک و ثابت) در یک شهر، تفاوت‌های محله‌ای و فضایی آلاینده در نزدیکی منابع خاص (مانند جاده‌ها) را می‌توان حل کرد؛ می‌توان تا مقیاس خیابان (۱۰۰ متر) نصب کرد که پیش‌بینی‌های مطمئن‌تری از توزیع آلاینده‌های هوا در سطح شهر ارائه دهند (Fattoruso et al., 2015)؛ اما این حسگرها در چه مکان‌هایی نصب شوند تا پوشش کاملی از آلودگی منطقه و یا شهر داشته باشند؟

ادغام حسگرهای کم‌هزینه با اینترنت اشیا^۱ به یک رویکرد عملی برای توسعه شهرهای هوشمند تبدیل شده است. عملکرد یک حسگر ذرات معلق در شهر سانتیاگو شیلی بررسی شد. در جعبه^۲ پایش آنلاین، حسگرهای پایش رطوبت نسبی و دما نیز جاگذاری شد. در سه ایستگاه در سطح شهر، حسگرهای کم‌هزینه در نزدیکی مراکز پایش مرجع و فیلترهای نمونه‌گیر ذرات معلق نصب و غلظت ذرات پایش شد. نتایج نشان داد که حسگرهای کم‌هزینه در زمانی که رطوبت نسبی بیش از ۷۵ درصد باشد، غلظت ذرات را بیشتر از ایستگاه مرجع و فیلتر نمونه‌گیر نشان می‌دهد، اما در رطوبت کمتر از ۷۵ درصد، پایش بسیار دقیق بود و همبستگی آن با ایستگاه مرجع و فیلتر ۰/۹۸ بود. بنابراین با مدیریت و کالیبره کردن حسگر در رطوبت بالا می‌توان به حسگرها اعتماد کرد و در سطح شهر برای پایش آلاینده‌های هوا نصب کرد (Tagle et al., 2020).

در شهر تورنتو کانادا، پژوهشگران برای ایجاد پایگاه جامع اطلاعات آلودگی هوای شهری، از ابزارهای چندگانه مانند شبکه حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های لیدار، ایستگاه‌های مرجع زمینی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل استفاده کردند؛ آنها نشان دادند که هر یک از این ابزارها دارای معایبی است که استفاده^۳ جمعی از آنها می‌تواند محدودیت‌ها را پوشش دهد. اگرچه پایش ماهواره‌ای اطلاعات زیادی را دریافت و عرضه می‌کند، اما در روزهای ابری کارایی ندارد و از طرفی در مقیاس شهری، وضوح مکانی مطلوبی ندارد. به همین دلیل نصب حسگرهای آنلاین این محدودیت‌ها را به‌خوبی پوشش می‌دهد، اما نصب حسگرها در مکان‌های مناسب مستلزم مکان‌یابی بر اساس شاخص‌ها و عوامل موثر است که با روش‌های آماری و تلفیق آن با سیستم اطلاعات جغرافیایی قابل انجام است (Ganji et al., 2023).

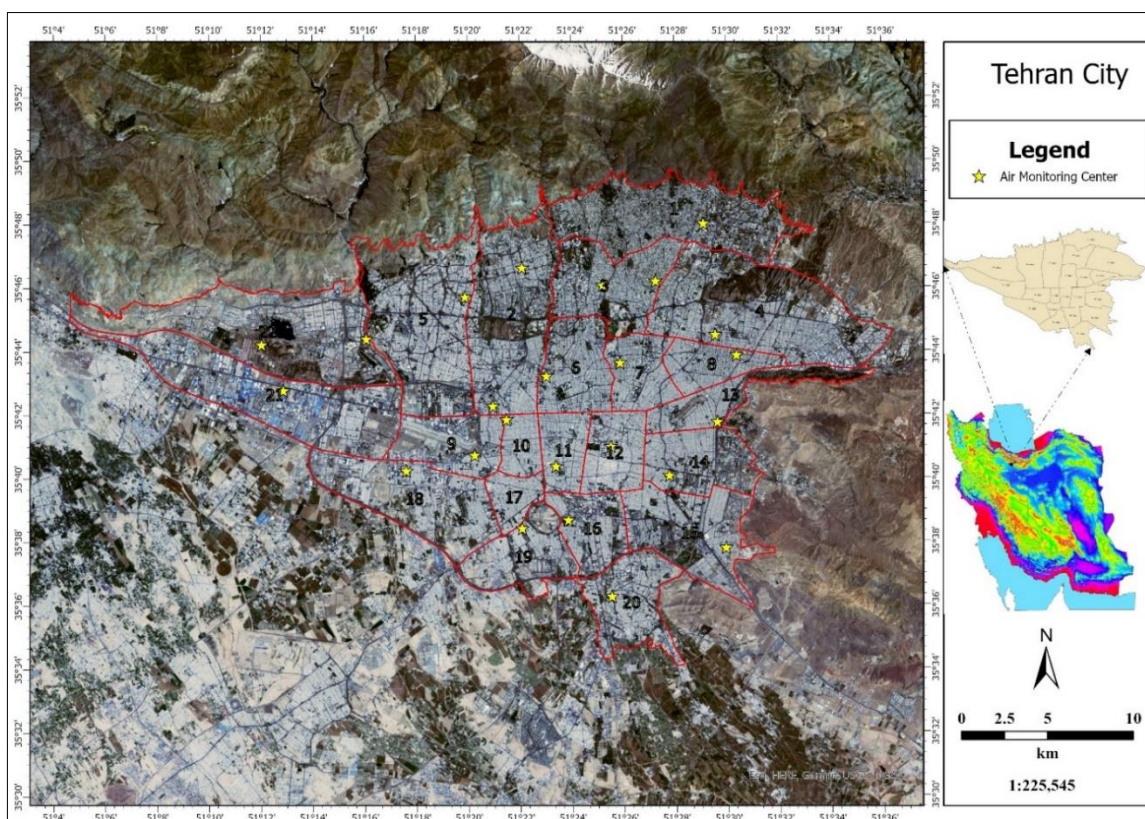
قابلیت اطمینان اندازه‌گیری حسگرهای کم‌هزینه بر پایه^۴ اینترنت اشیا یک پیش‌نیاز مهم است که نیاز به ارزیابی دقیق عملکرد و کالیبراسیون در مقایسه با پایش مرجع دارد. در شهر آتن یونان در تابستان ۲۰۱۹ و زمستان و بهار ۲۰۲۰، پایش آنلاین ذرات معلق توسط حسگرهای کم‌هزینه انجام شد که نتایج نشان داد اطلاعات به‌دست‌آمده همبستگی ۰/۹۸ درصد با پایش مرجع دارند که می‌توان به نتایج آن اعتماد کرد. حسگرهای کم‌هزینه برای اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق در هوای محیطی آپارتمان‌های مسکونی نیز قابلیت استفاده دارد که در آپارتمان‌های شهر پکن در چین غلظت PM_{2.5} در مقیاس یک‌دقیقه‌ای با حسگرهای کم‌هزینه اندازه‌گیری شد و علاوه بر پایش صحیح غلظت ذرات، می‌توان منابع تولید این ذرات را نیز شناسایی کرد (Shen et al., 2021).

آلودگی هوا در تهران به موضوعی بحث‌برانگیز تبدیل شده است که کنترل آن یکی از مهم‌ترین مباحث مدیریت شهری است. در دو دهه^۵ اخیر به‌دلیل انفجار جمعیتی و افزایش روزافزون وسایل نقلیه و همچنین تمرکز صنایع به‌ویژه در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی، تهران را با بحران آلودگی هوا مواجه کرده است. برای مدیریت و کنترل آلودگی هوا، پایش آن در توزیع فضای جغرافیایی شهر بسیار حائز اهمیت است و می‌توان با اندازه‌گیری و پایش مداوم، منابع آلودگی را شناسایی و دسته‌بندی نمود. سپس راهکارهای عملیاتی و مدیریتی برای آن تهیه کرد؛ اما پایش آلاینده‌های هوا به روش مرجع و سنتی، بسیار گران‌قیمت است و پوشش کامل شهر عملاً غیرممکن است. در این شرایط، می‌توان به حسگرهای کم‌هزینه روی آورد و با هزینه^۶ کمتر از ۱۰۰۰ دلار برای هر پکیج حسگر در مقایسه با ایستگاه‌های پایش مرجع چند میلیون دلاری، شهر را از لحاظ میزان آلودگی پوشش داد؛ اما چالش اصلی حسگرها، دقت اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها است که در ایستگاه‌های مرجع خطای اندازه‌گیری بسیار کمتر از پایش آنلاین توسط حسگرها است. البته افزایش دقت اندازه‌گیری در حسگرها با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های رگرسیونی انجام می‌گیرد، ولی باز هم دقت آن به اندازه^۷ ایستگاه‌های مرجع نیست. یکی دیگر از مسائل مربوط به حسگرها، مکان‌یابی و توزیع فضایی دقیق آنها در سطح شهر است. با شناسایی نقاط بهینه برای نصب حسگرها، می‌توان پوشش کاملی از آلودگی هوای شهر تهران ارائه کرد.

اگرچه حسگرهای سیار بر روی اتوبوس‌ها شهری نصب می‌شود، اما با توجه به سطح آلودگی زیاد شهر تهران و منابع عظیم آلاینده‌ها در شهر، پژوهش حاضر با هدف شناسایی نقاط مناسب برای نصب حسگرهای کم‌هزینه برای آلودگی هوای شهر تهران انجام شد و از روش‌های زمین‌آمار و تلفیق آن با مدل‌های جغرافیایی استفاده گردید. بنابراین پژوهش حاضر سعی در شناسایی مکان‌های مناسب برای نصب حسگرهای کم‌هزینه دارد تا بتوان با هزینه کمتر، میزان آلودگی در سطح شهر را پوشش داد.

منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در محدوده فضایی شهر تهران انجام شد. شهر تهران، پایتخت و پرجمعیت‌ترین شهر ایران (۹/۰۳۹ میلیون نفر) است. تهران به ۲۲ منطقه و ۱۲۲ ناحیه شهری تقسیم شده است و شهرهای تجریش و ری را نیز فرا گرفته است. شهر تهران در عرض شمالی ۳۳ تا ۳۵ درجه و طول شرقی ۵۱/۱۷ تا ۵۱/۳۳ درجه قرار دارد و با مساحتی حدود ۷۳۰ کیلومترمربع، از کوهپایه‌های جنوبی رشته کوه البرز شروع شده (ارتفاع ۱۸۰۰ متری از سطح دریا) و با گرادبان شیب ارتفاعی، به دشت کویر در جنوب استان تهران (ارتفاع ۹۰۰ متری از سطح دریا) ختم می‌شود (شکل ۱). تهران دارای اقلیم نیمه خشک است و بادهای غالب آن غربی بوده و سامانه‌های بارشی آن نیز به واسطه بادهای غربی به‌ویژه سیستم باران‌زای مدیترانه‌ای است. متوسط دمای سالانه شهر تهران ۱۷/۱ درجه سلسیوس، متوسط بارندگی سالانه ۲۳۱ میلی‌متر و میانگین روزهای یخبندان در طول سال ۴۹ روز می‌باشد. سرعت متوسط باد ۸ کیلومتر بر ساعت و رطوبت نسبی حدود ۳۹ درصد است. مسیر اصلی و جهت باد غالب شهر تهران، شمال غرب به جنوب شرقی است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه، شهر تهران (تصویر پس زمینه: سنجنده OLI ماهواره LANDSAT، ۲ ژوئن ۲۰۲۴)

Fig. 1. Study area, Tehran city (Background image: LANDSAT OLI, June 2, 2024)

مواد و روش‌ها

این پژوهش برای جانمایی حسگرهای کم‌هزینه جهت سنجش آلاینده‌های هوا در شهر تهران انجام شد که منابع اطلاعاتی موردنیاز و روش مورد استفاده به شرح زیر تشریح می‌گردد.

منابع اطلاعاتی

اطلاعات موردنیاز در این پژوهش شامل داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌های هوا و شناسایی منابع تولید آلاینده‌ها است. غلظت آلاینده‌های هوا در ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر تهران به صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شوند. در این پژوهش، اطلاعات مربوط به غلظت گازها (CO ، SO_2 ، NO_2 و O_3) و ذرات معلق (PM_{10} ، $PM_{2.5}$) از ۲۴ ایستگاه پایش کیفیت هوا در شهر تهران در مقیاس زمانی یک ساعته در سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ شمسی تهیه شد. اگرچه تصاویر ماهواره سنتینل ۵ نیز برای پایش کیفیت هوا مناسب است، اما محدودیت اصلی آن، در روزهای ابری است و در نیمه سرد سال که تعداد روزهای ابری در تهران افزایش می‌یابد و در بیش از ۶۰ درصد روزها، ابرناکی زیاد است، نمی‌توان به داده‌های این ماهواره اعتماد کرد، به همین دلیل در این پژوهش از اطلاعات ایستگاه‌های زمینی پایش آلاینده‌های هوای تهران استفاده گردید.

اطلاعات مربوط به دیگر مؤلفه‌ها شامل نزدیکی به بزرگراه‌ها، جایگاه‌های سوخت، مراکز صنعتی، پایانه‌ها و ایستگاه‌های حمل‌ونقل شهری و همچنین مؤلفه ترافیک شهری از روی تصاویر ماهواره Landsat، نقشه‌های کاداستر شهری و نقشه کاربری اراضی شهر تهران به دست آمد؛ به گونه‌ای که ابتدا مختصات جغرافیایی منابع فوق‌الذکر از طریق نقشه‌های شهری و مشاهدات میدانی به دست آمد، سپس در نرم‌افزار ArcGIS pro با ابزار Geocoding، نقاط مشخص شده بر روی تصویر لندست اضافه گردید و برچسب‌گذاری شد.

تهیه لایه‌های رقومی

پس از بررسی اسناد و منابع علمی و همچنین مصاحبه با متخصصین مهندسی آلودگی هوای شهری، یازده زیرمعیار در قالب دو معیار برای جانمایی حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوای شهر تهران شناسایی شد.

معیار منابع آلودگی

معیار منابع آلودگی شامل زیرمعیارهای فاصله از جاده شهری، فاصله از جایگاه‌های سوخت، فاصله از پایانه‌های حمل‌ونقلی، فاصله از نقاط ترافیکی و فاصله از مراکز صنعتی می‌باشد. برای هر یک از این زیرمعیارها، در نرم‌افزار ArcGIS pro لایه اطلاعات رقومی تهیه گردید؛ به گونه‌ای که پس از تعیین این نقاط (منابع آلودگی) و برچسب‌گذاری آنها، با تابع فاصله اقلیدسی، برای هر یک از زیرمعیارها نقشه پهنه‌بندی شده فاصله از منبع آلودگی ترسیم گردید و به عنوان یک لایه رقومی در نظر گرفته شد. با توجه به اهمیتی که فاصله از منابع آلودگی هوا در جانمایی حسگرهای برخط دارند، لایه رقومی آنها باید طبقه‌بندی مجدد شود و برای هر زیرمعیار از منابع آلودگی، یک نقشه طبقه‌بندی شده تهیه گردید (جدول ۱).

پس از طبقه‌بندی مجدد، لایه‌ها (نقشه‌ها) با عملگر Small، فازی شدند؛ به این معنا که هر چه فاصله از منبع آلودگی بیشتر شود، ارزش عددی (درجه عضویت فازی) در پهنه شهر تهران به سمت صفر میل می‌کند و ارزش آن برای جانمایی حسگر کاهش می‌یابد؛ اما هر چه به منبع آلودگی نزدیک‌تر باشد، ارزش آن برای نصب حسگر افزایش می‌یابد و درجه عضویت فازی آن به یک میل می‌کند. منظور از درجه عضویت فازی^۱، ارزش هر نقطه از پهنه شهر تهران برای نصب حسگر را نشان می‌دهد، که اگر به یک میل کند، ارزش بالا و اگر به صفر میل کند، ارزش پایینی دارد.

جدول ۱- طبقه‌بندی زیرمعیارهای منابع آلودگی هوا (برحسب متر)

Table 1- Classification of air pollution sources sub-criteria (meters)

مطلوبیت کم Low Moderat	مطلوبیت متوسط Moderate Utilit	مطلوبیت زیاد High Utility	مطلوبیت خیلی زیاد Very High Utility	زیرمعیار
>500	500	200	100	فاصله از جاده شهری Distance to Highway
>1000	1000	500	150	فاصله از جایگاه سوخت Distance to oil station
>1000	500	200	100	فاصله از پایانه‌ها Distance to terminal and stations
>1000	1000	500	150	فاصله از نقاط ترافیکی Distance to traffic points
>2000	2000	1000	500	فاصله از مراکز صنعتی Distance to industrial points

معیار غلظت آلاینده‌های هوا

معیار آلاینده‌های هوا شامل ذرات معلق (PM_{2.5-10})، گازهای مونوکسیدکربن (CO)، ازن (O₃)، اکسیدنیتروژن (NO_x) و دی-اکسیدگوگرد (SO₂) می‌باشد که غلظت آنها از ایستگاه‌های پایش مرجع به دست آمد. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های مرجع در نرم‌افزار ArcGIS pro با ابزار Geocoding، وارد شده و محل ایستگاه به صورت لایه نقطه‌ای بر روی پهنه شهر تهران مشخص شد. غلظت آلاینده‌ها به هر نقطه که نشانگر محل ایستگاه‌های مرجع هستند، اضافه شد. سپس با تابع درون‌یابی وزنی معکوس فاصله‌ای^۱، نقشه پهنه‌بندی غلظت برای هر آلاینده در پهنه شهر تهران ترسیم گردید. در ادامه، لایه‌های رقومی تهیه شده طبقه‌بندی مجدد شد و با عملگر Large، درجه عضویت فازی برای هر نقشه تعیین شد؛ به گونه‌ای که هرچه غلظت آلاینده بیشتر باشد، درجه عضویت فازی افزایش می‌یابد و ارزش اراضی برای نصب حسگر بیشتر می‌شود و بالعکس، هرچه غلظت آلاینده کمتر باشد، درجه عضویت فازی کاهش می‌یابد و ارزش اراضی نیز برای نصب حسگر کمتر می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲- طبقه‌بندی زیرمعیارهای غلظت آلاینده‌ها (برحسب متر)

Table 2- Classification of pollutant concentration sub-criteria (meters)

مطلوبیت کم Low Moderate	مطلوبیت متوسط Moderate utility	مطلوبیت زیاد high utility	مطلوبیت خیلی زیاد Very high utility	واحد Unit	زیرمعیار Sub Criteria
<30	30 - 34	34 - 38	38 - 44	ug/m ³	PM _{2.5}
<73	73 - 89	89 - 96	96 - 104	ug/m ³	PM ₁₀
<1.9	1.9 - 2.6	2.6 - 3.2	>3.2	ppm	CO
<21	20 - 21	21 - 23	23 - 25	ppb	O ₃
<120	110 - 120	120 - 146	146 - 200	ppb	NO _x
<10	10 - 12	12 - 14.3	14.4 - 17.7	ppb	SO ₂

وزن دهی لایه‌ها

هر پارامتر (زیرمعیار) اثر متفاوتی نسبت به دیگر زیرمعیارها در جانمایی حسگرها دارد؛ برای اینکه میزان اثرگذاری و یا وزن آنها به دست آید، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تکنیک تحلیل شبکه (ANP^۱) استفاده شد. با اجرای این تکنیک در نرم‌افزار Super decision و مقایسه‌های دوه‌دو بین زیرمعیارها و تشکیل ماتریس مقایسات زوجی، وزن هر زیرمعیار به دست آمد (Gurram, Bulusu & Kinthada, 2015). به‌گونه‌ای که پرسشنامه تهیه شد و در اختیار خبرگان قرار گرفت. حجم پرسشنامه‌ها با فرمول کوکران به‌دست آمد. برای پایایی پرسشنامه‌ها از ضریب آلفای کرونباخ استفاده گردید که مقدار ضریب $a = 0.82$ به‌دست آمد. سپس نتایج پرسشنامه‌ها وارد نرم‌افزار شده و با تکنیک ANP وزن هر زیرمعیار به‌دست آمد.

سپس وزن به‌دست‌آمده برای هر زیرمعیار، در نرم‌افزار ArcGIS pro با دستور Raster Calculator، در لایه‌ی مربوط به آن زیرمعیار ضرب شد و نقشه‌ی فازی شده‌ی وزن‌دار برای هر زیرمعیار تهیه گردید. نقشه‌ی نهایی هر زیرمعیار، بیان‌گر نقشه‌ی وزن‌دار فازی شده‌ی آن است که در ادامه قابلیت روی‌هم‌گذاری^۲ با سایر زیرمعیارها را برای انتخاب مکان‌های مناسب برای نصب حسگرها فراهم می‌گردد.

ترکیب لایه‌ها

برای تهیه نقشه‌ی نهایی از تناسب اراضی در پهنه شهر تهران برای نصب حسگرها، زیرمعیارها (لایه‌های وزن‌دار شده‌ی فازی) با توابع مختلف فازی AND، OR، SUM، Product، گامای ۰/۹، ۰/۷ و ۰/۵ به تفکیک رویهم‌گذاری شدند؛ به این معنا که هر بار با یکی از این توابع، عملیات رویهم‌گذاری انجام شد، در واقع همه‌ی این توابع تست شدند تا بتوان بهترین عملگر را برای آنها انتخاب کرد.

عملگر OR، حداکثر مقدار عضویت پیکسل را به‌عنوان مقدار عضویت در نقشه‌ی نهایی وارد می‌شود.

عملگر اشتراک فازی AND، حداقل درجه‌ی عضویت پیکسل‌ها را برای نقشه‌ی نهایی در نظر می‌گیرد.

عملگر ضرب فازی Product درجه‌ی عضویت‌های یک موقعیت در نقشه‌های مختلف را در هم ضرب می‌کند.

عملگر جمع SUM، مقدار عضویت نهایی پیکسل‌ها در نقشه‌ی خروجی بزرگ شده، در صورت زیاد بودن ورودی‌ها، به یک میل می‌کند. به‌دلیل بزرگ بودن اوزان موقعیت‌های نهایی اثر این عملگر افزایشی است. رابطه‌ی عملگر فازی حالت کلی عملگرهای ضرب و جمع است و می‌توان با انتخاب صحیح مقدار گامای (۰/۹، ۰/۷ و ۰/۵) پارامترهای کاهش و افزایشی را همزمان تلفیق نموده، به مقادیری در خروجی‌ها دست یافت که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایش‌های افزایشی و کاهش دو عملگر ضرب و جمع فازی می‌باشند (Li et al., 2023).

به‌منظور انتخاب بهترین عملگر فازی برای روی‌هم‌گذاری لایه‌ها، از رگرسیون حداقل مربعات (OLS) استفاده شد (Gu, Yan, Elahi & Cao, 2020). زیرمعیارها به‌عنوان متغیرهای مستقل و لایه‌ی حاصل از هر عملگر روی‌هم‌گذاری به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. ضریب همبستگی آنها با رگرسیون OLS محاسبه شد و عملگری که بیشترین همبستگی را با زیرمعیارها دارد، به‌عنوان عملگر نهایی برای ترکیب لایه‌ها استفاده شد.

شاخص موران

همبستگی فضایی و خودهمبستگی نقش مهمی در مدل‌سازی فضایی دارند. از آنجایی که طیف گسترده‌ای از روش‌های آزمایش و اندازه‌گیری خودهمبستگی فضایی توسعه داده شده است، بسیاری از جغرافی‌دانان مشتاق به استفاده از Moran's I هستند که یکی از خودهمبستگی‌های فضایی معروف است (Gu, Zhou, Sun, Dong & Zhao, 2021). مقدار شاخص جهانی Moran's I در

محدوده +۱ تا -۱ است. این شاخص که نشان دهنده الگوی فضایی است به این صورت تعریف می‌شود که اگر آماره شاخص بزرگ‌تر از صفر باشد الگو دارای خوشه است، اگر صفر به دست آمد داده‌ها پراکنده و اگر کمتر از صفر باشد توزیع تصادفی است (Lu, Yang, Ge & Harris, 2018). در پژوهش حاضر، به منظور بررسی الگوی توزیع مکانی نصب حسگرهای کم‌هزینه آلودگی هوا در شهر تهران که از ترکیب لایه‌ها به دست آمد، از شاخص خودهمبستگی موران در نرم‌افزار ArcGIS pro استفاده شد که معادله آن به صورت رابطه‌های (۱، ۲ و ۳) است:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_i Z_j}{S_0 \sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (1)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (2)$$

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}} \quad (3)$$

که در آن W_{ij} وزن فضایی بین ویژگی i و j را نشان می‌دهد، n تعداد کل ویژگی‌ها است، $Z_i = (X_i - \bar{X})$ و آماره Z استاندارد شاخص موران است.

سپس برای بررسی خوشه‌بندی داده‌ها، از مدل تحلیل لکه‌های داغ (Hotspot) استفاده گردید و با آن، نقشه پیش‌بینی از ترکیب زیرمعیارها تهیه گردید که "نقاط داغ" برای نصب حسگر مناسب است، ولی "نقاط سرد" برای نصب حسگر مناسب نیست. پس از به دست آوردن الگوی خوشه‌بندی، لکه‌های دارای بیشترین امتیاز به نام لکه‌های داغ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. براین اساس، آمار G_i^* برای ویژگی‌ها توسط ابزار تحلیل نقطه داغ در نرم‌افزار GIS تعیین شد. آمار G_i^* با مقایسه مجموع محلی مقدار ویژگی موردنظر و همسایگان آن با مجموع همه مقادیر ویژگی محاسبه می‌شود (Yang, Wang, Zhang, Zhan & Li, 2017). Zscore از آمار G_i^* برای نمرات Z مثبت به دست آمد. Z-score بزرگ‌تر نشان دهنده شدت بیشتر مقادیر بالای خوشه‌بندی است. برای امتیازهای Z منفی، امتیاز Z کوچک‌تر نشان‌دهنده شدت بیشتر و خوشه‌بندی مقادیر کم است (نقطه سرد).

تحلیل حساسیت روابط فضایی

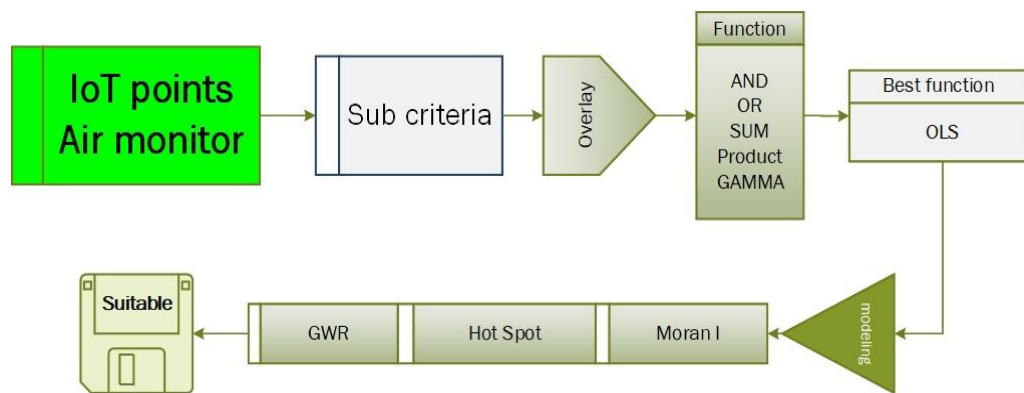
در آخرین بخش از پژوهش حاضر، ارتباط مکانی - فضایی بین متغیرهای مستقل (۱۱ زیرمعیار) با متغیر وابسته (نقشه نهایی حاصل از ترکیب لایه‌ها) با مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی محاسبه گردید. روش تحلیل رگرسیون خطی مبتنی بر یک «فرض جهانی» است، با این فرض که متغیرها در منطقه مورد مطالعه ثابت هستند و با تغییر موقعیت مکانی تغییر نمی‌کنند. با این حال، ناهمگونی متغیرها در همه جای فضای جغرافیایی واقعی وجود دارد. GWR یک روش رگرسیونی برای تخمین ناهمگونی فضایی محلی و بررسی تغییرات مکانی و عوامل محرک مربوط به متغیرها در منطقه مورد مطالعه در مقیاس معین است. این روش به طور گسترده در اقتصاد، جامعه‌شناسی، تحلیل شهری و منطقه‌ای، بوم‌شناسی و محیط‌زیست استفاده شده است (Lu et al., 2018). از آنجایی که ناهمگونی فضایی و تفاوت‌های محلی فضایی اطلاعات تحقیق در مدل GWR مورد بحث قرار می‌گیرد، نقاط تحلیل رگرسیون از منطقه مورد مطالعه استخراج می‌شوند. مدل رگرسیون با توجه به هر موقعیت جغرافیایی برآورد شده است. ضریب رگرسیون فضایی مربوط به موقعیت مکانی به دست می‌آید که از نظر کمی ناهمگونی فضایی رابطه متغیر ناشی از تغییر موقعیت مکانی را منعکس می‌کند. مدل GWR به طور گسترده‌ای برای بررسی تغییرات فضایی سطوح پیوسته با مقدار پارامتر در مقیاس منطقه‌ای استفاده می‌شود (Liu, Sun & Chen, 2017). مدل GWR را می‌توان به صورت رابطه (۴) بیان کرد:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \theta_i) + \sum_{k=1}^n \beta_{1k}(\mu_i, \theta_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

که در آن y_i متغیر وابسته (نقشه نهایی از ترکیب لایه‌ها) است. یازده متغیر مستقل X_{ik} (۱، ...، ۱۱) و β_{ik} پارامترهای رگرسیون محلی هستند که باید تخمین زده شوند. ϵ_i نیز خطای تصادفی است. بنابراین، هر پیکسل در این پژوهش دارای مجموعه‌ای از پارامترهای خاص برای منعکس کردن روابط بین مطلوبیت اراضی تهران برای نصب حسگر و یازده متغیر مستقل است. قانون اول جغرافیای توبلر تأیید می‌کند که هر رابطه‌ای دارای روابط علت و معلولی است، اما عوارض و پدیده‌های مشابه، ارتباط نزدیک‌تری دارند. به طور مشابه، همبستگی بین دو نقطه بیشتر از دو نقطه غیرمجاور است. هنگام استفاده از GWR، تأثیر یک متغیر معین با افزایش فاصله بین دو نقطه کاهش می‌یابد. ضریب تخمین را می‌توان در قالب ماتریس رابطه (۵) محاسبه کرد:

$$\beta_f(\mu_i, \theta_i) = (X^T W(\mu_i, \theta_i) X)^{-1} X^T W(\mu_i, \theta_i) Y \quad (5)$$

پارامترها با فرم ماتریس زیر حل می‌شوند که در آن $\beta_f(\mu_i, \theta_i)$ مقدار تخمینی پارامتر وابسته به موقعیت است و $W(\mu_i, \theta_i)$ نشان دهنده یک ماتریس وزن فضایی $n \times n$ است که عناصر مورب صفر هستند. T عملیات جابه‌جایی ماتریس است. عناصر مورب وزن جغرافیایی داده‌های مشاهده شده را در نقطه نشان می‌دهند. در این پژوهش، یک ماتریس وزن برای نشان دادن اهمیت نسبی بین نقاط شهر تهران انتخاب شد. مقدار وزن یک تابع فاصله-واپاشی است که تابع توزیع گوسی و نرمال است. بنابراین، مدل با متغیرهای مستقل (زیرمعیارها)، در نرم‌افزار ArcGIS با دستور Geographically Weighted regression اجرا شد و ضریب R^2 محلی و معیار AIC برای ارزیابی مدل برازش شده مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مطلوبیت اراضی برای نصب حسگر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی با آزمون تی استیوننت مقایسه گردید.



شکل ۲- دیاگرام روش پژوهش (جانمایی حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوا در تهران)

Fig.2. Diagram of the research method (placement of low-cost sensors for air pollution monitoring in Tehran)

نتایج و بحث

زیرمعیارهای پژوهش با تکنیک تحلیل شبکه، دوه‌دو، مقایسه زوجی شدند و در نهایت وزن فازی هر یک از آنها به دست آمد (جدول ۳). نتایج نشان داد غلظت ذرات معلق گزارش شده بیشترین اهمیت را در انتخاب مکان مناسب برای نصب حسگرها دارند، چون که این ذرات بیان‌گر سطح آلودگی و نقاط بسیار آلوده در شهر هستند و قاعدتاً مناطق آلوده مهم‌ترین مکان برای نصب حسگرها هستند. پس از آن، ایستگاه‌های حمل‌ونقل شهری که شامل پایانه‌ها، ایستگاه‌های اتوبوس و تاکسیرانی در سطح شهر تهران می‌باشد، بیشترین اهمیت را در انتخاب اراضی برای نصب حسگرها دارند. نزدیکی به جایگاه‌های سوخت و بزرگراه‌ها نیز در رتبه‌های سوم و چهارم قرار دارند.

جدول ۳- وزن و درجه عضویت فازی زیرمعیارها در جانمایی حسگرهای کم‌هزینه آلودگی هوا در شهر تهران

Table 3- The weight and fuzzy membership of the sub-criteria in the placement of low-cost air pollution sensors in Tehran.

Fuzzy membership	Sub criteria	زیرمعیار	ردیف
0.107	Near to Highway	نزدیکی به بزرگراه	1
0.139	Near to stations	نزدیکی به ایستگاه حمل‌ونقل	2
0.055	Near to traffic points	نزدیکی به نقاط ترافیکی	3
0.113	Near to Oil station	نزدیکی به جایگاه سوخت	4
0.089	Near to industrial points	نزدیکی به مراکز صنعتی	5
0.170	PM ₁₀	غلظت ذرات معلق PM ₁₀	6
0.151	PM _{2.5}	غلظت ذرات معلق PM _{2.5}	7
0.071	CO	غلظت گاز منوکسید کربن	8
0.036	NO _x	غلظت گاز اکسید نیتروژن	9
0.035	O ₃	غلظت گاز ازن	10
0.034	SO ₂	غلظت گاز دی‌اکسید گوگرد	11

برای هر یک از زیرمعیارها، نقشه‌های رقومی تهیه گردید و همان‌طور که در بخش روش پژوهش بیان شد، وزن به‌دست‌آمده از تحلیل شبکه، در لایه ضرب شد و نقشه وزن‌دار شده فازی برای زیرمعیارها تهیه گردید و در اشکال زیر ارائه شده است. باتوجه به نقشه نهایی زیرمعیار ذرات معلق PM₁₀، اراضی واقع در جنوب و جنوب‌غربی شهر تهران به دلیل غلظت بالای ذرات معلق، برای نصب حسگرهای کم‌هزینه مناسب‌تر از سایر مناطق هستند. نقشه‌های فازی و وزن‌دار شده FANP برای زیرمعیار ذرات معلق PM_{2.5} نیز تهیه شد. باتوجه به اینکه وزن این زیرمعیار ۰/۱۵۱ به‌دست آمد، بیشترین درجه عضویت فازی این زیرمعیار نیز ۰/۱۵۱ است، اما برای PM₁₀ ۰/۱۷۰ بود. بنابراین عضویت زیرمعیار PM₁₀ بیشتر از PM_{2.5} است و تاثیر بیشتری در انتخاب مکان‌های مناسب برای نصب حسگرهای کم‌هزینه دارند. از لحاظ زیرمعیار PM_{2.5}، اراضی واقع در نواحی جنوبی و منطقه ۳ در شمال تهران، برای نصب حسگرها مناسب هستند و بیشترین عضویت فازی را نسبت به سایر مناطق دارند (شکل ۳).

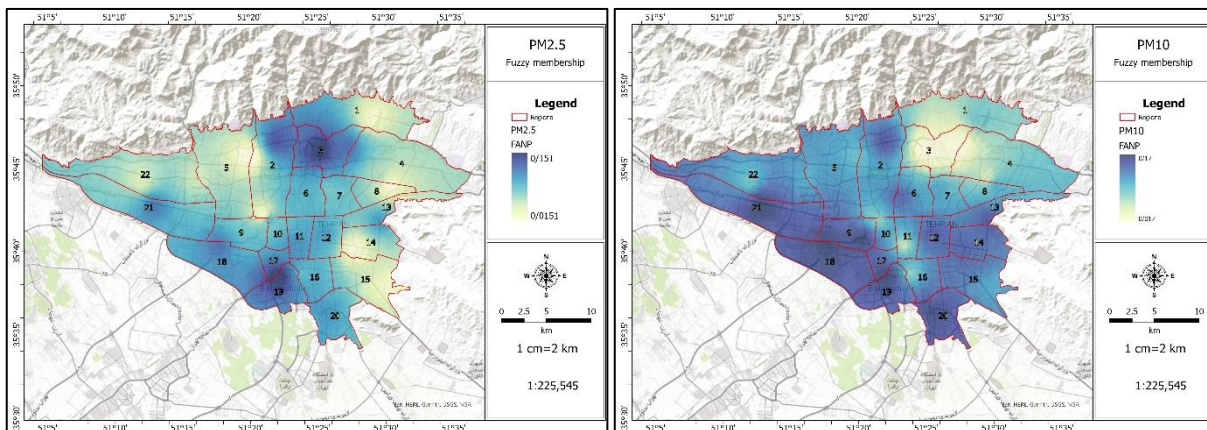
در مناطقی که غلظت گازهای آلاینده زیاد است، اهمیت و نقش فازی آن به یک نزدیک است و مناطقی که غلظت گاز کمتر از سایر مناطق است، اهمیت فازی آن به صفر میل کرده و نقش زیادی در تناسب اراضی برای نصب حسگر ندارند؛ بنابراین نقاط و مناطقی که غلظت آلاینده‌ها زیاد است، مکان مناسبی برای نصب حسگر هستند. این تکنیک برای همه گازها اجرا شد و نقشه هر یک از آنها تهیه شده است. غلظت منوکسید کربن در جنوب‌غربی شهر تهران بیشتر از سایر نواحی است. بیشترین درجه عضویت فازی آن ۰/۰۷۱ است و به این اراضی از لحاظ گاز منوکسید کربن در روی هم‌گذاری، ۰/۰۷۱ اختصاص داده شد، اما برای اراضی که غلظت این گاز کمتر است، وزن ۰/۰۰۷۱ اختصاص داده شد که برای نصب حسگر مناسب نیستند، چون که درجه عضویت آنها بسیار کم است. غلظت گاز ازن در مناطق ۱۵ و ۳ بیش از سایر مناطق است و درجه عضویت فازی و وزن این مناطق برای نصب حسگر بیشتر از سایر مناطق است. حداکثر وزن این زیرمعیار با عضویت ۰/۰۳۵ در همین مناطق آلوده است. تاثیر این گاز در روی هم‌گذاری لایه‌ها برای انتخاب مکان‌های مناسب جهت نصب حسگرها حداکثر ۰/۰۳۵ و حداقل ۰/۰۰۳۵ است (شکل ۴).

غلظت گاز ناکس (اکسید نیتروژن) در مناطق ۱۰ و ۴ بیشتر از سایر مناطق است و با توجه به درجه عضویت ۰/۰۳۶ این گاز، بیشترین عضویت و اهمیت مربوط به همین مناطق است؛ اما در مناطق دیگر که غلظت این گاز پایین است، عضویت ۰/۰۰۳۶

اختصاص داده شده و در رویهم‌گذاری تاثیر زیادی نداشته و امتیاز کمی برای نصب حسگر به این مناطق داده می‌شود. گاز دی-اکسید گوگرد در بین همه زیرمعیارها، کمترین تاثیر را در جانمایی حسگرها دارد و درجه عضویت آن حداکثر ۰/۰۳۴ است و به نقاطی اختصاص دارد که بیشترین غلظت گاز دی‌اکسید گوگرد را دارند که به مناطق ۳ و ۱۶ اختصاص داده شده است (شکل ۵).

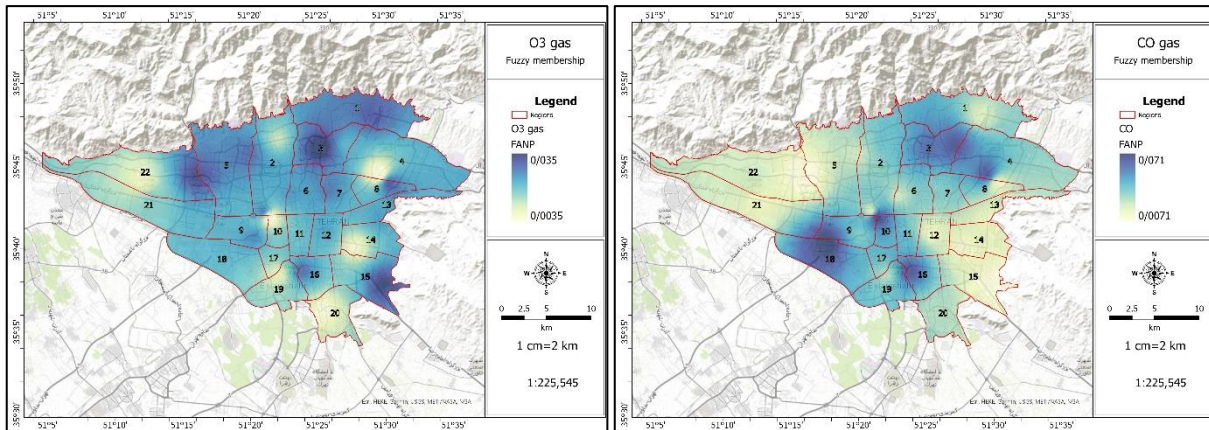
نقاط، ایستگاه‌های حمل‌ونقل هستند که پایانه‌های مسافربری، اتوبوس و ایستگاه تاکسی است. این نقاط، از منابع اصلی آلودگی هوای تهران به شمار می‌روند و غلظت آلاینده‌های هوا در این نقاط بیشتر از سایر نواحی است؛ بنابراین در فاصله نهایتاً ۱۰۰ متری از این نقاط، مکان مناسبی برای نصب حسگرها است؛ اما با فاصله از این نقاط، از اهمیت اراضی برای نصب حسگر کاسته می‌شود. درجه عضویت این زیرمعیار ۰/۱۳۹ است و به همین مقدار در رویهم‌گذاری لایه‌ها برای انتخاب مکان مناسب تاثیرگذار است، اما مناطقی که از لحاظ این زیرمعیار دارای ۰/۱۳۹ هستند، مکان مناسبی نخواهند بود. بزرگراه‌های شهری نیز یکی از منابع اولیه و اصلی در تولید آلاینده‌های هوا به‌ویژه ذرات معلق و گازهای منوکسید کربن و ناکس هستند. تا فاصله ۱۰۰ متری از این بزرگراه‌ها، اراضی مستعد نصب حسگر هستند، ولی با افزایش فاصله، از ارزش زمین برای نصب حسگر کاسته می‌شود. بیشترین درجه عضویت این زیرمعیار ۰/۱۰۷ است که به اراضی نزدیک به بزرگراه‌ها اختصاص داده شده است (شکل ۶).

جایگاه سوخت یکی دیگر از منابع اصلی تولید آلاینده‌های هوای شهری است. تا فاصله ۱۵۰ متری و حتی ۵۰۰ متری از این جایگاه‌های سوخت، مکان مناسبی برای نصب حسگرها است، اما با افزایش فاصله، مکان اهمیت خود را برای نصب حسگر آلودگی هوا از دست می‌دهد. بنابراین اراضی نزدیک به این جایگاه‌ها با عضویت فازی ۰/۱۱۳، اراضی مناسب برای نصب حسگر هستند و به همین مقدار در نتیجه نهایی (مکان منتخب) تاثیرگذار است. اگرچه مراکز صنعتی وزن و اهمیت کمتری نسبت به جایگاه‌های سوخت، ایستگاه‌های حمل و نقل و بزرگراه‌ها در آلودگی هوای شهر تهران دارند، اما سهم آنها در تولید آلاینده‌های هوا قابل انکار نیست و در تولید ازن و دی‌اکسید گوگرد و به‌ویژه ذرات معلق بسیار زیاد است. بنابراین بایستی در اراضی نزدیک به صنایع، غلظت آلاینده‌ها پایش شود. حداکثر درجه عضویت این زیرمعیار ۰/۰۸۹ است که به اراضی صنعتی و نزدیک به این نقاط صنعتی اختصاص دارد؛ ولی با فاصله از آن، ارزش اراضی نیز کاهش می‌یابد (شکل ۷).



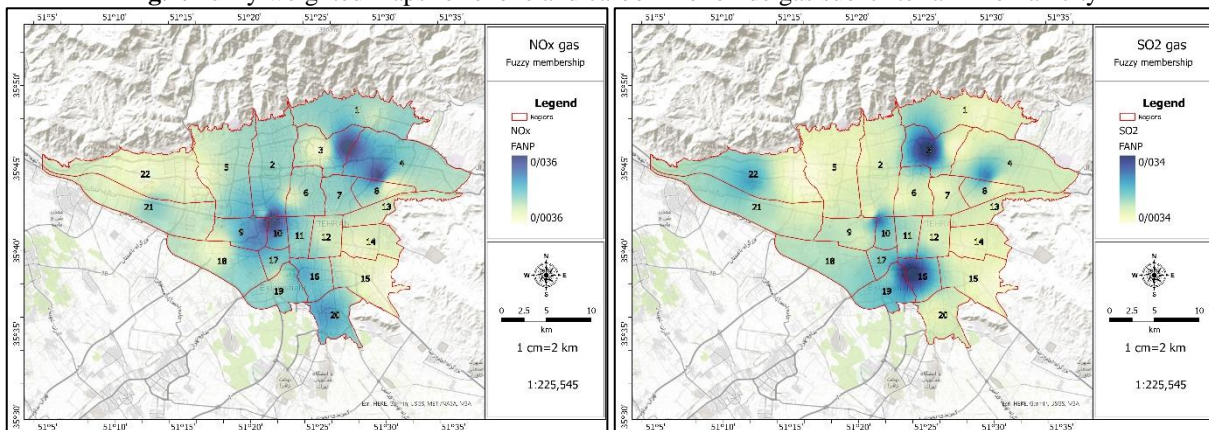
شکل ۳- نقشه‌های وزن دار شده فازی برای زیرمعیارهای $PM_{10-2.5}$ در شهر تهران

Fig.3. Fuzzy weighted maps for $PM_{10-2.5}$ sub-criteria in Tehran city



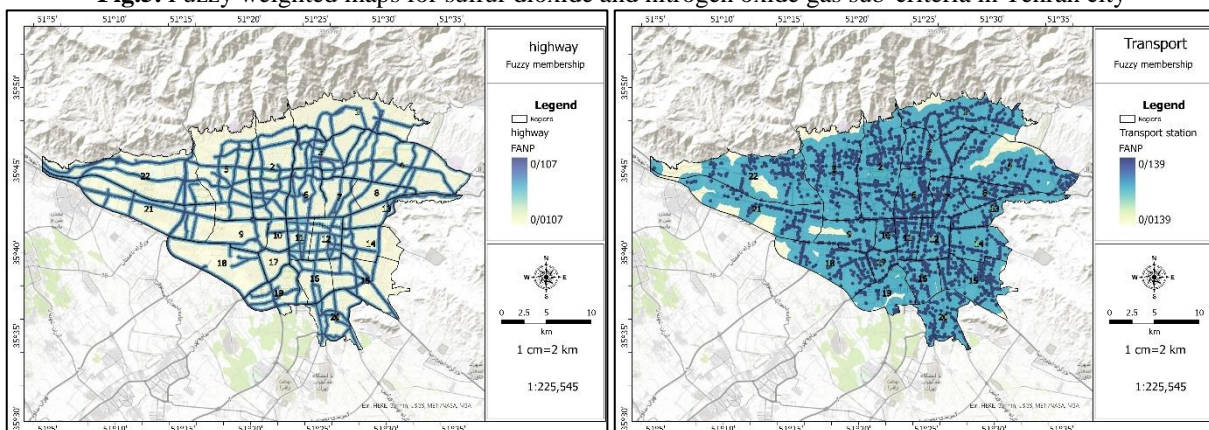
شکل ۴- نقشه های وزن دار شده فازی برای زیرمعیارهای گاز ازن و مونوکسید کربن در شهر تهران

Fig.4. Fuzzy weighted maps for ozone and carbon monoxide gas sub-criteria in Tehran city



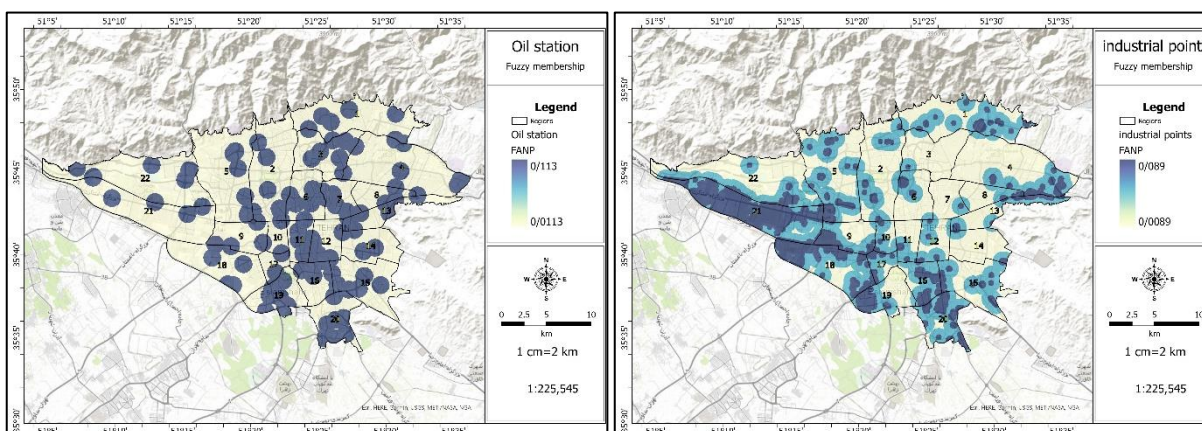
شکل ۵- نقشه های وزن دار شده فازی برای زیرمعیارهای گاز دی اکسید گوگرد و اکسید نیتروژن در شهر تهران

Fig.5. Fuzzy weighted maps for sulfur dioxide and nitrogen oxide gas sub-criteria in Tehran city



شکل ۶- نقشه های وزن دار شده فازی برای زیرمعیارهای نزدیکی به بزرگراه و ایستگاه های حمل و نقل در شهر تهران

Fig.6. Fuzzy weighted maps for the sub-criteria of proximity to the highway and transportation stations in Tehran



شکل ۷- نقشه های وزن دار شده فازی برای زیرمعیارهای نزدیکی به مکان صنعتی و جایگاه سوخت در شهر تهران
Fig.7. Fuzzy weighted maps for sub-criteria of proximity to industrial place and fuel station in Tehran city

همبستگی متغیرها

برای هر یک از عملگرهای فازی رویهم گذاری که شامل AND، OR، SUM، Product، گامای ۰/۹، ۰/۷ و ۰/۵ می باشند، یک نقشه روی هم گذاری شده، تهیه گردید. سپس با رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS)، ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته که نقشه های مربوط به هر عملگر است، بررسی شد (جدول ۴ و ۵). نتایج نشان می دهد که تابع SUM بر اساس معیارهای ارزیابی ضرایب رگرسیونی و ضریب تعیین، بهترین عملکرد را نسبت به سایر توابع فازی در همبستگی بین نقشه نهایی با زیرمعیارهای پژوهش دارد. نقشه خروجی عملگر فازی SUM حاصل بزرگ شدن پیکسل هایی با درجه عضویت بالا است. اراضی که عضویت بالایی در زیرمعیارها داشتند، در این عملگر به سمت یک میل کرده اند و مکان های مناسب برای نصب حسگر هستند و بیشترین درجه عضویت فازی را به خود اختصاص داده اند که در شکل ۸ نقشه نهایی از توزیع فضایی تناسب اراضی از این عملگر نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین نقشه نهایی عملگر SUM و زیرمعیارهای پژوهش بیانگر ارتباط معنی دار بین تمام زیرمعیارها با نقشه نهایی که نقشه حاصل از عملگر SUM می باشد، است. بنابراین بیشترین همبستگی معنی دار در این عملگر نشان داده شده است. همه زیرمعیارها می توانند وارد مدل سازی در مراحل بعدی شوند. پس نقشه نهایی SUM می تواند انتخاب نهایی برای نقشه رویهم گذاری شده برای ارزیابی تناسب اراضی شهر تهران برای جانمایی حسگرهای پایش آلودگی هوا باشد. بنابراین در این مرحله، نقشه رویهم گذاری دیگر توابع فازی حذف شده و از این مرحله به بعد، کنار گذاشته می شوند و فقط نقشه روی هم گذاری شده با تابع SUM وارد مدل سازی مراحل بعدی شد.

جدول ۴- همبستگی عملگرهای فازی با زیرمعیارهای پژوهش

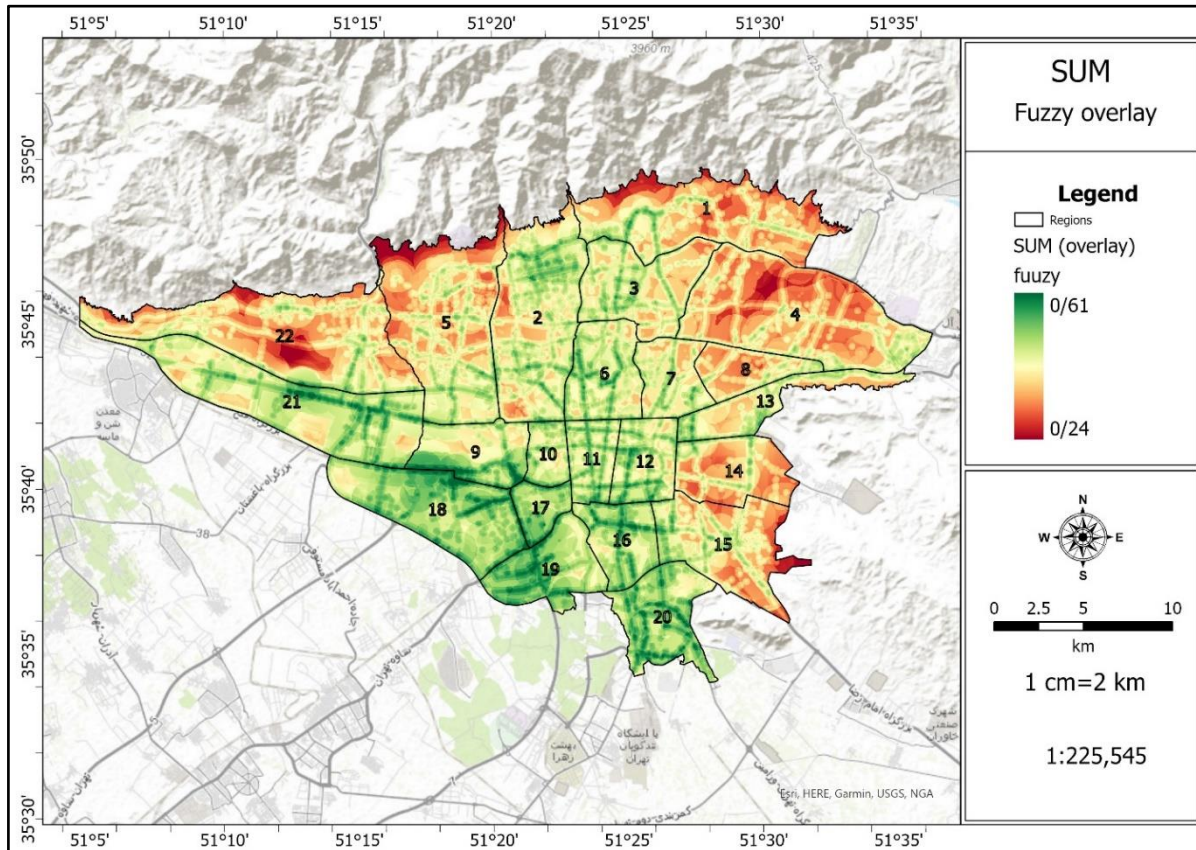
Table 4- Correlation of fuzzy operators with research sub-criteria

GAMMA 0.9	GAMMA 0.7	GAMMA 0.5	Product	OR	AND	SUM	Parameters
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.058	0.000*	0.000*	SO ₂
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.779	0.000*	0.000*	O ₃
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	NO _x
0.000*	0.000*	0.001*	0.698	0.067	0.315	0.000*	CO
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	PM ₁₀
0.091	0.121	0.236	0.209	0.000*	0.000*	0.000*	PM _{2.5}
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.002*	0.112	0.000*	Industrial points
							مراکز صنعتی
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.007*	-0.933	0.000*	Highway
							بزرگراه
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.487	0.390	0.000*	Oil station
							جایگاه سوخت
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.255	0.000*	Station
							پایانه
0.000*	0.000*	0.000*	0.019*	0.009*	0.017*	0.000*	Traffic points
							نقاط ترافیکی

جدول ۵- ارزیابی عملگرهای فازی با ضرایب رگرسیونی

Table 5- Evaluation of fuzzy operators with regression coefficients

آماره Jarque-Bera	R-Squared	AICc	تابع Function
1379	0.997	-5744	SUM
774	0.609	-6298	AND
15	0.730	-3962	OR
711	0.361	-42941	Product
24301	0.727	-22734	GAMMA 0.5
2590	0.872	-14886	GAMMA 0.7
87	0.971	-7785	GAMMA 0.9



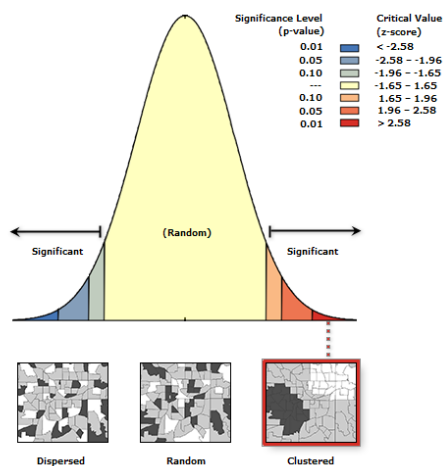
شکل ۸- نقشه ترکیب زیرمعیارها با عملگر فازی SUM در شهر تهران

Fig.8. The map of the combination of sub-criteria with the SUM fuzzy operator in Tehran

الگوی فضایی تناسب اراضی

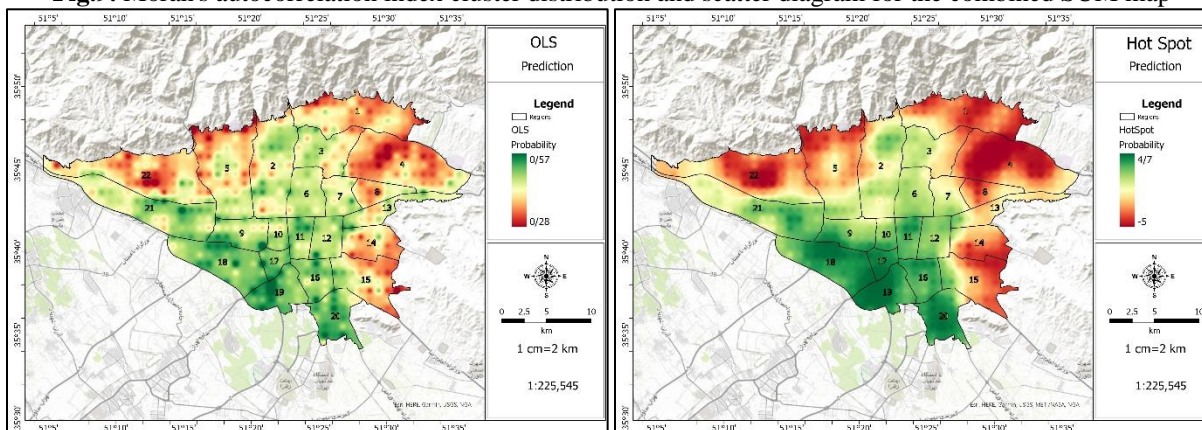
نتیجه بررسی الگوی پراکنش فضایی در تناسب اراضی برای جانمایی حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوای شهر تهران که از آمار فضایی (مدل موران و هات اسپات) به دست آمد، به این شرح می‌باشد که شاخص موران $0/532$ به دست آمده است و نشان می‌دهد که داده‌ها دارای خودهمبستگی فضایی بوده و الگوی خوشه‌بندی دارند. مقدار Z و پایین بودن p -value ($0/000$) نشان دهنده تأیید الگوی خوشه‌بندی تناسب اراضی برای نصب حسگرها است (شکل ۹).

نتایج حاصل از خودهمبستگی موران و هات اسپات که بیانگر خوشه‌ای بودن نقاط مناسب و نامناسب برای نصب حسگرها است، در مدل رگرسیونی OLS، درجه عضویت فازی نقشه نهایی را بر اساس مدل موران به تصویر کشیده است که نشان می‌دهد بیشترین درجه عضویت فازی (نواحی جنوبی و جنوب‌غربی تهران) $0/57$ است که با نتایج نقشه نهایی SUM که $0/60$ به دست آمد، تفاوت چندانی ندارد و بیانگر خوشه‌بندی قابل اعتماد مدل موران و هات‌اسپات برای نقاط مناسب و نامناسب جهت نصب حسگرها است. به‌طور کلی، مدل هات‌اسپات با اعتماد ۹۹ درصد نشان می‌دهد که اراضی جنوبی و جنوب‌غربی با توجه به زیرمعیارهای پژوهش، برای نصب حسگرها مناسب‌اند (شکل ۱۰). نتایج محاسبات بر نتایج مدل‌های آمار فضایی که خوشه‌بندی فضایی را مشخص کرده‌اند، صحت می‌گذارد.



شکل ۹- نمودار توزیع و پراکندگی خوشه‌ای شاخص خودهمبستگی موران برای نقشه ترکیبی SUM

Fig.9. Moran's autocorrelation index cluster distribution and scatter diagram for the combined SUM map



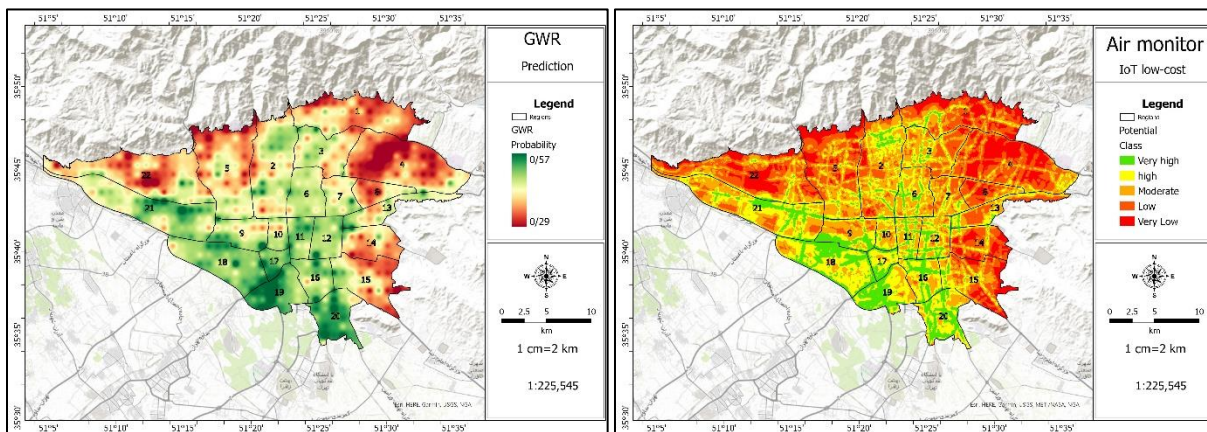
شکل ۱۰- نقشه لکه های سرد و داغ از مطلوبیت اراضی برای نصب حسگر با هات اسپات و مدل OLS

Fig.10. Map of cold and hot spots of land suitability for sensor installation with hotspot and OLS model

الگوی رابطه فضایی

به منظور تحلیل حساسیت فضایی در ارتباط مستقیم و دقیق بین زیرمعیارهای پژوهش و نقشه نهایی از مطلوبیت اراضی، از رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR) استفاده شد. ضرایب ارزیابی مدل با متغیرهای مستقل و یک متغیر وابسته، بیانگر اعتبار و صحت مدل برای پیش‌بینی مطلوبیت اراضی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه است. مطلوبیت اراضی با روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی توسط متغیرهای مستقل پیش‌بینی شد و نقشه پراکنش فضایی مطلوبیت اراضی در شهر تهران به صورت مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با مدل ترسیم گردید که نشان می‌دهد مطلوبیت اراضی در مدل پیش‌بینی شده با رگرسیون وزن دار جغرافیایی توسط متغیرهای مستقل درست پیش‌بینی شده است (شکل ۱۱). معیار AIC و ضریب تعیین (R^2) برای مدل به ترتیب ۴۴۸۴ و ۰/۹۸ به دست آمد که بیانگر قابل اعتماد بودن نتایج مدل است. بنابراین مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی توانسته است با متغیرهای مستقل، مطلوبیت اراضی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه در شهر تهران را نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای پیش‌بینی کند.

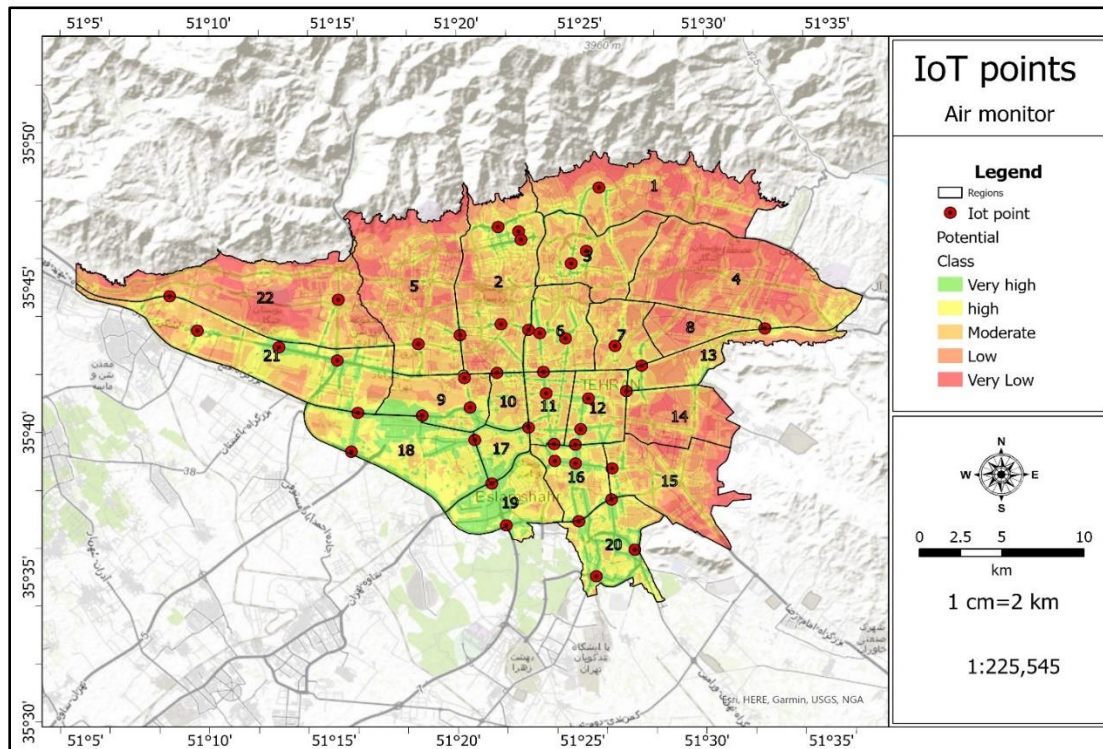
پس از بررسی زیرمعیارهای پژوهش و تولید نقشه‌های روی هم‌گذاری شده با استفاده از عملگرهای فازی و همچنین پیش‌بینی نقشه نهایی با مدل‌های رگرسیونی OLS و GWR نقشه مشاهداتی SUM قابل‌اعتماد است و طبقه‌بندی مطلوبیت اراضی شهر تهران برای نصب حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوا انجام شده است. می‌توان گفت که تقریباً ۱۶ هکتار از اراضی شهر تهران به‌صورت پراکنده در مناطق مرکزی، جنوبی، جنوب‌غربی و حتی در مواردی در شمال شهر تهران در نزدیکی بزرگراه‌ها، جایگاه سوخت، پایانه‌ها و ایستگاه‌های حمل و نقل و مراکز صنعتی که سطح آلودگی هوای بالایی دارند، اراضی مناسبی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه جهت پایش آلاینده‌های هوا هستند (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- نقشه‌های پیش‌بینی شده از مطلوبیت اراضی برای نصب حسگر با رگرسیون وزن دار جغرافیایی

Fig.11. Predicted maps of land suitability for sensor installation with geographic weighted regression

با بررسی نقشه‌های نهایی و همچنین زیرمعیارهای پژوهش و مشاهدات میدانی انجام شده، نقاطی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه جهت پایش آلودگی هوای تهران برداشت و نهایی شده است. تعداد ۴۴ نقطه برای نصب حسگرها مناسب است که نقشه پراکنش آنها در سطح شهر تهران در شکل ۱۲ آورده شده است. همچنین در جدول ۶، مکان دقیق این نقاط مطلوب تهیه شده است. نقشه نهایی نشان داد که حدود ۱۳ درصد از اراضی شهر تهران برای نصب حسگرها کاملاً مناسب هستند. این اراضی مطلوب دارای ویژگی‌هایی هستند که شامل: (۱) غلظت بالای ذرات معلق و گازهای آلاینده و (۲) نزدیک بودن به منابع آلودگی مانند سیستم‌های حمل‌ونقل شهری، جایگاه سوخت و مراکز صنعتی. هرچه به منابع آلودگی نزدیک‌تر باشیم، غلظت آلاینده‌های هوا نیز افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که تراکم مراکز صنعتی و بزرگراه‌ها، پایانه‌های اتوبوسرانی و تاکسی‌رانی در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی شهر تهران بسیار زیاد است و غلظت آلاینده‌های هوا به‌ویژه ذرات معلق در این مناطق نیز بالاتر از سایر مناطق شهر تهران است. البته الگوی باد نیز در پراکنش و توزیع فضایی غلظت آلاینده‌ها نقش غیرقابل‌انکاری دارد و جریان‌های افقی و عمودی هوا منجر به پخش آلاینده‌ها در مسیرهای خاصی می‌شود. در این پژوهش با توجه به اینکه غلظت هر یک از آلاینده‌ها هوا در پهنه شهر تهران از ایستگاه‌های پایش مرجع به دست آمده است، پس نقش الگوهای باد نیز در نظر گرفته شده است، چون که غلظت‌های به‌دست آمده برای هر نوع آلاینده، حاصل از خروجی آلاینده‌ها از منابع انتشار و سپس پخش و پراکنش آنها تحت تاثیر الگوهای باد و جریان‌های جوی است. پس می‌توان به این نتیجه رسید که نقشه‌های تهیه شده از غلظت آلاینده‌ها در این پژوهش، علاوه بر اینکه منابع آلاینده را در بر گرفته است، بلکه نقش شرایط جوی و الگوهای باد را نیز در نظر گرفته است.



شکل ۱۲- نقاط پیشنهادی برای نصب حسگرهای کم هزینه برای پایش آلودگی هوای شهر تهران

Fig.12. Suggested points for installing low-cost sensors to monitor air pollution in Tehran

برای پایش آلودگی هوای شهری، بایستی نقاطی پایش شوند که سطح آلودگی آنها زیاد است و خطر آلودگی محیط‌زیست شهری، تشدید روند تغییر اقلیم، گرمایش جهانی و همچنین به‌خطر افتادن سلامت انسان و دیگر اجزای اکوسیستم در این نواحی زیاد است. به همین دلیل پژوهشگران پایش آلاینده‌ها را در نقاطی انجام می‌دهند که سطح آلودگی هوا بسیار زیاد است (Xie et al., 2017; Snyder et al., 2013). در این پژوهش نیز پیرو پژوهش‌های پیشین، مشاهدات میدانی و مصاحبه با کارشناسان و متخصصین علوم مهندسی محیط‌زیست، بیشترین امتیاز فازی برای نقاطی داده شد که سطح آلودگی آنها بیشتر از سایر مناطق است. مهم‌ترین منابع آلودگی هوای شهری، سامانه حمل‌ونقل است که باعث ایجاد شرایطی می‌شود که منجر به تولید و انتشار آلاینده‌ها می‌شوند. سامانه حمل‌ونقل شهری تنها به حرکت خودروها ختم نمی‌شود، بلکه ایستگاه‌های اتوبوس‌رانی، متروها، ایستگاه تاکسی، پایانه‌های مسافری، بزرگراه، آزادراه، بلوار و خیابان‌های شهری، نقاط توقف و پُترافیک و همچنین احداث جایگاه سوخت، همگی عضوی از این سامانه محسوب می‌شوند (Abdallah, 2023). هر یک از این مجموعه‌ها به‌عنوان نقاطی محسوب می‌شوند که آلودگی هوا ایجاد می‌کنند، اما منبع تولید آلاینده یکی است، که همان خودروهایی است که از سوخت‌های فسیلی برای احتراق موتورهای داخلی خود استفاده می‌کنند. این ماشین‌های مکانیکی که دارای موتور احتراق داخلی هستند به چند دسته تقسیم می‌شوند که مهم‌ترین آنها خودروهای سواری سبک، خودروهای مسافری، کامیون‌های باری سبک و سنگین، اتوبوس و موتورسیکلت است.

جدول ۶- محل نصب حسگرهای کم هزینه پایش آلودگی هوا در تهران

Table 6- Installation location of low-cost air pollution monitoring sensors in Tehran

مکان نصب Location	منطقه Region	مکان نصب Location	منطقه Region
بزرگراه چمران، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران Chamran Highway, Faculty of Management, University of Tehran	2	بزرگراه آوینی، لبه بوستان گودرزی Avini Highway, edge of Goodarzi Park	20
تقاطع بزرگراه یادگار امام، بلوار پیام Intersection of Yadgar Imam Highway, Payam Boulevard	2	تقاطع بزرگراه آوینی و بزرگراه امام علی (ع) Intersection of Avini Highway and Imam Ali Highway	20
میدان کاج Kaj Square	2	تقاطع بزرگراه آزادگان و بزرگراه شهید رجایی Intersection of Azadegan Highway and Shahid Rajaei Highway	20
تقاطع بزرگراه هاشمی رفسنجانی و بلوار سعادت‌آباد Intersection of Hashemi Rafsanjani Highway and Saadatabad Boulevard	2	تقاطع بزرگراه آزادگان و فدائیان اسلام Intersection of Azadegan and Fedayan Islam Highways	20
پل بعثت Besat Bridge	15	تقاطع بزرگراه آزادگان و بزرگراه کاظمی Intersection of Azadegan Highway and Kazemi Highway	19
پمپ‌بنزین میدان بهمن Bahman Square Gas Station	16	تقاطع بزرگراه کاظمی و بزرگراه چراغی Kazemi Highway and Cheraghi Highway Intersection	17
ترمینال جنوب تهران Tehran South Terminal	16	تقاطع بزرگراه آیت‌الله سعیدی و بلوار معلم Intersection of Ayatollah Saedi Highway and Moallem Boulevard	17
میدان راه‌آهن Railway Square	11	تقاطع بزرگراه نواب و خیابان قزوین Intersection of Navab Highway and Qazvin Street	17
میدان حر Hor square	11	تقاطع بزرگراه آزادگان و بلوار خلیج فارس Intersection of Azadegan Highway and Persian Gulf Boulevard	18
میدان انقلاب Enghelab square	6	تقاطع بزرگراه فتح و بلوار خلیج فارس The intersection of Fath Highway and Persian Gulf Boulevard	18
دانشکده اقتصاد دانشگاه تهران Faculty of Economics, University of Tehran	6	تقاطع بزرگراه فتح و ۲۵ متری زرنند (شرکت پگاه) The intersection of Fath Highway and 25 meters from Zarand (Pegah Company)	9
میدان جهاد Jahad square	6	میدان فتح Fath square	9
تقاطع خیابان شوش - خیابان تختی Intersection of Shush Street - Takhti Street	12	میدان آزادی Azadi square	9
میدان مولوی Molavi square	12	تقاطع بزرگراه آیت‌الله مهدوی کنی و کنارگذر لشکری Intersection of Ayatollah Mahdavi Kani Highway and Lashkari Bypass	21
متروی امام خمینی Imam Khomeini Metro	12	بزرگراه لشکری، روبه‌روی تعویض پلاک چیتگر Lashkari Highway, opposite Chitgar license plate exchange	21
میدان شهیدا Shohada square	12	تقاطع بزرگراه لشکری و بلوار کرمان خودرو Intersection of Lashkari Highway and Kerman Khodro Boulevard	21
بوستان امام علی - کنارگذر امام علی Imam Ali Park - Imam Ali Sidewalk	13	پمپ‌بنزین وردآورد Vardavard Gas Station	22
بیمارستان خانواده ارتش - پمپ بنزین Army Family Hospital - Gas Station	7	پمپ‌بنزین کوهک Kohak Gas Station	22
تقاطع بزرگراه یاسینی و شهید سلیمانی (پمپ‌بنزین) Intersection of Yasini and Shahid Soleimani Highways (gas station)	4	تقاطع شیخ فضل‌الله نوری و بزرگراه ستاری Sheikh Fazlullah Nouri Intersection and Sattari Highway	5
بیمارستان ولیعصر Valiasr Hospital	3	ایستگاه تاکسی بوستان استقلال Bustan Esteghlal Taxi Station	5
بلوار ارتش غربی - جایگاه اختصاص ۱۴۷ تهران West Army Boulevard - Dedicated Stand 147, Tehran	3	تقاطع یادگار امام و خیابان آزادی Intersection of Yadgar Imam and Azadi Street	10

احتراق سوخت (بنزین، گازوئیل و گاز مایع) در موتورهای داخلی این خودروها موجب انتشار آلاینده‌های هوا مانند اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، منوکسید کربن و ذرات معلق می‌شود که در ادامه آلاینده‌های ثانویه مانند ازن و PAN نیز حاصل تجزیه شیمیایی و ترکیب آلاینده‌های اولیه با اتمسفر می‌باشد (Ashok, Kumar, Jacob & Vignesh, 2022). بنابراین پایانه‌های حمل‌ونقل شهری، یکی از منابع انتشار آلاینده‌های هوا است که نتایج این پژوهش نیز نشان داد که در پایانه‌ها نیز غلظت آلاینده‌های هوا بیشتر از سایر نقاط است و این مراکز و پایانه‌ها می‌تواند به عنوان مکانی برای نصب حسگرها در نظر گرفته شود (Zarrar & Dyo, 2023). علاوه بر سیستم حمل‌ونقل شهری، مراکز صنعتی که عمدتاً در حلقه انتهایی شهر مستقر شده‌اند، یکی دیگر از منابع تولید آلاینده‌های هوا هستند. اگر مراکز صنعتی دارای دودکش باشند، آلاینده‌های زیادی وارد اتمسفر و هوای شهری خواهند کرد (Liu et al., 2021). نیروگاه‌های حرارتی برق یکی دیگر از مهم‌ترین منابع تولید آلاینده‌های هوا هستند، چون که در این نیروگاه‌ها، از سوخت‌های فسیلی (گاز و مازوت) برای تولید بخار و توربین‌ها استفاده می‌شود و موجب انتشار حجم زیادی از آلاینده‌ها به هوای شهری می‌شوند. متأسفانه در شهر تهران، مراکز صنعتی در غرب و جنوب غربی شهر مستقر شده‌اند و علاوه بر این، مراکز صنعتی متعددی نیز در مابین مگالاپلیس تهران - کرج و شهرهای اقماری غرب آن احداث شده است که باتوجه به مسیر بادهای غالب غربی در تهران، حجم زیادی از آلاینده‌ها وارد هوای شهری تهران می‌شوند. در اواخر پاییز و زمستان با تشدید وارونگی‌های دمایی (اینورژن)، غلظت این آلاینده‌ها به شدت افزایش یافته و خطر سرطان‌زایی را بسیار تشدید می‌کند؛ بنابراین منابع اصلی انتشار آلاینده‌های هوای شهر تهران، سیستم حمل‌ونقل شهری و مراکز صنعتی هستند که حجم زیادی آلاینده وارد اتمسفر شهری تهران می‌کنند.

نخستین گام برای مدیریت آلودگی هوای شهری توسط سازمان‌های نظارتی، پایش غلظت آلاینده‌های هوا است (Gulia, Nagendra, Khare & Khanna, 2015). به همین دلیل موضوع پایش به یکی از مسائل مهم مدیریت محیط‌زیست شهری تبدیل شده است. در شهرهای مهم جهان، علاوه بر مراکز پایش مرجع، پایش آلودگی هوا از طریق حسگرهای کم‌هزینه بر پایه اینترنت اشیا انجام می‌شود که بسیار کم‌هزینه بوده و قابلیت انعطاف‌پذیری برای سازگاری برای شرایط منطقه‌ای را دارد (Taştan, 2022). اما مکان نصب این پکیج‌های هوشمند و برخط در گام نخست قرار دارد. اینکه حسگرها کجا و به چه تعداد در یک شهر نصب شوند، یکی از مسائل مهمی است که این پژوهش در راستای این موضوع در شهر تهران انجام شد. پارامترهایی وجود دارند که برای انتخاب مکان مناسب برای نصب حسگر تأثیرگذارند. غلظت آلاینده‌های هوا و نزدیکی به منابع آلوده کننده هوا از مهم‌ترین پارامترها هستند که در این مطالعه نیز از آنها برای انتخاب نقاط مناسب برای نصب حسگرهای پایش آلودگی هوا در شهر تهران استفاده شد. نتایج نشان داد که غلظت ذرات معلق و نزدیک بودن به پایانه‌های مسافری که تراکم اتوبوس‌ها، تاکسی و خودروهای باری و سواری در آنها بسیار زیاد است، بیشترین اهمیت را در انتخاب مکان مناسب برای نصب حسگرها دارند که در دیگر مطالعات نیز غلظت ذرات معلق به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته شده است. نقاطی که سطح آلودگی زیاد بوده و غلظت ذرات معلق نیز بالا است، خطر تخریب محیط‌زیست و به خطر افتادن سلامت انسان را دارد. اما مناطقی که سطح آلودگی کم بوده و تأثیر زیادی بر محیط‌زیست شهری ندارد، نیاز چندانی به پایش آلاینده‌های هوا ندارد (Aamer, Mumtaz, Anwar & Poslad, 2018). به همین دلیل در این پژوهش، مکان‌هایی که آلودگی آنها به‌ویژه ذرات معلق زیاد است و به منابع آلودگی نزدیک هستند، امتیاز بالایی داده شد و برای نصب حسگرهای پایش انتخاب شدند.

روش‌های زمین‌آمار خودهمبستگی فضایی برای استخراج خوشه‌های خودهمبسته مشاهده‌ای استفاده می‌شود و هر خوشه بیشترین همبستگی درون‌گروهی را دارد (Martínez-Minaya, Cameletti, Conesa & Pennino, 2018). شاخص موران و هات‌اسپات مهم‌ترین روش بررسی خودهمبستگی هستند. خوشه‌ها و یا لکه‌ها در این مدل‌ها نشان می‌دهند که این نقاط دارای مقادیر نزدیک

بهم هستند و با خوشه‌های دیگر تفاوت دارند. در این پژوهش از این مدل‌ها برای خوشه‌بندی اراضی مناسب و نامناسب استفاده شد که نشان داد اراضی که دارای غلظت آلودگی زیادی هستند و به منابع آلودگی نزدیک هستند، در خوشه‌های داغ (نقاط مستعد نصب حسگر) قرار گرفته و بیشترین همبستگی در این خوشه مشاهده شد؛ اما در لکه‌های سرد، همبستگی‌های درون لکه منفی بود و نشان می‌دهد که در این لکه‌ها غلظت آلاینده‌ها کم است و از منابع انتشار آلودگی فاصله دارند که باعث شد خودهمبستگی درون خوشه و یا لکه سرد کاهش یابد و برای نصب حسگر مناسب نیستند. این مدل‌های خودهمبستگی فضایی با عدد و فضای جغرافیایی ارتباط دارد که پژوهشگران برای خوشه‌بندی فضایی داده‌های غلظت آلاینده‌ها (Nadian, Mirzaei & Soltani Mohammadi, 2018)، ترافیک شهری (Gedamu, Plank-Wiedenbeck & Wodajo, 2024)، درجه خشکسالی (Azizi & Sadeghi, 2023)، مکان‌یابی پروژه‌ها (Saini, 2024)، شناسایی مناطق پر خطر و کم خطر (Tsui, Derumigny, Peck, Van Timmeren & Wandl, 2022) استفاده می‌کنند.

نتیجه‌گیری

ایستگاه‌های پایش کم‌هزینه که در نقاط شهری واقع شده‌اند، می‌توانند به‌اندازه کافی اطلاعات مربوط به مناطقی که تنوع فضا و آلودگی در آنها قابل توجه است، را ارائه دهند. بدیهی است که استفاده از این ایستگاه‌های پایش آنلاین و کم‌هزینه با در دسترس بودن مانیتورهای ارزان قیمت برای نمایش اطلاعات آن در سطح شهر و یا نصب بر روی پلتفرم‌های موجود امکان‌پذیر است؛ اما اطلاعات حاصل از این رویکرد بایستی به‌درستی ارزیابی و کنترل شود. شبکه این مانیتورها که به‌درستی بر اساس مکان‌های مناسب تعریف شده قرار گرفته‌اند، امکان رسیدگی به پایش کیفیت هوای متراکم فضایی را در سطح شهر فراهم می‌کنند و از مدیریت کیفیت هوای شهری قابل‌اعتمادتر با نصب و نگهداری سبک‌تر اطمینان می‌دهند.

اراضی که حداقل ۲۰۰ متر از منابع آلودگی فاصله دارند و غلظت آلاینده‌ها در آن زیاد نیست، برای نصب حسگر مناسب نیستند و حدود ۲۰، ۲۹ و درصد از آن‌ها به‌ترتیب تقریباً نامناسب، نامناسب و کاملاً نامناسب هستند. می‌توان در ۴۴ نقطه از شهر تهران که مطلوبیت بالایی دارند، پکیج‌های حسگر کم‌هزینه برای پایش آلاینده‌های هوای شهری نصب کرد که عمدتاً در مناطق مرکزی، جنوبی و جنوب‌غربی شهر تهران قرار دارند. هزینه هر پکیج حدود ۹۰۰ دلار است که مجموع هزینه‌ها برای کل شهر حدود ۴۰۰ هزار دلار خواهد بود (معادل بیست میلیارد ریال)؛ در حالی که برای احداث یک ایستگاه پایش معمولی که در سطح شهر موجود است، حدود ۸۰ میلیارد ریال هزینه صرف می‌شود. بنابراین حسگرهای کم‌هزینه بسیار مقرون به‌صرفه هستند. اگرچه پکیج‌ها کم‌هزینه هستند، اما چالش‌هایی وجود دارد که بایستی مورد ارزیابی و تحلیل قرار بگیرند.

(۱) حسگرهای کم‌هزینه نیاز به پردازش دقیق و صحیحی از اطلاعات با استفاده از هوش مصنوعی دارند، اگر خطایی در تولید اطلاعات به وجود آید، قابل‌جبران نیست و اطلاعات نادرست در اختیار سازمان قرار می‌دهد.

(۲) اطلاعات نادرست موجب برنامه‌ریزی اشتباه برای مدیریت آلودگی می‌شود. اگر مدیریت صحیح انجام نشود، محیط‌زیست شهری به خطر می‌افتد.

(۳) سازمان‌های متولی و نظارتی در ایران به‌سختی به حسگرهای اینترنت اشیا اعتماد می‌کنند و شرکت‌های دانش‌بنیان در این زمینه حمایتی نشده‌اند. درحالی‌که ایستگاه‌های موجود دچار نقص فنی می‌شوند و اطلاعات آن ارائه نمی‌شود، ولی بازهم سازمان‌ها به پایش حسگرها اعتماد ندارند.

(۴) رخدادها و بلایای طبیعی و انسانی می‌تواند موجب از کارافتادن و یا خرابی پکیج حسگر شود، بنابراین مدیریت آن نیاز به سرکشی دقیق و با برنامه دارد.

- با وجود چالش‌هایی که در این زمینه وجود دارد، راهکارهای ساده‌ای نیز برای آن قابل تدوین و اجرا است:
- (۱) سازمان متولی بایستی شرکت‌های دانش‌بنیان را تشویق به تولید حسگرها و پکیج‌ها آن کند. تولید حسگرها فناوری پیچیده و یا سختی ندارد و نخبگان کشور قادر به تولید آن در حجم انبوه هستند.
 - (۲) حسگرها در مکان درست نصب شوند و با این کار خطر تخریب و نقص فنی آن به حداقل می‌رسد.
 - (۳) تولید قطعات پکیج به‌ویژه حسگرها توسط شرکت‌های دانش‌بنیان باعث می‌شود تا وابستگی به خارج از بین برود و تعمیر سریع پکیج توسط متخصصین داخلی انجام شود.
 - (۴) تشکیل گروه تخصصی از مهندسين برق، انرژی، محیط‌زیست و عمران شهری می‌تواند به‌راحتی پکیج حسگرهای کم‌هزینه را در سطح شهر تهران راه‌اندازی کنند.

آلاینده‌ترین نقاط بر اساس شش نوع آلاینده هوا می‌تواند مکان مناسبی برای نصب این حسگرها باشد و البته به‌گونه‌ای که کل فضای شهر را پوشش دهد. با اجرای این روش، امکان پایش آلاینده‌های اصلی هوا در لحظه مهیا می‌شود و برنامه‌ریزی برای کنترل آلودگی نیز تسهیل می‌گردد. اگرچه در این پژوهش از عوامل منابع آلودگی و غلظت آلاینده‌های هوا برای جانمایی حسگرها استفاده شد، اما برای این که حسگرهایی در شهر نصب کرد که جنس و نوع ذرات را تفکیک و شناسایی کند، شناخت نوع منابع انتشار حائز اهمیت خواهد بود. بنابراین پیشنهاد می‌گردد که محققین در مطالعات آتی، کاربرد حسگرها در تفکیک ذرات و منابع انتشار آلاینده‌های هوا استفاده نمایند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران و همچنین ایستگاه‌های هواشناسی شهر تهران به‌دلیل در دسترس قرار دادن اطلاعات مربوط به کیفیت هوا و اطلاعات هواشناسی، کمال تشکر و قدردانی دارند.

References

- Aamer, H., Mumtaz, R., Anwar, H., & Poslad, S. (2018). A very low cost, open, wireless, internet of things (iot) air quality monitoring platform. Paper presented at the Proceedings of the 15th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT) (pp. 102-106). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/HONET.2018.8551340>
- Abdallah, T. (2023). *Sustainable mass transit: challenges and opportunities in urban public transportation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-01297-6>
- Ashok, B., Kumar, A. N., Jacob, A., & Vignesh, R. (2022). *Emission formation in IC engines*. In *NOx Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01213-2>
- Azizi, A., & Sadeghi, R. (2023). Spatial Analysis of Migration and Drought in Iran using Hot Spot Analysis and Standardized Precipitation Index. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(2), 81-100. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76710.1230>
- De Vito, S., Esposito, E., Castell, N., Schneider, P., & Bartonova, A. (2020). On the robustness of field calibration for smart air quality monitors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 310, 127869. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127869>
- Dimitriou, K., Stavroulas, I., Grivas, G., Chatzidiakos, C., Kosmopoulos, G., Kazantzidis, A., ... & Gerasopoulos, E. (2023). Intra-and inter-city variability of PM_{2.5} concentrations in Greece as determined with a low-cost sensor network. *Atmospheric Environment*, 301, 119713. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119713>
- Fattoruso, G., Agresta, A., Guarnieri, G., Lanza, B., Buonanno, A., Molinara, M., ... & Di Francia, G. (2015). Optimal sensors placement for flood forecasting modelling. *Procedia Engineering*, 119, 927-936. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.971>
- Ganji, A., Youssefi, O., Xu, J., Mallinen, K., Liloyd, M., Wang, A., & Hatzopoulou, M. (2023). Design, calibration, and testing of a mobile sensor system for air pollution and built environment data collection: The urban scanner platform. *Environmental Pollution*, 317, 120720. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120720>
- Gedamu, W. T., Plank-Wiedenbeck, U., & Wodajo, B. T. (2024). A spatial autocorrelation analysis of road traffic crash by severity using Moran's I spatial statistics: A comparative study of Addis Ababa and Berlin cities. *Accident Analysis & Prevention*, 200, 107535. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107535>
- Gu, H., Yan, W., Elahi, E., & Cao, Y. (2020). Air pollution risks human mental health: an implication of two-stages least squares estimation of interaction effects. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2036-2043. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06612-x>
- Gu, K., Zhou, Y., Sun, H., Dong, F., & Zhao, L. (2021). Spatial distribution and determinants of PM_{2.5} in China's cities: Fresh evidence from IDW and GWR. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08749-6>
- Gulia, S., Nagendra, S. S., Khare, M., & Khanna, I. (2015). Urban air quality management-A review. *Atmospheric Pollution Research*, 6(2), 286-304. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.033>

- Gurram, M. K., Bulusu, L. D., & Kinthada, N. R. (2015). Urban environmental quality assessment at ward level using AHP based GIS multi-criteria modeling—a study on Hyderabad City, India. *Asian Journal of Geoinformatics*, 15(3), 16-29.
- Li, H. Z., Gu, P., Ye, Q., Zimmerman, N., Robinson, E. S., Subramanian, R., ... & Presto, A. A. (2019). Spatially dense air pollutant sampling: Implications of spatial variability on the representativeness of stationary air pollutant monitors. *Atmospheric Environment: X*, 2, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100012>
- Li, Y. M., Khan, M., Khurshid, A., Gulistan, M., Rehman, A. U., Ali, M., ... & Farooque, A. A. (2023). Designing pentapartitioned neutrosophic cubic set aggregation operator-based air pollution decision-making model. *Complex & Intelligent Systems*, 9(5), 4765-4782. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-00971-2>
- Liu, H. J., Sun, Y. N., & Chen, M. H. (2017). Dynamic correlation and causes of urban haze pollution. *China Popul. Resour. Environ*, 27, 74-81. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-1975-8>
- Liu, Y., Ming, T., Peng, C., Wu, Y., Li, W., De Richter, R., & Zhou, N. (2021). Mitigating air pollution strategies based on solar chimneys. *Solar Energy*, 218, 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.021>
- Lu, B., Yang, W., Ge, Y., & Harris, P. (2018). Improvements to the calibration of a geographically weighted regression with parameter-specific distance metrics and bandwidths. *Computers, Environment and Urban Systems*, 71, 41-57. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.012>
- Martínez-Minaya, J., Cameletti, M., Conesa, D., & Pennino, M. G. (2018). Species distribution modeling: a statistical review with focus in spatio-temporal issues. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 3227-3244. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1548-7>
- Miskell, G., Alberti, K., Feenstra, B., Henshaw, G. S., Papapostolou, V., Patel, H., ... & Williams, D. E. (2019). Reliable data from low cost ozone sensors in a hierarchical network. *Atmospheric Environment*, 214, 116870. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116870>
- Nadian, M., Mirzaei, R., & Soltani Mohammadi, S. (2018). Application of Moran's I Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM_{2.5} Pollutant (A case Study: Tehran City). *Journal of Environmental Health Engineering*, 5(3), 197-213. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jehe.5.3.197>
- Saini, I. M. (2024). Spatial Autocorrelation of Tuberculosis Cases in Central Java Province in 2022. *Jurnal Biostatistik, Kependudukan, dan Informatika Kesehatan*, 4(3), 1, 90-99. <http://dx.doi.org/10.20473/jbk.v13i1.2024.90-99>
- Sayahi, T., Butterfield, A., & Kelly, K. E. (2019). Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, 245, 932-940. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.065>
- Schwela, D., Haq, G., Huizenga, C., Han, W. J., Fabian, H., & Ajero, M. (2012). *Urban air pollution in Asian cities: status, challenges and management*. Routledge.
- Shen, H., Hou, W., Zhu, Y., Zheng, S., Ainiwaer, S., Shen, G., ... & Tao, S. (2021). Temporal and spatial variation of PM_{2.5} in indoor air monitored by low-cost sensors. *Science of The Total Environment*, 770, 145304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145304>

- Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S., ... & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369-11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- Sung, Y., Lee, S., Kim, Y., & Park, H. (2019). Development of a smart air quality monitoring system and its operation. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(1), 30-38. <http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2019.13.1.030>
- Tagle, M., Rojas, F., Reyes, F., Vásquez, Y., Hallgren, F., Lindén, J., ... & Oyola, P. (2020). Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3), 171. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>
- Tan, Y., Lipsky, E. M., Saleh, R., Robinson, A. L., & Presto, A. A. (2014). Characterizing the spatial variation of air pollutants and the contributions of high emitting vehicles in Pittsburgh, PA. *Environmental Science & Technology*, 48(24), 14186-14194. <https://doi.org/10.1021/es5034074>
- Taştan, M. (2022). A low-cost air quality monitoring system based on Internet of Things for smart homes. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 14(5), 351-374. <https://doi.org/10.3233/AIS-210458>
- Toscano, D., & Murena, F. (2020). The effect on air quality of lockdown directives to prevent the spread of SARS-CoV-2 pandemic in Campania Region—Italy: indications for a sustainable development. *Sustainability*, 12(14), 5558. <https://doi.org/10.3390/su12145558>
- Tsui, T., Derumigny, A., Peck, D., Van Timmeren, A., & Wandl, A. (2022). Spatial clustering of waste reuse in a circular economy: A spatial autocorrelation analysis on locations of waste reuse in the Netherlands using global and local Moran's I. *Frontiers in Built Environment*, 8, 954642. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.954642>
- UNION, P. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>
- World Health Organization. (2021). *Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report* (No. WHO/EURO: 2013-4101-43860-61757). World Health Organization. Regional Office for Europe. [WHO/EURO:2013-4101-43860-61757](https://doi.org/10.3390/ijgi6120389)
- Xie, X., Semanjski, I., Gautama, S., Tsiligianni, E., Deligiannis, N., Rajan, R. T., ... & Philips, W. (2017). A review of urban air pollution monitoring and exposure assessment methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 389. <https://doi.org/10.3390/ijgi6120389>
- Yang, X., Wang, S., Zhang, W., Zhan, D., & Li, J. (2017). The impact of anthropogenic emissions and meteorological conditions on the spatial variation of ambient SO₂ concentrations: A panel study of 113 Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 584, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.145>
- Zarrar, H., & Dyo, V. (2023). Drive-by air pollution sensing systems: Challenges and future directions. *IEEE Sensors Journal*, 23(19), 23692-23703. <http://dx.doi.org/10.36227/techrxiv.21999125.v2>