Journal of Sustainable City

Online ISSN: 2476-6151

Journal Homepage: www.jscity.ir

Intelligent Multi-Objective Optimization of Urban Waste Collection Routes Using Machine Learning and the NSGA-II Algorithm: A case study of Tabriz, Iran

Masoud Haghlesan [1], Mehrdad Najafi [2], Mohammad Sadegh Jedari Sefidgari [3]

1. (Corresponding Author) *Department of Architecture and Urban Planning, Ilk.C., Islamic Azad University, Ilkhchi, Iran*
Email: ma.haghlesan@iau.ac.ir
2. *Department of Urban Planning, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran*
Email: mehrdad.najafi@iau.ac.ir
3. *Department of Urban Planning, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran*
Email: m.jedari@iau.ac.ir

ARTICLEINFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received:
12 June 2026
Received in revised form:
4 September 2026
Accepted:
2 October 2026
Available online:
5 November 2026

Keywords:
Urban Waste Management,
Route Optimization,
Machine Learning,
NSGA-II Algorithm,
Tabriz.

ABSTRACT

Rapid population growth and the physical expansion of metropolitan areas, efficient urban waste management has become a critical environmental, economic, and administrative challenge. Among its components, the collection and transportation of waste account for a significant portion of operational costs and energy consumption. Inefficient route allocation for waste collection leads to resource misallocation, increased fuel usage, environmental pollution, and disruption in municipal services. This study aims to propose an intelligent and realistic multi-objective framework for optimizing the routing of municipal waste collection fleets in Tabriz, Iran. To achieve this, the urban transportation network was extracted from OpenStreetMap data, with the geographic positions of waste bins and disposal sites precisely identified. A robust database incorporating diverse route allocation scenarios was then compiled to support decision modeling. Using multilayer perceptron neural networks, a predictive model was developed to estimate operational costs, including total distance, travel time, and fuel consumption. Subsequently, the NSGA-II algorithm was applied to simultaneously optimize the three objective functions, generating a set of non-dominated solutions in the form of a Pareto front. Empirical results demonstrated that the proposed neural network model achieved high predictive accuracy (with R^2 values exceeding 0.96 for some metrics), and the use of NSGA-II led to substantial improvements in operational performance: fuel consumption was reduced by up to 43%, collection time by 35%, and total traveled distance by 35%. This research underscores that combining machine learning with evolutionary optimization can offer an effective solution for intelligent and sustainable urban waste management in large cities.

Citation: Haghlesan, M., Najafi, M., & Jedari Sefidgari, M. S. (2026). Intelligent Multi-Objective Optimization of Urban Waste Collection Routes Using Machine Learning and the NSGA-II Algorithm: A case study of Tabriz, Iran. *Journal of Sustainable City*, 9 (3), 59-74.
http://doi.org/10.22034/jsc.2026.528909.1853

© The Author(s)

Publisher: Iranian Geography and Urban Planning Association

Extended Abstract

Introduction

The rapid urbanization and population growth in large metropolitan areas have significantly intensified the challenges associated with urban waste management. Among various components of this system, the collection and transportation of municipal solid waste represent the most complex and costly stages, often accounting for over 60–80% of total waste management expenditures. In cities with dense road networks, scattered waste bins, and multiple disposal centers, inefficient route planning not only increases fuel consumption and operational time but also contributes to traffic congestion, environmental degradation, and a decline in the quality of municipal services.

Traditional approaches to waste collection routing, often based on static rules or manual planning, lack the capacity to address the high levels of complexity, data volume, and dynamic constraints characteristic of modern urban environments. Consequently, there is an urgent need for intelligent, data-driven systems capable of optimizing routes while simultaneously balancing multiple operational and environmental objectives. Advances in artificial intelligence, particularly machine learning and evolutionary optimization algorithms, provide promising tools to support such intelligent decision-making frameworks.

This study seeks to develop and validate an integrated, intelligent routing system for municipal waste collection in the city of Tabriz, Iran. The proposed framework incorporates geospatial modeling of the urban transport network, machine learning-based cost prediction, and multi-objective evolutionary optimization using the NSGA-II algorithm. By leveraging real-world data, the framework aims to provide actionable, efficient, and scalable solutions for urban waste management authorities.

Accordingly, the main objectives of this research are:

1- To construct a predictive machine learning model for estimating operational costs (distance, time, fuel) of waste collection routes;

2- To optimize route allocation using a multi-objective evolutionary algorithm NSGA-II;

3- To evaluate the impact of the proposed approach on improving the efficiency and sustainability of municipal waste collection systems.

The following key research questions guide this study:

- How can machine learning and evolutionary optimization be combined to improve waste collection routing under real urban conditions?
- To what extent can the proposed model reduce operational costs and environmental impacts?
- What types of allocation scenarios emerge on the Pareto front, and how can they support practical decision-making?

Given the spatial complexity, environmental sensitivities, and operational challenges of waste collection in Tabriz, this research addresses an urgent urban issue with potential implications for other cities facing similar conditions. The findings are expected to contribute to the development of smarter, greener, and more sustainable urban service systems.

Methodology

This study focuses on Tabriz, the capital of East Azerbaijan Province in northwestern Iran. As one of Iran's major metropolitan areas, with a population of over 1.5 million, Tabriz is characterized by a complex urban structure, dense fabric, and numerous challenges in the domain of municipal solid waste management. The city's geographical setting, horizontal urban sprawl, presence of historical textures, and scattered residential districts collectively necessitate the optimal design of waste collection routes while accounting for diverse criteria such as distance, time, and fuel consumption.

In this study, the metropolitan area of Tabriz serves as the spatial context for the analysis; however, the analysis is not extended to the entire citywide waste collection network. The data and scenarios examined pertain to a specific operational zone within the municipal waste collection system, which has been selected as a representative case study for evaluating the performance of the proposed model.

Accordingly, performance indicators - such as total distance, operation time, and fuel consumption - herein are interpretable solely within the defined operational scenario and should not be generalized to the entire city of Tabriz.

For the purpose of this study, the transportation network map of Tabriz was extracted from OpenStreetMap (OSM) data. These data include detailed graph information, comprising primary and secondary streets, topographical attributes, legal speed limits, and vehicle navigability across various road segments. The final map, after preprocessing and refinement, served as the graph-based infrastructure for routing modeling. The urban transportation network was extracted and modeled using OSM data via the OSMnx library. To this end, the street network was represented as a directed graph wherein nodes denote intersections and junction points, while edges represent road segments connecting these nodes. The final extracted graph, at the scale of Tabriz's urban street network, comprised several tens of thousands of nodes and edges and was employed as the routing analysis platform.

During the preprocessing stage, edge lengths were extracted from OSM data based on actual road geometry and expressed in meters. Subsequently, using the add_edge_speeds functionality of the OSMnx library, travel speeds were assigned to each edge: where legal speed limit information was available in the OSM data, those values were adopted; otherwise, edge speeds were estimated based on road type and the library's default values. Travel times for each edge were then computed by combining length and speed. For routing analysis, waste bin locations and disposal sites were mapped to their nearest nodes within the network to ensure that route computations were conducted on the actual road infrastructure. In this study, routes between waste generation points and disposal centers were determined based on the shortest physical distance. Two additional metrics - travel time and fuel consumption - were then calculated based on route length. Travel time was obtained from the relation $T=l/v$ $T=l/v$, and fuel consumption from $F=\alpha\times L$ $F=\alpha\times L$, where L L denotes route length in meters, V V represents average travel speed, and α α is the fuel consumption coefficient in liters per kilometer. To ensure comparability across scenarios, an average operational speed of approximately 30 km/h and a fuel consumption rate of approximately 0.3 L/km were assumed throughout this study.

It is noteworthy that factors such as real-time traffic conditions, road width, pavement quality, route gradient, intersection delays, and certain fleet operational constraints were not explicitly incorporated into the current model, owing to the unavailability of comprehensive, temporally consistent, and integrated datasets for these variables across the entire city of Tabriz. Therefore, the present model should be interpreted as a network-based, data-driven approximation of real-world conditions intended for the relative comparison of optimization scenarios.

The geolocation of waste disposal sites and the positioning of waste bins were carried out based on empirically collected data and predefined spatial locations marked on the map. These data play a pivotal role in defining origin and destination nodes within the transportation graph. Figure [please insert the appropriate figure number] illustrates the geographical extent utilized in this research, along with the spatial distribution of waste bins and disposal sites.

To evaluate the performance of the predictive models and the multi-objective optimization algorithm, a systematic procedure was employed to generate a set of waste bin allocation scenarios to disposal centers. Scenario generation was conducted systematically based on possible allocation combinations: for each waste bin, eligible disposal centers were considered as permissible options, and the combination of these choices formed various allocation scenarios.

Consequently, a set of input scenarios was created for the machine learning models and subsequently for the NSGA-II algorithm. These scenarios represent distinct allocation states within the waste collection network, and for each, distance, time, and fuel consumption indicators were

estimated.

Given the particular geographical and structural characteristics of Tabriz, the selection of this region as a case study not only facilitates the validation of the proposed framework but also enhances its generalizability to other cities with analogous spatial and infrastructural attributes, both within Iran and internationally.

Results and Discussion

The proposed integrated framework was implemented and tested using real-world geospatial and operational data from the city of Tabriz. Three machine learning models Linear Regression, Decision Tree, and Multilayer Perceptron (MLP) were evaluated for predicting operational costs (distance, time, and fuel consumption). Among them, the MLP model achieved the highest prediction accuracy, with R^2 values exceeding 0/96 for fuel consumption, 0/93 for travel time, and 0/96 for total distance, confirming its suitability for modeling complex, non-linear relationships in waste collection routing.

Using the trained MLP model as a cost estimator, the NSGA-II algorithm was applied for multi-objective optimization. The results revealed a significant improvement in all three-performance metrics. Compared to the baseline (non-optimized) scenario, the optimized solutions achieved up to 35% reduction in total distance, 35% in travel time, and 43% in fuel consumption. These improvements highlight the potential of the proposed framework in reducing environmental impact, operational costs, and energy usage in municipal waste management.

Furthermore, the Pareto front generated by the NSGA-II algorithm illustrated a diverse set of non-dominated solutions, offering flexibility for urban managers to select routes based on context-specific priorities such as minimizing emissions in high-density zones or prioritizing speed during peak hours. The analysis also revealed that the shortest path was not always the fastest or most fuel-efficient, underscoring the importance of balancing multiple objectives in real-world applications. Overall, the results validate the effectiveness of combining machine learning with evolutionary optimization in developing intelligent and sustainable waste collection systems.

Conclusion

This study proposes an intelligent multi-objective framework that integrates machine learning with evolutionary algorithms to improve the operational and environmental performance of municipal waste collection systems. The designed framework through precise modeling of the Tabriz urban transportation network, the application of a multilayer perceptron (MLP) neural network for estimating cost-related components (time, distance, and fuel), and the utilization of the NSGA-II algorithm for simultaneous multi-objective optimization - has succeeded in delivering efficient, realistic, and implementable solutions for waste collection route allocation. Empirical results derived from the model implementation in the actual urban environment demonstrate that the proposed framework significantly outperforms existing methods, including the models developed by Bagheri and Babaei, leading to substantial reductions in key operational indicators. Compared to previous models, the proposed method has achieved reductions of up to 20% in total operation time, 11.3% in traveled distance, and 18.9% in fuel consumption. Moreover, relative to the baseline scenario (pre-optimization), these reductions reach up to 35% for both time and distance and up to 43% for fuel consumption. These improvements underscore the high potential of the proposed model in reducing both economic costs and the environmental footprint of urban waste management systems. From a technical perspective, the adoption of the multilayer perceptron neural network as the learning model has demonstrated a strong capability to capture complex nonlinear relationships within operational data, yielding high prediction accuracy with R^2 values exceeding 0.96. On the other hand, the NSGA-II algorithm, by generating a diverse Pareto front of non-dominated solutions, enables decision-makers to select optimal scenarios according to managerial priorities,

environmental policies, or local conditions, thereby significantly enhancing the decision-making capacity of urban authorities. In practical terms, this research offers an efficient paradigm for integrating spatial data, machine learning, and multi-objective optimization within municipal service systems - a framework that is readily generalizable to other metropolitan areas in Iran and even at the international level. The flexible architecture of the model allows for regular updates and adaptation to temporal data, weather conditions, real-time traffic information, and other dynamic parameters of the urban environment. Finally, it is recommended that future research extend this framework by incorporating real-time data streams such as traffic status, fleet performance, environmental pollutants, and citizen behavioral patterns. Furthermore, expanding the model to encompass the entire waste management lifecycle - from collection through processing and recycling - could pave the way for the development of comprehensive, intelligent, and sustainable waste management systems in the cities of tomorrow.

Funding
There is no funding support.

Authors' Contribution
First Author: Conceptualization, methodology design, data collection, implementation of machine learning models, and drafting of the original manuscript. Second Author: Geospatial data extraction, network modeling using OSMnx, preprocessing of transportation data, and preparation of figures and tables. Third Author: Implementation of the NSGA-II optimization algorithm, interpretation of the Pareto front results, and final revision and editing of the manuscript. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest
The authors hereby explicitly declare no undisclosed conflicts of interest and fully confirm complete objectivity in reporting all findings.

Acknowledgments
We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

مجلـــه شـــهر پایـــدار
Journal Homepage: www.jscity.ir
شاپا الکترونیکی: 2476-6151

بهینه‌سازی هوشمند مسیر جمع‌آوری پسماند شهری با استفاده از یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک چندهدفه، مطالعه موردی: شهر تبریز

مسعود حق لسان [۱]، مهرداد نجفی [۲]، محمدصادق جداری سفیدگری [۳]

۱- نویسنده مسئول، گروه معماری و شهرسازی، واحد ایلخچی، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلخچی، ایران. رایانامه: ma.haghlesan@iau.ac.ir
۲- گروه شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران رایانامه: mehrdad.najafi@iau.ac.ir
۳- گروه شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. رایانامه: m.jedari@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۵/۰۳/۲۲
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۶/۱۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۷/۱۰
تاریخ چاپ:
۱۴۰۵/۰۸/۱۴

واژگان کلیدی:
پسماند شهری، بهینه‌سازی مسیر، یادگیری ماشین، الگوریتم ژنتیک چندهدفه، تبریز.

چکیده

با افزایش جمعیت و گسترش فیزیکی کلان‌شهرها، مدیریت کارآمد پسماند شهری به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و مدیریتی بدل شده است. در این میان، مرحله جمع‌آوری و حمل پسماند، سهم عمده‌ای از هزینه‌ها و انرژی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. ناکارآمدی در تخصیص مسیرهای جمع‌آوری، منجر به اتلاف منابع، افزایش مصرف سوخت، آلودگی بیشتر و اختلال در ارائه خدمات شهری می‌شود. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی هوشمند و واقع‌گرایانه برای بهینه‌سازی چندهدفه مسیر ناوگان جمع‌آوری پسماند در شهر تبریز انجام‌شده است. در این راستا، ابتدا شبکه حمل‌ونقل شهری بر اساس داده‌های نقشه متن‌باز مدل‌سازی شد و سطل‌های پسماند و مراکز دفن به‌صورت دقیق مکان‌مند شدند. سپس پایگاه داده‌ای جامع شامل سناریوهای مختلف تخصیص ایجاد شد و با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، مدلی برای تخمین هزینه‌های عملیاتی (مسافت، زمان و سوخت مصرفی) توسعه یافت. در مرحله بعد، الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی هم‌زمان سه تابع هدف یادشده به کار گرفته شد و مجموعه‌ای از پاسخ‌های غیر مغلوب در قالب جبهه پارتو تولید گردید. نتایج تجربی نشان داد مدل پرسپترون با دقت بالا قادر به پیش‌بینی هزینه‌ها است (R^2 بیش از ۰/۹۶ در برخی شاخص‌ها) و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک چندهدفه موجب کاهش چشمگیر در شاخص‌های عملیاتی گردید؛ به‌گونه‌ای که مصرف سوخت تا ۴۳٪، زمان عملیات تا ۳۵٪ و مسافت پیمایش تا ۳۵٪ کاهش یافت. این پژوهش اثبات می‌کند که ترکیب یادگیری ماشین و بهینه‌سازی تکاملی می‌تواند راهکاری مؤثر برای مدیریت پسماند هوشمند و پایدار در کلان‌شهرها فراهم آورد.

استناد: حق لسان، مسعود؛ نجفی، مهرداد و جداری سفیدگری، محمدصادق. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی هوشمند مسیر جمع‌آوری پسماند شهری با استفاده از یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک چندهدفه، مطالعه موردی: شهر تبریز. *مجله شهر پایدار*، ۹ (۳)، ۷۴-۵۹.
http://doi.org/10.22034/jsc.2026.528909.1853

© نویسندگان
ناشر: انجمن جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری ایران

مقدمه

با گسترش شتابان شهرنشینی و رشد روزافزون جمعیت در کلان‌شهرها، مدیریت کارآمد پسماندهای شهری به یکی از چالش‌های کلیدی در حوزه خدمات عمومی و پایداری شهرها تبدیل‌شده است. فرآیند جمع‌آوری، حمل‌ونقل و دفع پسماند، سهم قابل‌توجهی از هزینه‌های مدیریت شهری را به خود اختصاص می‌دهد و در صورت نبود سامانه‌های هوشمند، منجر به اتلاف منابع، آلودگی‌های زیست‌محیطی، و نارضایتی شهروندان می‌گردد (رضایی و غلامپور، ۱۴۰۰: ۵). از میان این فرآیندها، مرحله جمع‌آوری و حمل پسماند به‌عنوان پرهزینه‌ترین و پیچیده‌ترین بخش، نقشی تعیین‌کننده در کارایی کل سیستم ایفا می‌کند؛ به‌ویژه در شهرهایی مانند تبریز که با ساختاری جغرافیایی و ترافیکی متراکم مواجه‌اند. در کلان‌شهر تبریز، مدیریت پسماند به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی خدمات شهری با چالش‌های لجستیکی و عملیاتی متعددی روبه‌رو است. بر اساس گزارش‌های سازمان مدیریت پسماند شهرداری تبریز، تولید روزانه پسماند در این کلان‌شهر به ۱۱۰۰ تن می‌رسد که سرانه آن به ازای هر شهروند ۷۶۰ گرم برآورد می‌شود. مدیریت این حجم عظیم پسماند، علاوه بر پسماندهای عادی، شامل جمع‌آوری و انتقال روزانه ۱۸ تا ۲۰ تن پسماند بیمارستانی و مدیریت حجم وسیعی از نخاله‌های ساختمانی در سایت‌های اختصاصی (نظیر باباغی، مایان و شاهین‌شهر) است. با توجه به بودجه ۳۵۵ میلیارد تومانی سازمان مذکور که بخش عمده آن به هزینه‌های عمرانی و عملیاتی تخصیص می‌یابد، ناکارآمدی در شبکه حمل‌ونقل و مسیریابی ناوگان، مستقیماً منجر به اتلاف منابع مالی و افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی می‌گردد. در چنین شرایطی، گذار از روش‌های سنتی به مدل‌های هوشمند مبتنی بر داده، نه‌تنها یک انتخاب، بلکه یک ضرورت اقتصادی و راهبردی برای سازمان مدیریت پسماند است (خبرگزاری صداوسیمای مرکز آذربایجان شرقی، ۱۴۰۴).

با توجه به تعدد سطل‌های پسماند، پراکندگی فضایی آن‌ها، محدودیت‌های زیرساختی، و ضرورت کاهش مصرف سوخت و زمان، طراحی مسیرهای بهینه برای ناوگان حمل پسماند از اهمیت بالایی برخوردار است (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۹۶). رویکردهای سنتی مبتنی بر مدل‌های کلاسیک یا روش‌های دستی، توان پاسخگویی به این پیچیدگی‌های چندمعیاره را ندارند (نورادین و اکبری، ۱۴۰۰: ۱۲). ازاین‌رو، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین نظیر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، افق‌های جدیدی برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها در مدیریت پسماند شهری گشوده‌اند. مطالعات داخلی و بین‌المللی متعددی در حوزه بهینه‌سازی مسیریابی جمع‌آوری پسماند با کمک الگوریتم‌های هوشمند و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام‌شده است. از جمله رویکردهای بین‌المللی می‌توان به استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه تکاملی اشاره کرد. در یک بررسی اخیر، متاهیوریستیک‌های مختلف (مانند الگوریتم ژنتیک چندهدفه، الگوریتم ازدحام ذرات و ...) برای حل مسائل مسیریابی جمع‌آوری زباله در شهرهای بزرگ بررسی شدند؛ نتایج نشان می‌دهد این الگوریتم‌ها برای مجموعه داده‌های بزرگ کارایی مناسبی دارند (تاکور و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۴۸۵۳). همچنین یکی از تحقیقات چینی مدل مسیریابی وسایل نقلیه سبز وابسته به زمان را با الگوریتم ژنتیک چندهدفه بهبودیافته حل کرده و اثبات کرده است که الگوریتم ژنتیک چندهدفه کلاسیک نسبت به روش‌های دیگر تقویت‌شده عملکرد قوی‌تری دارد. مقالات دیگری نیز الگوریتم‌های ترکیبی نظیر فرا جستجوی محلی تکرارشونده را برای مدل‌سازی دو هدفه (هزینه و توازن کار) به‌کاربرده‌اند و نشان داده‌اند که این روش‌ها توانایی رقابت با سایر الگوریتم‌ها را دارند (Li et al,2024).

در حوزه یادگیری ماشین، مطالعه مروری‌ای نشان داده که الگوریتم‌های یادگیری ماشین در کل فرایند مدیریت پسماند از پیش‌بینی تولید تا جمع‌آوری و بازیافت کاربرد دارند (Anh Khoa et al,2020:18). برای پیش‌بینی روند تولید پسماند یا پر شدن سطل‌های هوشمند، شبکه‌های حافظه کوتاه بلندمدت و سایر مدل‌های مبتنی بر داده‌های زمانی به‌کاررفته‌اند.

همچنین یک مطالعه دیگر در زمینه پسماند ساخت‌وساز شهری از مدل حافظه کوتاه بلندمدت سه لایه استفاده کرد و دریافته که این مدل نسبت به رگرسیون خطی، رگرسور ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی پس انتشار خطا دقت و اثربخشی بالاتری دارد (Olawumi et al,2024:266). روش‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر درخت تصمیم، جنگل تصادفی و مدل‌های تقویتی مانند گرادیان تقویت‌شده نیز در پیش‌بینی تولید پسماند استفاده‌شده‌اند و اثربخشی بالایی نشان داده‌اند؛ به‌عنوان‌مثال نتایج پژوهشی جدید نشان می‌دهد مدل گرادیان تقویت‌شده برتری‌هایی نسبت به درخت تصمیم و جنگل تصادفی در پیش‌بینی تولید پسماند دارد (Chen et al,2023:4). از نظر کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی، در برخی از مطالعات ایرانی تأکید شده است که ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی با الگوریتم‌های مسیریابی می‌تواند به برنامه‌ریزی بهینه‌تر کمک کند. به‌طور مثال، باقری و همکاران در مقاله‌ای مدلی ترکیبی ارائه کرده‌اند که با ترکیب مسئله مسیریابی خودرو و سیستم اطلاعات جغرافیایی ، محدودیت‌هایی مانند پنجره‌های زمانی و ظرفیت ناوگان را در نظر گرفته و مسافت کل مسیرها را کمینه می‌کند (باقری و همکاران، ۱۳۹۸: ۹۲). این رویکردها با تحلیل شبکه معابر در سیستم اطلاعات جغرافیایی و بهره‌گیری از داده‌های مکانی، امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط واقعی را فراهم کرده‌اند.

در میان مطالعات داخلی، علاوه بر موارد فوق، می‌توان به کاربرد شبکه‌های عصبی اشاره کرد. جعفرزاده‌قوشچی و حمیدی‌مقدم (۱۳۹۹) از ترکیب روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی سیستم جمع‌آوری پسماند در شهر ارومیه استفاده کردند و نشان دادند که مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به‌خوبی بار حمل شده را پیش‌بینی کند. (جعفرزاده قوشچی، حمیدی مقدم، ۱۳۹۹: ۳۹۰). همچنین مطالعه‌ای دیگر در تهران مدل تخصیص پسماند به زیرسیستم‌های مختلف بازیافت، کمپوست، زباله‌سوز و دفن بهداشتی را با الگوریتم ژنتیک مبتنی بر منطق فازی ارائه داد (آهنی و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۴). نتایج این بررسی‌ها حاکی از آن است که مدل‌های ترکیبی ژنتیک–فازی و شبکه‌های عصبی می‌توانند هزینه کل سیستم را کاهش دهند و کارایی سیستم مدیریت پسماند را افزایش دهند.

با وجود گستردگی مطالعات انجام‌شده، مرور ادبیات نشان می‌دهد که بخش عمده پژوهش‌های پیشین بیشتر به معرفی و به‌کارگیری جداگانه روش‌ها پرداخته‌اند و کمتر کوشیده‌اند میان قابلیت‌های پیش‌بینی، تحلیل مکانی و بهینه‌سازی مسیر، پیوندی منسجم و عملیاتی برقرار کنند. به‌بیان‌دیگر، در بسیاری از مطالعات، مسئله مسیریابی خودروهای جمع‌آوری پسماند عمدتاً با فرض‌های ساده‌شده و ایستا مدل‌سازی شده است؛ به‌گونه‌ای که هزینه‌هایی مانند زمان سفر، مصرف سوخت و پیچیدگی حرکت در شبکه واقعی معابر، اغلب به‌صورت ثابت یا خطی در نظر گرفته می‌شوند. این در حالی است که در محیط واقعی کلان‌شهری مانند تبریز، هزینه‌های عملیاتی تحت تأثیر عواملی نظیر تراکم ترافیک، پراکندگی فضایی سطل‌های پسماند، ساختار نامنظم معابر، شیب و توپوگرافی شهر و محدودیت‌های زیرساختی قرار دارند و نمی‌توان آن‌ها را صرفاً با روابط ساده و عمومی توضیح داد. بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در صرفِ استفاده از روش‌های هوشمند یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیست، بلکه در تلفیق مرحله‌به‌مرحله این ابزارها در قالب یک چارچوب تصمیم‌یار برای شرایط واقعی شهر تبریز است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از داده‌های واقعی شبکه حمل‌ونقل و اطلاعات مکانی مربوط به نقاط جمع‌آوری پسماند، هزینه‌های عملیاتی مسیرها شامل مسافت، زمان و مصرف سوخت برآورد می‌شود. سپس، این برآوردها به‌عنوان ورودی فرایند بهینه‌سازی چندهدفه به کار گرفته می‌شوند تا مجموعه‌ای از گزینه‌های غیر مغلوب برای تصمیم‌گیری مدیریتی استخراج شود. بنابراین، تفاوت اصلی این مطالعه با بسیاری از پژوهش‌های پیشین آن است که به‌جای اتکا به فرض‌های کلی و انتزاعی، تلاش می‌کند پیوندی کاربردی میان داده‌های واقعی شهری، تحلیل مکانی، برآورد هزینه‌های عملیاتی و انتخاب مسیرهای بهینه برقرار سازد.

پژوهش حاضر در پاسخ به این نیاز، به طراحی یک چارچوب تلفیقی جهت بهینه‌سازی چندهدفه مسیر جمع‌آوری

پسماند شهری در تبریز پرداخته است. در این چارچوب، با استفاده از داده‌های واقعی شبکه حمل‌ونقل، پایگاه داده تخصیص مسیرها ایجادشده و سپس با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین، هزینه‌های عملیاتی شامل مسافت، زمان و سوخت مصرفی برای سناریوهای مختلف تخصیص برآورد گردیده است. در گام بعدی، الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی هم‌زمان چند معیار متضاد به کار گرفته‌شده تا مجموعه‌ای از پاسخ‌های غیر مغلوب (جبهه پارتو) استخراج شود.

بنابراین، اهداف اصلی پژوهش عبارت‌اند از:

۱- توسعه مدلی ترکیبی برای برآورد سریع و دقیق هزینه‌های عملیاتی جمع‌آوری پسماند؛

۲- استخراج مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه با لحاظ معیارهای مسافت، زمان و سوخت؛

۳- ارائه ابزاری تصمیم‌یار برای مدیران شهری در زمینه تخصیص بهینه منابع و کاهش آثار زیست‌محیطی.

بر این اساس، سؤالات محوری پژوهش به شرح زیر است:

- چگونه می‌توان با ترکیب یادگیری ماشین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، تخصیص مسیرهای جمع‌آوری پسماند را در محیط واقعی شهری بهینه‌سازی کرد؟
- تا چه میزان استفاده از مدل‌های هوشمند می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی شود؟
- چه سناریوهایی از تخصیص مسیر، در جبهه پارتو به‌عنوان گزینه‌های غیر مغلوب ظاهر می‌شوند و چه پیامدهایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی دارند؟

ضرورت انجام این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که کلان‌شهر تبریز، با تراکم بالای جمعیت و شبکه‌ای پیچیده از معابر، به راهکارهایی نوین برای کاهش هزینه‌های انرژی، بهینه‌سازی عملیات خدماتی و ارتقاء کیفیت زیست‌محیطی نیاز دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند گامی مؤثر در جهت تحقق مدیریت هوشمند و پایدار پسماند در کلان‌شهرهای ایران و دیگر شهرهای مشابه محسوب شود.

مبانی نظری

مدیریت پسماند شهری به فرآیندهایی همچون جمع‌آوری، حمل‌ونقل، بازیافت و دفع نهایی زباله اشاره دارد که با افزایش روزافزون حجم زباله و تراکم جمعیت، چالش‌های محیط‌زیستی و اقتصادی جدی‌ای ایجاد کرده است (Thakur et al,2024:1853). بخش عمده هزینه‌های مدیریت پسماند (بویژه جمع‌آوری و حمل) ممکن است تا ۶۰–۸۰٪ از کل هزینه‌های سیستم را تشکیل دهد (Li et al,2024:105). بنابراین طراحی مسیرهای بهینه برای ناوگان جمع‌آوری نقشی کلیدی در کاهش مصرف سوخت و هزینه‌ها دارد (Olawade et al,2024:248).

در این میان، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی با ارائه داده‌های مکانی از شبکه معابر و محل‌های سطل‌های زباله، ابزار کمکی مهمی برای مدل‌سازی و تحلیل دقیق مسیرها فراهم می‌کنند. برای نمونه، در یک مطالعه ایرانی تلفیق مسئله مسیریابی خودرو با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی نشان داد که می‌توان با مدل‌سازی مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت نامتقارن و پنجره زمانی، مسافت کل سفرها را کاهش داد (باقری و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۸).

بهینه‌سازی چندهدفه به مفهوم یافتن راه‌حل‌هایی اشاره دارد که به‌طور هم‌زمان چند معیار متضاد مانند حداقل‌سازی هزینه، مسافت یا آلاینده‌ها و حداکثر سازی کیفیت خدمات را مدنظر قرار می‌دهد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها در مسائل

چندهدفه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه[1] است که توانایی پیدا کردن مجموعه پارتو از راه‌حل‌ها را دارد (Gao et al, 2023:173). به‌عنوان نمونه، فروخ‌آسل و همکاران یک مسئله جمع‌آوری زباله با اهداف اقتصادی و اجتماعی را با الگوریتم ژنتیک چندهدفه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه حل کردند و نشان دادند الگوریتم ژنتیک چندهدفه نتایج بهتری ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، الگوریتم‌های تکاملی و فرا ابتکاری مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم زنبورعسل مصنوعی، کلونی مورچگان و الگوریتم‌های ترکیبی دیگر نیز در بسیاری از مطالعات به‌کاررفته‌اند که همگی تلاش می‌کنند با جستجوی گسترده در فضای جواب، به حل مسائل پیچیده مسیریابی کمک کنند (عبدالله و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۲۴۷۱۴). الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌ویژه شبکه‌های عصبی و روش‌های پیش‌بینی سری زمانی در دهه‌های اخیر به کار گرفته‌شده‌اند تا با مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده، ابعاد مختلف مدیریت پسماند را پیش‌بینی و خودکارسازی کنند (Fang et al,2023:1962). برای مثال، شبکه‌های عصبی مصنوعی، درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و روش‌های یادگیری عمیق در مطالعات پیشین برای پیش‌بینی میزان تولید پسماند، پر شدن سطل‌های هوشمند و طبقه‌بندی مواد زائد به‌کاررفته‌اند (Xian et al,2022:23). تحقیقات نشان داده‌اند که الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، مانند گرادیان تقویت‌شده و حافظه کوتاه بلندمدت، توانایی بالاتری در شناسایی الگوهای پیچیده دارند و دقت پیش‌بینی را نسبت به روش‌های سنتی افزایش می‌دهند (Huang et al,2020:8558). به‌عنوان‌مثال، یک مطالعه مروری بیان کرده است که روش‌های یادگیری ماشین بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی تولید پسماند به‌حساب می‌آیند، زیرا قابلیت یادگیری و انطباق با داده‌های چندبعدی را دارند. به‌علاوه، استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در سیستم‌های مدیریت پسماند نشان داده است که می‌تواند فاصله مسیریابی را تا ۳۶/۸٪، هزینه‌ها را تا ۱۳٪/۳۵ و زمان عملیاتی را تا ۲۸/۲۲٪ کاهش دهد و دقت شناسایی و تفکیک پسماند را تا حدود ۷۲/۸–۹۹٫۹۵٪ افزایش دهد (Fang et al,2023:1966).

روش پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی–توسعه‌ای است، زیرا با هدف حل یک مسئله واقعی در مدیریت شهری (بهینه‌سازی حمل پسماند) انجام‌شده و از تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین و بهینه‌سازی برای توسعه راه‌حل‌های قابل‌اجرا در دنیای واقعی بهره گرفته است. شکل ۱ روند کلی روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد. این پژوهش با هدف بهینه‌سازی سیستم جمع‌آوری پسماند در شهر تبریز و کاهش هزینه‌های عملیاتی، مصرف سوخت، زمان و آلودگی زیست‌محیطی، به طراحی یک سامانه هوشمند تخصیص مسیر پرداخته است. ابتدا شبکه حمل‌ونقل شهری تبریز با استفاده از داده‌های مکانی و نقشه‌های OSM مدل‌سازی شده و گرافی وزن‌دار از معابر، سطل‌ها و مراکز دفن ایجاد گردیده است. سپس پایگاه داده‌ای جامع از ترکیب‌های مختلف تخصیص سطل‌ها به مراکز دفن با استفاده از الگوریتم دایکسترا ساخته‌شده که شامل متغیرهای فاصله، زمان و سوخت مصرفی است. بر اساس این داده‌ها، یک مدل یادگیری ماشین مبتنی بر شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه برای تخمین سریع و دقیق هزینه‌های مسیر توسعه‌یافته است. در گام نهایی، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II برای یافتن جبهه پارتوی راه‌حل‌های بهینه تخصیص بهره‌گیری شده است. این فرآیند موجب تسریع تصمیم‌گیری و ارتقای بهره‌وری در مدیریت حمل پسماند شهری می‌گردد.

1NSGA-II



شکل ۱. روند کلی چهارچوب پیشنهادی جهت کشف مسیرهای بهینه جمع‌آوری پسماند

محدوده موردمطالعه

محدوده موردمطالعه در این پژوهش، شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی در شمال غربی ایران، می‌باشد. تبریز به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران با جمعیتی بالغبر ۱/۵ میلیون نفر، دارای ساختار شهری پیچیده، بافت متراکم، و چالش‌های متعددی در حوزه مدیریت پسماند شهری است. موقعیت جغرافیایی شهر، گسترش افقی، وجود بافت‌های تاریخی و مناطق مسکونی پراکنده، نیازمند طراحی بهینه مسیرهای جمع‌آوری زباله با در نظر گرفتن شاخص‌های متنوعی نظیر فاصله، زمان و سوخت می‌باشد. این محدوده در شکل ۲ قابل‌مشاهده است.

در این پژوهش، کلان‌شهر تبریز به‌عنوان بستر مکانی مطالعه در نظر گرفته‌شده است، اما تحلیل انجام‌شده بر کل شبکه جمع‌آوری پسماند شهر تعمیم نمی‌یابد. داده‌ها و سناریوهای بررسی‌شده مربوط به یک محدوده عملیاتی مشخص از سامانه جمع‌آوری پسماند شهری هستند که به‌عنوان نمونه موردی برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی انتخاب‌شده است. بنابراین، شاخص‌هایی مانند مجموع مسافت، زمان عملیات و مصرف سوخت که در این پژوهش گزارش‌شده‌اند، تنها در چارچوب همین سناریوی عملیاتی تعریف‌شده قابل تفسیر هستند و نباید به‌کل شهر تبریز تعمیم داده شوند.

در این مطالعه، نقشه شبکه حمل‌ونقل تبریز از داده‌های متن‌باز OpenStreetMap استخراج گردیده است. این داده‌ها شامل جزئیات گراف حمل‌ونقل اعم از خیابان‌های اصلی و فرعی، اطلاعات توپوگرافی، سرعت مجاز، و قابلیت تردد وسایل نقلیه در معابر مختلف می‌باشد. نقشه نهایی، پس از پردازش و پالایش داده‌ها، به‌عنوان بستر گرافی مورداستفاده در مدل‌سازی مسیریابی به کار گرفته‌شده است. در این پژوهش، شبکه حمل‌ونقل شهر تبریز با استفاده از داده‌های OpenStreetMap (OSM) و به کمک کتابخانه OSMnx استخراج و مدل‌سازی شد. بدین منظور، شبکه معابر شهری به‌صورت یک گراف جهت‌دار در نظر گرفته شد که در آن گره‌ها بیانگر تقاطع‌ها و نقاط اتصال، و یال‌ها نمایانگر قطعات معبر بین گره‌ها هستند. گراف نهایی استخراج‌شده در مقیاس شبکه معابر شهری تبریز شامل چند ده هزار گره و یال بود و به‌عنوان بستر تحلیل مسیریابی مورداستفاده قرار گرفت.

در مرحله پیش‌پردازش، ویژگی طول یال‌ها بر اساس هندسه واقعی معابر و بر حسب متر از داده‌های OSM استخراج شد. سپس با استفاده از قابلیت add_edge_speeds در کتابخانه OSMnx، سرعت حرکت برای یال‌ها تخصیص یافت؛ به این صورت که در صورت وجود اطلاعات سرعت مجاز در داده‌های OSM، همان مقادیر استفاده شد و در غیر این صورت، سرعت یال بر اساس نوع راه و مقادیر پیش‌فرض کتابخانه برآورد گردید. در ادامه، زمان سفر یال‌ها نیز از ترکیب طول و سرعت محاسبه شد. به‌منظور انجام تحلیل مسیریابی، نقاط مربوط به سطل‌های زباله و مراکز دفن به نزدیک‌ترین گره‌های موجود در شبکه نگاشت شدند تا محاسبات مسیر بر بستر واقعی شبکه معابر انجام گیرد. در این مطالعه، مسیرهای بین نقاط تولید پسماند و مراکز دفن بر اساس کوتاه‌ترین مسیر از نظر فاصله فیزیکی تعیین شدند. سپس دو

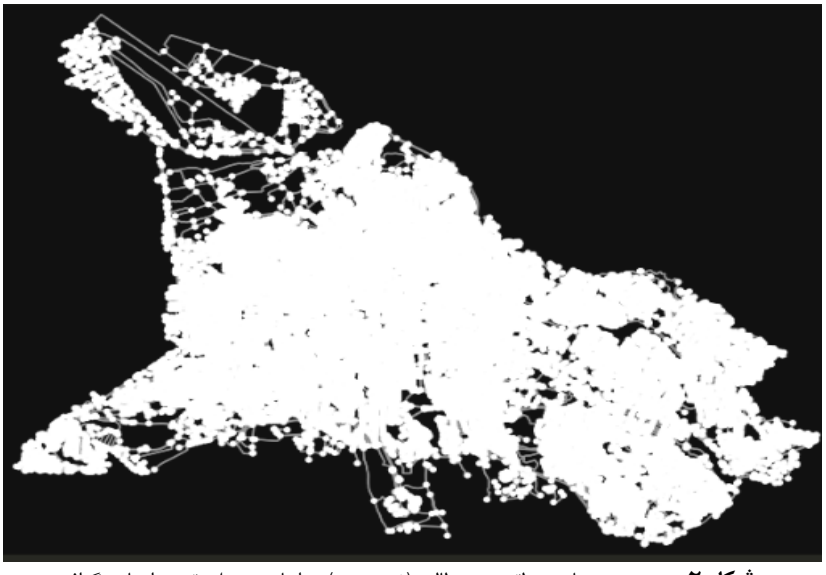
شاخص دیگر شامل زمان سفر و مصرف سوخت بر اساس طول مسیر محاسبه شدند. زمان سفر از رابطه $T = \frac{l}{v}$ و مصرف سوخت از رابطه F=α×L به دست آمد که در آن L طول مسیر بر حسب متر، V سرعت متوسط حرکت، و α ضریب مصرف سوخت بر حسب لیتر بر کیلومتر است. در این پژوهش، برای یکسان‌سازی مقایسه سناریوها، سرعت متوسط عملیاتی حدود ۳۰ کیلومتر بر ساعت و نرخ مصرف سوخت حدود ۰٫۳ لیتر بر کیلومتر در نظر گرفته شد.

شایان‌ذکر است که در مدل حاضر، عواملی مانند ترافیک لحظه‌ای، عرض معبر، کیفیت روسازی، شیب مسیر، تأخیرهای ناشی از تقاطع‌ها و برخی محدودیت‌های عملیاتی ناوگان به‌صورت صریح لحاظ نشده‌اند، زیرا داده‌های جامع، زمان‌مند و یکپارچه برای این متغیرها در مقیاس کل شهر تبریز در دسترس نبود. ازاین‌رو، مدل حاضر باید به‌عنوان یک تقریب شبکه مبنا و داده مبنا از شرایط واقعی برای مقایسه نسبی سناریوهای بهینه‌سازی تفسیر شود.

مکان‌یابی محل‌های دفن زباله و نقاط استقرار سطل‌های زباله نیز بر اساس داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده و موقعیت‌های مکانی مشخص‌شده روی نقشه انجام‌شده است. این داده‌ها نقش کلیدی در تعریف گره‌های مبدأ و مقصد در گراف حمل‌ونقل دارند. شکل (شماره شکل خود را وارد کنید) محدوده جغرافیایی مورداستفاده در این تحقیق را همراه با موقعیت مکانی سطل‌های زباله و محل‌های دفن زباله نشان می‌دهد.

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از سناریوهای تخصیص سطل‌های پسماند به مراکز دفن تولید شد. تولید سناریوها به‌صورت سیستماتیک و بر پایه ترکیب گزینه‌های تخصیص ممکن انجام گرفت؛ به این صورت که برای هر سطل، مراکز دفن قابل تخصیص به‌عنوان گزینه‌های مجاز در نظر گرفته شدند و ترکیب این انتخاب‌ها، سناریوهای مختلف تخصیص را شکل داد.

در نتیجه، مجموعه‌ای از سناریوهای ورودی برای مدل‌های یادگیری ماشین و سپس الگوریتم NSGA-II ایجاد شد. این سناریوها نماینده حالت‌های مختلف تخصیص در شبکه جمع‌آوری پسماند هستند و برای هر یک، شاخص‌های مسافت، زمان و مصرف سوخت برآورد شد. با توجه به ویژگی‌های خاص جغرافیایی و ساختاری شهر تبریز، انتخاب این منطقه به‌عنوان مطالعه موردی نه‌تنها امکان اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی را فراهم می‌سازد، بلکه قابلیت تعمیم آن به سایر شهرهای با ساختار مشابه در داخل و خارج از ایران را نیز افزایش می‌دهد.



شکل ۲. تصویر مسیرهای منطقه موردمطالعه (شهر تبریز) بر اساس تبدیل نقشه راه‌ها به گراف

یافته‌ها

با هدف ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در زمینه تخصیص بهینه مسیر ناوگان جمع‌آوری پسماند، مجموعه‌ای از آزمایش‌های عددی در محیط پایتون طراحی و اجرا گردید. در این راستا، عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین منتخب در پیش‌بینی سه شاخص کلیدی عملیاتی (مجموع مسافت، زمان و مصرف سوخت) موردسنجش قرار گرفت و پس از آموزش دقیق مدل‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II برای استخراج مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیر مغلوب به کار گرفته شد. برای مدیریت و پردازش داده‌ها از کتابخانه Pandas وNumPy ، برای نرمال‌سازی داده‌ها و ارزیابی مدل از کتابخانهScikit-learn ، و برای توسعه و آموزش مدل پرسپترون چندلایه (MLP) از کتابخانه Keras با پشتیبانی TensorFlowاستفاده شد. همچنین برای ترسیم نمودارها و تحلیل نتایج از کتابخانه Matplotlib بهره گرفته شد. بخش مربوط به بهینه‌سازی چندهدفه و پیاده‌سازی الگوریتم NSGA-II نیز در محیط Python اجرا شد.

نتایج حاصل از این فرایند نه‌تنها دقت مدل‌های پیش‌بین را در بازتولید هزینه‌های تخصیص نشان می‌دهد، بلکه کارایی الگوریتم بهینه‌سازی را در کاهش هم‌زمان معیارهای چندگانه هزینه‌ای تأیید می‌نماید. در ادامه، این یافته‌ها به‌صورت تحلیلی و مقایسه‌ای در قالب جداول و نمودارهای آماری ارائه‌شده‌اند تا تصویری شفاف از اثربخشی مدل تلفیقی پیشنهادی در فضای تصمیم ارائه گردد.

بررسی میزان دقت مدل‌های مختلف یادگیری ماشین

به‌منظور ارزیابی دقت و اثربخشی مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی سه معیار اصلی هزینه‌ای شامل مجموع مسافت طی شده، زمان کل پیمایش و میزان سوخت مصرفی در سناریوهای مختلف تخصیص سطل‌های پسماند به مراکز دفن، سه مدل شامل رگرسیون خطی، درخت تصمیم و شبکه پرسپترون چندلایه مورد آزمایش قرار گرفتند. پیش از آموزش مدل‌های یادگیری ماشین، متغیرهای ورودی و خروجی به‌منظور هم مقیاس سازی و بهبود پایداری فرایند یادگیری نرمال‌سازی شدند. در این پژوهش، نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از روش Min-Max انجام شد، به‌طوری‌که مقادیر هر متغیر به بازه [۰،۱] منتقل گردید. بر این اساس، شاخص خطای میانگین مربعات گزارش‌شده در جدول ۱ بر مبنای مقادیر نرمال‌سازی شده محاسبه‌شده است و بنابراین مستقیماً دارای واحد فیزیکی اولیه، از جمله لیتر برای متغیر سوخت، نیست. لازم به ذکر است که تمامی شاخص‌های عملکرد گزارش‌شده در جدول ۱، شامل ، بر اساس مجموعه داده‌های آزمون محاسبه‌شده‌اند تا ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از توان تعمیم‌پذیری مدل‌ها ارائه شود.

جدول ۱. مقایسه دقت مدل‌های یادگیری ماشین در مجموعه آزمون (بر اساس داده‌های نرمال‌سازی شده گزارش‌شده‌اند)

مدل	مسافت(MSE)	زمان(MSE)	سوخت(MSE)	مسافت (R^2)	زمان(R^2)	سوخت (R^2)
رگرسیون خطی	۸/۵۰	۴۶/۲۱	۰/۲۴	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۸۴
درخت تصمیم	۴/۸۲	۲۵/۳۴	۰/۰۱۳	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۹۲
پرسپترون چندلایه	۲/۱۸	۱۳/۷۲	۰/۰۰۶	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۷

بررسی مقادیر میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که مدل پرسپترون چندلایه با مقادیر ۲/۱۸ برای مسافت، ۱۳/۷۲ برای زمان و ۰/۰۰۶ برای سوخت، کمترین خطای پیش‌بینی را داشته و از دقت عددی بالاتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار است. این موضوع با مقادیر بالای ضریب تعیین (R^2) نیز تأیید می‌شود؛ به‌طوری‌که مدل پرسپترون موفق شده است حدود ۹۶٪ از واریانس تغییرات مسافت، ۹۳٪ از تغییرات زمان و ۹۷٪ از تغییرات سوخت را تبیین نماید.

مدل درخت تصمیم نیز با مقادیر کمترین خطای پیش‌بینی پایین‌تر نسبت به رگرسیون خطی و ضریب تعیین بالاتر (در

محدوده ۰/۸۷ تا۰/۹۲)، عملکرد نسبتاً خوبی ارائه داده است؛ هرچند که به‌دقت مدل پرسپترون چندلایه نمی‌رسد. از سوی دیگر، مدل رگرسیون خطی به دلیل ماهیت خطی خود، علی‌رغم سادگی محاسباتی، توانایی کمتری در درک روابط غیرخطی پیچیده بین تخصیص سطل‌ها و هزینه‌های عملیاتی نشان داده است و به‌ویژه در پیش‌بینی زمان، بیشترین خطا را داشته است. این نتایج مؤید آن است که استفاده از مدل‌های غیرخطی مبتنی بر شبکه‌های عصبی در سناریوهای پیچیده تخصیص مسیر، می‌تواند به‌طور قابل توجهی دقت پیش‌بینی هزینه‌ها را افزایش داده و نقش کلیدی در بهینه‌سازی تصمیمات مدیریتی ایفا نماید. به‌منظور بررسی معنی‌داری تفاوت عملکرد مدل‌های موردمطالعه، آزمون ناپارامتری فریدمن بر اساس رتبه‌بندی مدل‌ها در شش معیار ارزیابی شامل خطای میانگین مربعات و ضریب تعیین برای سه متغیر مسافت، زمان و مصرف سوخت انجام شد. نتایج آزمون نشان داد که تفاوت بین مدل‌ها از نظر آماری معنادار است (۰/۰۰۲۴۸). میانگین رتبه‌ها نشان می‌دهد که مدل پرسپترون چندلایه با میانگین رتبه ۱ بهترین عملکرد را در میان مدل‌ها داشته است، در حالی که مدل درخت تصمیم با میانگین رتبه ۲ در جایگاه دوم و مدل رگرسیون خطی با میانگین رتبه ۳ در رتبه سوم قرار گرفته است. فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای میانگین رتبه‌ها نیز نشان می‌دهد که برتری مدل پرسپترون چندلایه نسبت به سایر مدل‌ها از نظر آماری پایدار است. این نتایج بیانگر آن است که استفاده از مدل‌های غیرخطی مبتنی بر شبکه‌های عصبی می‌تواند دقت پیش‌بینی شاخص‌های عملیاتی سیستم جمع‌آوری پسماند را به‌طور معناداری افزایش دهد.

جدول ۲. نتایج آزمون آماری مقایسه عملکرد مدل‌ها بر اساس رتبه معیارهای ارزیابی

مدل	میانگین رتبه	فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای رتبه	اختلاف رتبه با مدل برتر	p-value
پرسپترون چندلایه	۱/۰۰	[۱/۱۸ ، ۰/۸۲]	۰	۰/۰۰۲
درخت تصمیم	۲/۰۰	[۲/۱۸ ،۱/۸۲]	۱	۰/۰۰۲
رگرسیون خطی	۳/۰۰	[۳/۱۸ ،۲/۸۲]	۲	۰/۰۰۲

بررسی پیشرفت دقت قبل و بعد از بهینه‌سازی

به‌منظور ارزیابی اثربخشی الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II در بهبود تخصیص مسیر ناوگان جمع‌آوری پسماند، یک سناریوی پایه (مبتنی بر تخصیص اولیه سطل‌ها به مراکز دفن بدون بهینه‌سازی) با خروجی حاصل از بهترین جواب موجود در جبهه پارتو (پس از بهینه‌سازی چندهدفه) مقایسه گردید. سناریوی قبل از بهینه‌سازی به‌عنوان خط مبنای عملیاتی، بر اساس تخصیص اولیه و موجود سطل‌ها به مراکز دفن در شبکه جمع‌آوری پسماند تبریز تعریف شد؛ این سناریو حاصل اجرای الگوریتم تصادفی نیست، بلکه نشان‌دهنده وضعیت عملیاتی اولیه پیش از اعمال فرآیند بهینه‌سازی است. در مقابل، سناریوی «بعد از بهینه‌سازی» متناظر با بهترین راه‌حل غیرغالب در جبهه پارتو پس از اجرای NSGA-II است. نتایج این مقایسه در جدول ۳ آورده شده است:

جدول ۳. مقایسه سناریوهای قبل و بعد از بهینه‌سازی مسیر در سناریوی موردمطالعه از شبکه جمع‌آوری پسماند تبریز

سناریو	مجموع زمان اجرای عملیات (دقیقه)	مجموع مسافت (کیلومتر)	مجموع سوخت (لیتر)
قبل از بهینه‌سازی	۵۱/۴	۲۲۳	۱۳/۸
بعد از بهینه‌سازی	۳۳/۲	۱۴۴/۷	۷/۸۹

مقادیر گزارش‌شده در جدول ۳ شامل مجموع زمان عملیات، مجموع مسافت طی شده و مجموع مصرف سوخت، به‌کل شهر تبریز مربوط نیستند؛ بلکه صرفاً به سناریوی عملیاتی تعریف‌شده در محدوده موردمطالعه اختصاص دارند. در نسخه

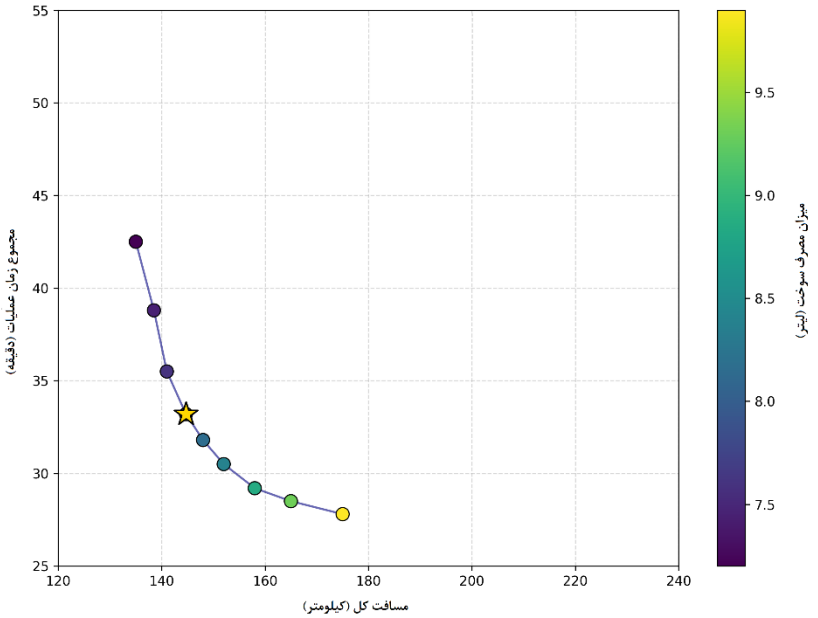
اولیه مقاله، این موضوع به‌صورت کافی شفاف بیان نشده بود و ممکن بود این برداشت ایجاد شود که نتایج در مقیاس کلان‌شهری گزارش‌شده‌اند. در حالی‌که اعداد جدول ۲ تنها عملکرد مسیرهای بررسی‌شده در شبکه نمونه مورداستفاده در این پژوهش را نشان می‌دهند. بر این اساس، کاهش مسافت از ۲۲۳ به ۱۴۴/۷ کیلومتر، کاهش زمان از ۵۱/۴ به ۳۳/۲ دقیقه، و کاهش مصرف سوخت از ۱۳/۸ به ۷/۸۹ لیتر، همگی مربوط به همین سناریوی عملیاتی هستند و باید در همان سطح تفسیر شوند. نتایج حاصل بیانگر بهبود چشمگیر در هر سه شاخص کلیدی عملیاتی هستند. مجموع زمان اجرای عملیات جمع‌آوری از ۵۱/۴ دقیقه به ۳۳/۲ دقیقه کاهش یافته است که نشان‌دهنده بهینه‌سازی مسیرهای حرکتی و کاهش توقف‌های غیرضروری است. همچنین، مجموع مسافت طی شده توسط ناوگان از ۲۲۳ کیلومتر به ۱۴۴/۷ کیلومتر کاهش یافته که خود موجب صرفه‌جویی قابل‌توجه در مصرف سوخت، استهلاک خودروها و کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌گردد.

مهم‌تر از همه، مصرف سوخت نیز با کاهش بیش از ۴۳٪ (از ۱۳/۸ لیتر به ۷/۸۹ لیتر) همراه بوده است؛ این کاهش نشان‌دهنده تأثیر مستقیم بهینه‌سازی تخصیص مسیرها بر کاهش هزینه‌های انرژی و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی سیستم مدیریت پسماند است. به‌طور کلی، این تحلیل تجربی نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم NSGA-II به همراه مدل یادگیری ماشین پیش‌بینی‌کننده هزینه‌ها، می‌تواند راهکارهایی بهینه، واقع‌گرایانه و قابل‌اجرا برای تخصیص مسیرهای جمع‌آوری پسماند ارائه دهد که هم‌زمان منجر به کاهش زمان، مسافت و سوخت در مقیاس عملیاتی شهری می‌شوند.

بررسی جبهه پارتو بهینه‌سازی

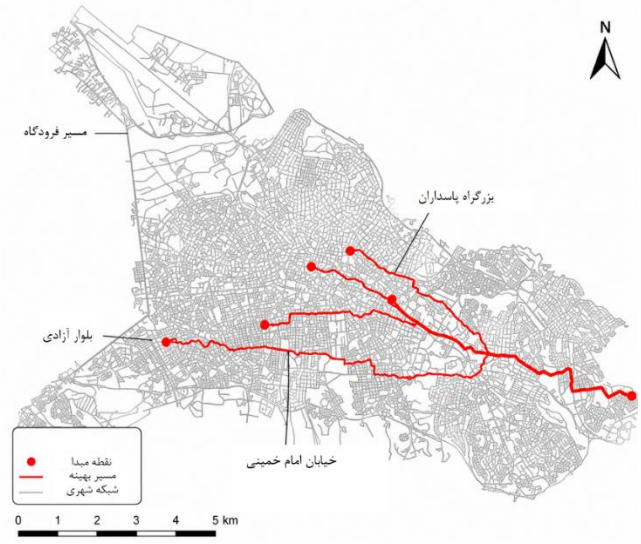
هدف از انجام این آزمایش، دستیابی به یک تعادل بهینه میان دو شاخص کلیدی عملکرد در شبکه جمع‌آوری پسماند، یعنی «مجموع زمان عملیات» و «مجموع مسافت طی شده» بوده است. در مسائل لجستیک شهری، کاهش مسافت لزوماً به کاهش زمان سفر منجر نمی‌شود، چرا که عوامل متعددی از جمله ترافیک و نوع معابر در تعیین زمان نهایی نقش دارند؛ از این رو، الگوریتم NSGA-II برای شناسایی مجموعه جواب‌های غیر مغلوب (جبهه پارتو) به کار گرفته شد. نتایج حاصل که در شکل ۲ نمایش داده شده، به‌وضوح بیانگر وجود یک مبادله معکوس میان این دو شاخص است؛ به‌طوری‌که با حرکت بر روی منحنی از سمت چپ به راست، ضمن افزایش مسافت پیموده شده، شاهد کاهش زمان عملیات هستیم. ستاره زرد رنگ در این نمودار، نقطه منتخب نهایی را نشان می‌دهد که به‌عنوان یک نقطه زانو، بهترین توازن را میان مسافت و زمان (با کمترین مصرف سوخت ممکن) برقرار کرده و نشان‌دهنده عملکرد برتر مدل پیشنهادی نسبت به وضعیت پیش از بهینه‌سازی است.

دلیل دستیابی به چنین نتیجه‌ای و رفتار خاص جبهه پارتو، به ماهیت مدل‌سازی در الگوریتم NSGA-II بازمی‌گردد که به‌جای تمرکز بر یک هدف واحد، کل فضای تصمیم‌گیری را برای یافتن توزیع‌های مختلف تخصیص سطل‌ها به مراکز دفن کاوش می‌کند. این منحنی نشان می‌دهد که سیستم به یک مرز بهینگی رسیده است که در آن هیچ‌یک از شاخص‌ها بدون لطمه زدن به دیگری قابل بهبود نیستند. شیب تند بخش ابتدایی نمودار نشان‌دهنده آن است که تغییرات کوچک در مسافت، تأثیر چشمگیری بر کاهش زمان عملیات دارد، در حالی که در بخش‌های انتهایی نمودار، این نرخ بازگشت (تغییر مسافت به زمان) کاهش می‌یابد. این تحلیل به مدیران شهری اجازه می‌دهد تا بسته به اولویت‌های استراتژیک (مانند نیاز به آزادسازی سریع‌تر ناوگان در ساعات پیک ترافیک یا تمرکز بر کاهش هزینه‌های سوخت ناشی از مسافت زیاد)، بهترین گزینه را از میان مجموعه جواب‌های استخراج‌شده انتخاب نمایند.



شکل ۲. بصری سازی جبهه پارتو برای سه معیار (زمان، مسافت و سوخت)

در این شکل ۳، مسیر بهینه‌یافته‌ی یک ناوگان جمع‌آوری پسماند از مرکز دفن به چندین نقطه توزیع سطل‌های زباله نمایش داده شده است. مسیرها با استفاده از الگوریتم NSGA-II و براساس حداقل‌سازی هم‌زمان سه معیار اصلی (مسافت، زمان و مصرف سوخت) تعیین شده‌اند. خطوط قرمز نمایانگر مسیرهای انتخاب‌شده در ساختار شبکه حمل‌ونقل شهری مدل‌سازی‌شده بر پایه داده‌های OSM می‌باشند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوریتم توانسته است با پوشش نقاط کلیدی، مسیری منطقی، متوازن و با کمترین هزینه ممکن ارائه دهد که قابلیت اجرا در شرایط واقعی را دارد.



شکل ۳. نمونه‌ای از مسیر بهینه‌شده برای جمع‌آوری پسماند در محدوده شرقی شهر تبریز

مقایسه با سایر روش‌ها

جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، نتایج آن با دو روش مطرح در حوزه مسیریابی وسایل نقلیه شامل "مسیریابی

وسایل نقلیه ظرفیت‌دار نامتقارن و پنجره زمانی" (باقری و همکاران، ۱۳۹۷) و "مسیریابی وسایل نقلیه با سفرهای چندگانه و پنجره‌های زمانی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری" (بابایی و همکاران، ۱۳۹۸) مورد مقایسه قرار گرفت. شاخص‌های مورد بررسی شامل مجموع زمان اجرای عملیات (بر حسب دقیقه)، مجموع مسافت طی شده (بر حسب کیلومتر) و مجموع سوخت مصرفی (بر حسب لیتر) می‌باشند. به‌منظور ارزیابی منصفانه عملکرد روش پیشنهادی، دو روش منتخب از مطالعات پیشین، شامل روش باقری و همکاران (۱۳۹۷) و بابایی و همکاران (۱۳۹۸)، در همین پژوهش بر روی داده‌های یکسان منطقه موردمطالعه و تحت شرایط یکسان مسئله بازپیاده‌سازی و اجرا شدند. بدین ترتیب، مقادیر ارائه‌شده در جدول ۴ مستخرج از اجرای مجدد این روش‌ها در بستر داده‌ای مشترک هستند و نه صرفاً نقل مستقیم نتایج گزارش‌شده در مقالات اصلی. این رویکرد امکان مقایسه‌ای هم‌شرایط و روش‌مند میان عملکرد روش پیشنهادی و روش‌های مرجع را فراهم می‌سازد.

جدول ۴. مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های موجود

روش	مجموع زمان اجرای عملیات (دقیقه)	مجموع مسافت (کیلومتر)	مجموع سوخت (لیتر)
مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت دار نامتقارن و پنجره زمانی (باقری و همکاران، ۱۳۹۷)	۴۱/۵	۱۶۳/۲	۹/۷۴
مسیریابی وسایل نقلیه سفرهای چندگانه و پنجره‌های زمانی با الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (بابایی و همکاران، ۱۳۹۸)	۳۷/۸	۱۵۲/۶	۸/۹۱
روش پیشنهادی	۳۳/۲	۱۴۴/۷	۷/۸۹

بر اساس داده‌های فوق، روش پیشنهادی از نظر هر سه شاخص مورد بررسی عملکرد بهتری از سایر روش‌ها نشان داده است. در زمینه مجموع زمان اجرای عملیات، روش پیشنهادی با ثبت مقدار ۳۳/۲ دقیقه، به کاهش ۲۰ درصدی زمان نسبت به روش باقری و کاهش حدود ۱۲ درصدی نسبت به روش بابایی منجر شده است. این کاهش زمان بیانگر بهینه‌سازی کارایی زمانی سیستم حمل‌ونقل در روش پیشنهادی است. در خصوص مجموع مسافت طی شده، کاهش قابل توجهی در روش پیشنهادی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که نسبت به روش باقری، مسافت طی شده حدود۱۱/۳ درصد کاهش یافته و نسبت به روش بابایی نیز حدود ۵/۲ درصد بهبود حاصل شده است. این موضوع نشان‌دهنده اثربخشی الگوریتم پیشنهادی در یافتن مسیرهای کوتاه‌تر و مؤثرتر می‌باشد. همچنین، مصرف سوخت در روش پیشنهادی به مقدار ۷/۸۹ لیتر رسیده است که در مقایسه با روش باقری ۱۸/۹ درصد و با روش بابایی ۱۱/۵ درصد کاهش داشته است. با توجه به ارتباط مستقیم مصرف سوخت با مسافت و زمان، این کاهش نشان‌دهنده‌ی راندمان بالاتر و کاهش هزینه‌های عملیاتی و نیز تأثیر مثبت زیست‌محیطی روش پیشنهادی می‌باشد.

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه (مانند NSGA-II) با مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، می‌تواند راهکاری کارآمد، دقیق و مقیاس‌پذیر برای بهینه‌سازی مسیر جمع‌آوری پسماند در کلان‌شهرهایی با ساختار پیچیده شهری فراهم کند. این رویکرد نه‌تنها امکان برآورد سریع و دقیق هزینه‌های عملیاتی را مهیا می‌سازد، بلکه با استخراج جبهه‌ای متنوع از پاسخ‌های غیر مغلوب، بستر تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیری برای مدیران شهری فراهم می‌آورد. بررسی عملکرد مدل‌های مختلف یادگیری ماشین نشان

داد که مدل پرسپترون چندلایه از دقت بالاتری در پیش‌بینی سه شاخص کلیدی مسافت، زمان و سوخت مصرفی برخوردار است. این مسئله حاکی از توانمندی این مدل در درک روابط غیرخطی و پیچیده میان الگوهای تخصیص و هزینه‌های عملیاتی است، که در محیط‌های واقعی شهری با تنوع مکانی و محدودیت‌های زیرساختی اهمیت ویژه‌ای دارد. در مقابل، مدل‌های ساده‌تر مانند رگرسیون خطی به دلیل ناتوانی در مدل‌سازی چنین پیچیدگی‌هایی، عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان دادند. از سوی دیگر، بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGA-II منجر به کاهش چشمگیر در شاخص‌های عملیاتی شد. کاهش بیش از ۳۵٪ در مجموع زمان عملیات، ۳۵٪ در مسافت طی شده و حدود ۴۳٪ در مصرف سوخت، مؤید تأثیر بالای این رویکرد در ارتقای بهره‌وری سیستم مدیریت پسماند است. این نتایج هم‌راستا با مطالعات پیشین مانند (Fang et al,2023; Gao et al, 2023) نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های متاهیوریستیک پیشرفته در ترکیب با مدل‌های هوشمند، نه‌تنها به کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه قابلیت انطباق با داده‌های واقعی را نیز دارد. نتایج نشان داد که رویکرد هیبریدی مبتنی بر ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم NSGA-II نسبت به سناریوی پایه عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. این بهبود صرفاً ناشی از افزایش تعداد سناریوهای بررسی‌شده نیست، بلکه ریشه در ساختار دومرحله‌ای مدل دارد. در مرحله نخست، مدل‌های یادگیری ماشین با تقریب روابط بالقوه غیرخطی میان فاصله، زمان و مصرف سوخت، امکان برآورد سریع و انعطاف‌پذیر هزینه‌ها را فراهم می‌کنند. در مرحله دوم، الگوریتم NSGA-II با حفظ تنوع جمعیت و استفاده از مفهوم جبهه پارتو، فضای تصمیم را بدون تحمیل وزن‌های از پیش تعیین‌شده میان اهداف کاوش می‌کند. این جداسازی میان «تخمین هزینه» و «جستجوی بهینه» موجب کاهش پیچیدگی محاسباتی و افزایش کیفیت راه‌حل‌های غیر مغلوب شده است. از منظر پایداری شهری، یافته‌های پژوهش حاضر با تأکید بر کاهش سوخت و آلاینده‌ها، نقش مؤثری در تقویت راهبردهای سبز و توسعه پایدار ایفا می‌کنند. همچنین، امکان انتخاب راه‌حل‌های مختلف از روی جبهه پارتو، مزیتی کلیدی برای انطباق تصمیمات اجرایی با شرایط خاص (نظیر ترافیک، شرایط اقلیمی یا سیاست‌های زیست‌محیطی) محسوب می‌شود. با توجه به ساختار خاص شهری تبریز، که با پراکندگی فضایی مراکز دفن و سطل‌های پسماند همراه است، اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در این بستر جغرافیایی، نشان‌دهنده کارایی آن در محیط‌های پیچیده واقعی است. این امر نشان می‌دهد که چارچوب ارائه‌شده، قابلیت تعمیم به سایر شهرهای بزرگ ایران و حتی نمونه‌های مشابه در کشورهای در حال توسعه را دارد. در مجموع، این پژوهش بیانگر آن است که به‌کارگیری هم‌زمان داده‌های مکانی دقیق، مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، می‌تواند تحول بنیادینی در بهینه‌سازی مدیریت پسماند شهری ایجاد کند؛ تحولی که هم‌زمان منجر به کاهش هزینه، زمان و آلودگی و ارتقای کارایی سیستم‌های خدمات شهری می‌شود.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بهبود عملکرد عملیاتی و زیست‌محیطی سامانه جمع‌آوری پسماند شهری، چارچوبی هوشمند و چندهدفه مبتنی بر ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های تکاملی ارائه داده است. چارچوب طراحی‌شده، با مدل‌سازی دقیق شبکه حمل‌ونقل شهر تبریز، استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای تخمین مؤلفه‌های هزینه‌ای (زمان، مسافت، سوخت) و بهره‌گیری از الگوریتم NSGA-II جهت بهینه‌سازی هم‌زمان چند هدف، توانسته است راهکارهایی کارآمد، واقع‌گرایانه و قابل‌اجرا برای تخصیص مسیرهای جمع‌آوری پسماند ارائه دهد. نتایج تجربی حاصل از پیاده‌سازی مدل در محیط واقعی شهری نشان داد که چارچوب پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود از جمله مدل‌های باقری و بابایی عملکرد به‌مراتب بهتری داشته و منجر به کاهش چشمگیر در شاخص‌های کلیدی عملیاتی

گردیده است. در مقایسه با مدل‌های پیشین، روش پیشنهادی توانسته است مجموع زمان اجرای عملیات را تا ۲۰٪، مسافت طی شده را تا ۱۱/۳٪ و مصرف سوخت را تا ۱۸/۹٪ کاهش دهد. همچنین در مقایسه با سناریوی پایه (قبل از بهینه‌سازی)، این کاهش‌ها به ترتیب تا ۳۵٪ برای زمان و مسافت و تا ۴۳٪ برای سوخت مصرفی بوده است. این بهبودها نشان‌دهنده ظرفیت بالای مدل در کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم مدیریت پسماند شهری است.

از منظر فنی، استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به‌عنوان مدل یادگیرنده، توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی در داده‌های عملیاتی داشته و دقت بالای پیش‌بینی (با مقادیر R^2 بیش از ۰/۹۶) را فراهم نموده است. از سوی دیگر، الگوریتم NSGA-II با تولید جبهه‌ای متنوع از پاسخ‌های غیر مغلوب، امکان انتخاب سناریوهای بهینه بر اساس اولویت‌های مدیریتی، سیاست‌های زیست‌محیطی یا شرایط محلی را فراهم ساخته و قدرت تصمیم‌گیری مدیران شهری را افزایش داده است. از نظر کاربردی، این پژوهش الگویی کارآمد برای تلفیق داده‌های مکانی، یادگیری ماشین و بهینه‌سازی چندهدفه در سیستم‌های خدمات شهری ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان چارچوبی قابل تعمیم در سایر کلان‌شهرهای ایران و حتی در سطح بین‌المللی به‌کار گرفته شود. ساختار انعطاف‌پذیر مدل، قابلیت به‌روزرسانی و انطباق با داده‌های زمانی، شرایط جوی، اطلاعات لحظه‌ای ترافیک و دیگر شاخص‌های پویای محیط شهری را داراست. در پایان، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی توسعه این چارچوب با محوریت استفاده از داده‌های بلادرنگ مانند وضعیت ترافیک، عملکرد لحظه‌ای ناوگان، آلاینده‌های زیست‌محیطی، و رفتار شهروندان صورت پذیرد. همچنین، گسترش مدل به تحلیل چرخه کامل مدیریت پسماند، از جمع‌آوری تا پردازش و بازیافت، می‌تواند زمینه‌ساز طراحی سامانه‌های جامع مدیریت پسماند هوشمند و پایدار در شهرهای آینده باشد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

همه نویسندگان در طراحی پژوهش، تحلیل داده ها، نگارش و بازبینی مقاله مشارکت داشته و نسخه نهایی را تأیید کرده اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش یاری‌رسان بودند، به‌ویژه آنانی که در ارزیابی و ارتقای کیفیت مقاله نقش مؤثری داشتند، ابراز می‌دارند.

منابع

احسانی، منیره؛ ارجمندی، رضا؛ هویدی، حسن؛ قدوسی، جمال و میری لواسانی، سید محمد رضا. (۱۴۰۰). ارائه مدل بهینه نظام مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر منطق فازی (مطالعه موردی: شهر تهران). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۳(۱۰۴)، ۴۰-۲۷.

باقری، کیوان؛ نیسانی سامانی، نجمه؛ جلوخانی نیارکی، محمدرضا؛ تومانیان، آرا و حاجی بابایی، لیلا. (۱۴۰۰). تخمین زمان سفر وسایل نقلیه جمعآوری پسماند درمانی با استفاده از الگوریتمهای شبکه عصبی مصنوعی مکانی زمانی (مطالعه موردی: شهر تهران). *پژوهشهای جغرافیای برنامهریزی شهری*، ۹(۳)، ۹۵-۸۵. doi: 10.22059/jurbangeo.2020.305274.1328

جعفرزاده قوشچی، سعید و حمیدی مقدم، شبنم. (۱۳۹۹). ارزیابی و بهینهسازی سیستم جمعآوری و حمل پسماند شهر ارومیه با ترکیب روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۲ (پیاپی ۹۳))، ۳۹۴-۳۸۱.

خبرگزاری صداوسیمای آذربایجان شرقی. (۱۴۰۴، ۲۵ دی). تولید روزانه ۱۱۰۰ تن پسماند در تبریز (کد خبر: ۵۶۸۷۵۶۵).

رضایی، مسعود و غلامپور ارباستان، هومن. (۱۴۰۰). *تحلیل پیشرانهای آینده مؤثر بر مدیریت پسماند شهری*. تهران، ایران: مرکز پژوهشهای مجلس شورای اسلامی.

نورالدین، سیداحمد و اکبری جوکار، محمدرضا. (۱۴۰۰). بهینهسازی مدیریت پسماندهای شهری با لحاظ ترکیببندی پسماندها در مناطق مختلف. *اولین کنفرانس ملی بهینه‌سازی و روشهای نوین حل مسئله، نهاوند*.

نوروزی، قدرت الله و آقایی، مهرداد. (۱۴۰۰). نقش شهرداریها در تضمین حق بر محیط زیست سالم در مدیریت پسماند شهری؛ مطالعه موردی سازمان مدیریت پسماند شهرداری اصفهان. *فصلنامه مطالعات حقوق عمومی (دانشنامه حقوق و سیاست)*، ۲۴(۹۴)، ۳۱۹-۲۹۵.

References

Abdallah, M., Hamdan, S., & Shabib, A. (2021). A multi-objective optimization model for strategic waste management master plans. *Journal of Cleaner Production, 284*, 124714.

Ahani, M., Arjomandi, R., Hoveidi, H., Ghodousi, J., & Miri Lavasani, S. M. R. (2021). Providing an optimal model for urban waste management system using genetic algorithm based on fuzzy logic (Case study: Tehran city). *Environmental Science and Technology, 23*(104), 27–40. [In Persian]

Anh Khoa, T., Phuc, C. H., Lam, P. D., Nhu, L. M. B., Trong, N. M., Phuong, N. T. H., ... & Duc, D. N. M. (2020). Waste management system using IoT-based machine learning in university. *Wireless Communications and Mobile Computing, 2020*(1), 6138637. https://doi.org/10.1155/2020/6138637

Babaee Tirkolaee, E., Mahdavi, I., & Seyyed Esfahani, M. M. (2019). Solving the multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste management using grey wolf optimization algorithm. *Journal of Modeling in Engineering, 17*(57), 93–110. https://doi.org/10.22075/jme.2019.16445.1633 [In Persian]

Bagheri, K., Nissani Samani, N., & Jellokhani Niaraki, M. R. (2019). Routing of municipal waste collection vehicles with asymmetric limited capacity and time window. *Surveying Sciences and Technologies, 9*(3), 85–95. [In Persian]

Chen, S., Yu, L., Zhang, C., Wu, Y., & Li, T. (2023). Environmental impact assessment of multi-source solid waste based on a life cycle assessment, principal component analysis, and random forest algorithm. *Journal of Environmental Management, 339*, 117942. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117942

East Azerbaijan IRIB News Agency. (2026, January 15). *Daily production of 1100 tons of waste in Tabriz* (News Code: 5687565). [In Persian]

Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. *Environmental Chemistry Letters, 21*(4), 1959–1989. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3

Gao, Z., Xu, X., Hu, Y., Wang, H., Zhou, C., & Zhang, H. (2023). Based on improved NSGA-II algorithm for solving time-dependent green vehicle routing problem of urban waste removal with the consideration of traffic congestion: A case study in China. *Systems, 11*(4), 173. https://doi.org/10.3390/systems11040173

Huang, L., Cai, T., Zhu, Y., Zhu, Y., Wang, W., & Sun, K. (2020). LSTM-based forecasting for urban construction waste generation. *Sustainability, 12*(20), 8555. https://doi.org/10.3390/su12208555

Li, W., Wang, P., Xu, Y., Pan, L., Nie, C., & Yang, B. (2024). Multi-objective optimization of municipal solid waste collection based on adaptive large neighborhood search. *Electronics, 14*(1), 103. https://doi.org/10.3390/electronics14010103

Nooruddin, S., & Akbari Jokar, M. (2021). Optimization of urban waste management considering waste composition in different regions. *First National Conference on*

Optimization and New Problem Solving Methods. [In Persian]

Norouzi, G., & Aghaei, M. (2021). The role of municipalities in ensuring the right to a healthy environment in urban waste management: A case study of the Isfahan Municipal Waste Management Organization. *Journal of Legal Research, 24*(94), 295–319. [In Persian]

Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., & Oladapo, B. I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001

Olawumi, M. A., Oladapo, B. I., & Olawale, R. A. (2024). Revolutionising waste management with the impact of long short-term memory networks on recycling rate predictions. *Waste Management Bulletin, 2*(3), 266–274. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.08.006

Rezaei, M., & Gholampour Arbastan, H. (2022). *Analysis of future drivers affecting urban waste management*. Research Center of the Islamic Consultative Assembly. [In Persian]

Saeed Jafarzadeh Ghoshchi, & Hamidi Moghadam, S. (2019). Evaluation and optimization of the waste collection and transportation system of Urmia city by combining the response surface methodology and artificial neural network. *Environmental Science and Technology, 22*, 381–394. [In Persian]

Thakur, G., Pal, A., Mittal, N., Yajid, M. S. A., & Gared, F. (2024). A significant exploration on meta-heuristic based approaches for optimization in the waste management route problems. *Scientific Reports, 14*(1), 14853. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64133-1

Xia, W., Jiang, Y., Chen, X., & Zhao, R. (2022). Application of machine learning algorithms in municipal solid waste management: A mini review. *Waste Management & Research, 40*(6), 609–624. https://doi.org/10.1177/0734242X211033716