



Optimization of Waste Collection in Smart Cities (Case Study: Tehran City)

Ali Asghari^{1*}, Hosein Azgomi² & Ali Abbass Zoraghchian³

1. Department of Engineering, Faculty of Computer Engineering, Shafagh Institute of Higher Education, Tonekabon, Iran

2. Department of Engineering, Faculty of Computer Engineering, Islamic Azad University, Rasht, Iran

3. Department of Engineering, Faculty of Computer Engineering, Sanati Ghaem Institute of Higher Education, Ghaemshahr, Iran

* Corresponding author: Email: Asghari_Ali@aut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
Received in revised form:
Accepted:
Published online:

Keywords:
Smart city, waste collection management, Internet of Things (IoT), environmental sensors, Coral Reef Optimization (CRO) algorithm

ABSTRACT

Introduction: Waste accumulation in metropolises such as Tehran has challenged urban management, as traditional waste collection methods are inefficient in densely populated areas. Smart cities improve the quality of urban life by providing technological solutions, and smart waste collection systems reduce service times, pollution, and costs.

Objective: This study focuses on garbage collection in Tehran, seeking to increase sustainability and efficiency using the Internet of Things and optimization algorithms. Given the global increase in garbage expected to reach 3.4 billion tons by 2050, this study targets scheduling inefficiencies, energy consumption, pollution, and costs with an intelligent model.

Research Methodology: This applied study optimizes garbage collection in Tehran with the Coral Reef Optimization Algorithm. The multi-stage approach of the proposed algorithm not only controls the filling level of the bins and traffic but also considers the type of garbage to perform more appropriate separation. In the proposed model, sensors attached to the garbage bins collect information related to data, such as the filling level of the bin and the type of garbage, and the proposed algorithm optimizes the routes and schedules. The efficiency of the proposed method is measured in comparison with genetic algorithms and ant colony optimization. The experiment results show the efficiency of the proposed method over compared algorithms in all objectives.

Findings: The proposed intelligent algorithm using sensors and in the IoT platform reduces costs, distance traveled, emissions, and emptying time compared to traditional methods in Tehran. This method provides a scalable IoT-based solution for waste management, traffic, and high-volume waste.

Conclusion: The IoT platform and related sensors combined with the coral reef algorithm improve waste management by optimizing routes and reducing the costs and time of collecting the whole city's waste. Successive iterations provide an efficient model that outperforms classical methods in all objectives.

Cite this article: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2024). Title of paper in lower case letters (except for initial letter of first word, initial of first word after a colon, and proper nouns). *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 19(1), 239-256. <http://doi.org/0000000000000000>

<http://doi.org/0000000000000000>



© The Author(s)

Publisher: Islamic Azad University, Rasht Branch

Extend Abstract

Introduction:

The accumulation of waste in megacities poses a significant challenge to urban management. Traditional waste collection methods are ill-equipped to meet the demands of densely populated areas such as Tehran. As a result, the concept of smart cities has gained prominence as a transformative technological framework designed to enhance the quality of life for urban residents. Within this framework, the waste collection process in smart cities serves as a critical mechanism for improving urban services. Moreover, the incorporation of an intelligent learning system holds the potential to optimize waste collection, leading to reductions in service times, air pollution levels, and overall operational costs.

Methodology:

This study, which is of an applied nature, proposes a model for optimizing the waste collection system in the metropolitan city of Tehran using the Coral Reef Optimization (CRO) algorithm. This model incorporates a multi-stage approach to enhance efficiency and sustainability. The research variables include waste bin fill levels, traffic conditions, and waste types. The Coral Reef Optimization algorithm is employed to optimize waste collection routes and schedules from among potential solutions. Data are collected and analyzed through sensors installed on waste bins utilizing an Internet of Things (IoT) framework. The process continues through a series of iterations until an optimal solution is achieved. The results of the analysis, compared with well-known algorithms such as the Genetic Algorithm (GA) and the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm, validate the effectiveness of the proposed method across various criteria, including route distance, operational costs, and recycling efficiency.

Results and discussion:

The research findings demonstrate that the Coral Reef Optimization (CRO) algorithm significantly enhances waste collection efficiency in smart cities such as Tehran compared to traditional methods. Key outcomes of the study include reduced operational costs, shorter distances traveled by waste collection vehicles, decreased emissions of harmful gases, and reduced unloading times. The proposed method serves as a scalable and sustainable solution within an Internet of Things (IoT) framework for waste management, effectively mitigating urban challenges such as traffic congestion and the management of large waste volumes.

Conclusion:

The results obtained from the research indicate that the Internet of Things (IoT) framework, coupled with environmental sensors providing real-time data on waste levels, can effectively contribute to waste collection management. Furthermore, the Coral Reef Optimization (CRO) algorithm, supported by its robust operators, serves as a significant learning technique. By analyzing existing solutions and integrating them, it seeks an improved model aimed at objectives such as reducing the distance traveled by waste collection vehicles, lowering operational costs, and minimizing time. The process of identifying an optimal solution continues through multiple iterations until a final result is achieved. The findings reveal that the proposed method demonstrates substantial improvements across all its objectives compared to several classical and prominent approaches.

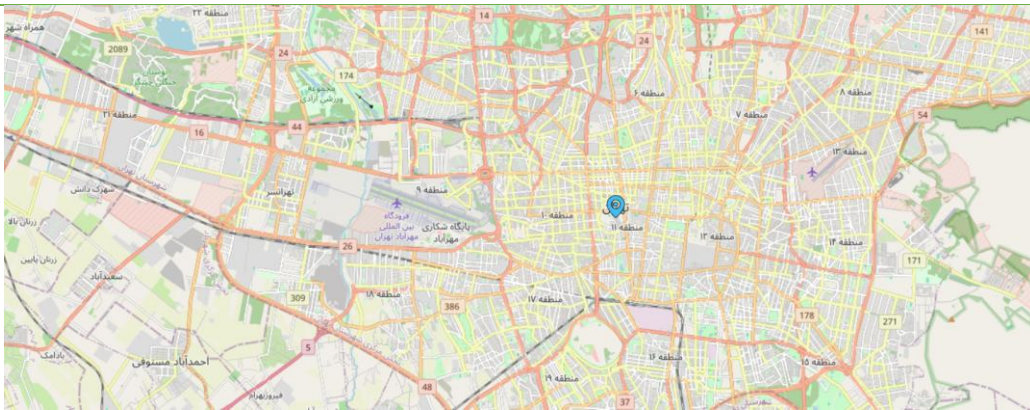
Funding: No funds, grants, or other support was received for this research.

Authors' Contribution: Asghari designed the methodology and drafted the manuscript. Azgomi conducted the experiments and analyzed the data. Zoraghchian validated the results and revised the manuscript for final submission.

Conflict of Interest: We declare no conflicts of interest related to this research.

شهرنشینی سریع و گسترده در قرن بیست و یکم، شهرها را به اکوسیستم‌هایی پیچیده و چندوجهی تبدیل کرده است که در آن مدیریت کارآمد منابع به‌عنوان پایه‌ای برای تضمین پایداری، زیست‌پذیری و کیفیت زندگی ساکنان از اهمیت حیاتی برخوردار است. این پدیده، که نتیجه‌ی رشد جمعیت، مهاجرت به مناطق شهری و توسعه‌ی صنعتی است، فشار بی‌سابقه‌ای بر زیرساخت‌های شهری وارد کرده و چالش‌هایی را در حوزه‌هایی مانند حمل‌ونقل، انرژی و مدیریت پسماند به وجود آورده است. در این میان، تهران پایتخت ایران و یکی از پرجمعیت‌ترین کلان‌شهرهای خاورمیانه با جمعیتی بالغ بر ۸.۷ میلیون نفر به‌عنوان نمونه‌ای برجسته از این تحولات مطرح می‌شود. این شهر روزانه بین ۷۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تن زباله جامد شهری تولید می‌کند که این حجم عظیم، سیستم مدیریت پسماند آن را با مشکلات متعددی مواجه کرده است (Damghani et al., 2008). این وضعیت تنها به تهران محدود نمی‌شود. گزارش‌های جهانی حاکی از آن است که تولید زباله‌های جامد شهری در سطح جهان تا سال ۲۰۵۰ به ۳.۴ میلیارد تن در سال خواهد رسید، رشدی که نشان‌دهنده‌ی یک بحران بالقوه زیست‌محیطی و لجستیکی است (Kaza et al., 2018). در چنین شرایطی، سیستم‌های سنتی جمع‌آوری زباله در تطبیق با الگوهای پویا و متغیر تولید زباله در شهرهای هوشمند با موانع جدی روبه‌رو می‌شوند. این ناکارآمدی‌ها به مشکلاتی مانند سرریز شدن سطل‌های زباله، افزایش هزینه‌های عملیاتی، مصرف بیش از حد سوخت برای کامیون‌های جمع‌آوری کننده، و انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود نتایجی که با اصول اساسی شهر هوشمند، یعنی پایداری، انعطاف‌پذیری و یکپارچگی فناوری، در تضاد آشکار قرار دارند (Al Nuaimi & Al Neyadi, 2022).

تهران، به‌عنوان یک کلان‌شهر در حال توسعه، با چالش‌های خاصی در زمینه‌ی مدیریت زباله مواجه است که این مسائل را پیچیده‌تر می‌کند. ترکیب زباله در این شهر به‌طور میانگین شامل ۶۰ تا ۷۰ درصد زباله‌های آلی (مانند پسماندهای غذایی) است که به دلیل رطوبت بالا و دمای متغیر، به‌سرعت تجزیه شده و گاز متان تولید می‌کند که گازی با اثر گلخانه‌ای قوی‌تر از دی‌اکسید کربن می‌باشد (Rupani et al., 2019). علاوه بر این، نرخ بازیافت در تهران تنها بین ۵ تا ۱۰ درصد است و بخش عمده‌ی زباله‌ها به سایت دفن کهریزک در حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شهر منتقل می‌شود، که این امر هزینه‌های حمل و نقل و اثرات زیست‌محیطی را افزایش می‌دهد (Norouzzian-Maleki et al., 2023). ترافیک سنگین، به‌ویژه در ساعات اوج در مناطقی مانند مرکز شهر (منطقه ۶) و بزرگراه‌های اصلی، زمان جمع‌آوری را طولانی‌تر کرده و مصرف سوخت را بالا می‌برد. این در حالی است که سیستم جمع‌آوری زباله در تهران هنوز به‌طور کامل مکانیزه نشده و به روش‌های نیمه‌مکانیزه وابسته است که کارایی آن را در مقایسه با شهرهای هوشمند پیشرفته‌تر محدود می‌کند (Damghani et al., 2008). این شرایط، همراه با تراکم بالای جمعیت در برخی مناطق (مانند منطقه ۱ و ۶) و پراکندگی در مناطق حومه (مانند منطقه ۲۲)، الگوهای تولید زباله را متغیر و پیش‌بینی آن‌ها را دشوار می‌سازد. در نتیجه، رویکردهای سنتی نه تنها ناکافی هستند، بلکه نمی‌توانند به نیازهای یک شهر هوشمند که باید پاسخگوی تغییرات لحظه‌ای و اهداف پایداری باشد، پاسخ دهند. ظهور شهرهای هوشمند، با استفاده از فناوری‌های نوین، راه‌حلی برای این چالش‌ها ارائه کرده است. یکی از مهم‌ترین این فناوری‌ها، اینترنت اشیا (IoT) است که با یکپارچگی حسگرها در سطل‌های زباله، امکان نظارت لحظه‌ای و جمع‌آوری داده‌های دقیق را فراهم می‌کند. این سطل‌های هوشمند می‌توانند اطلاعاتی مانند سطح پر شدن (از طریق حسگرهای مافوق صوت)، نوع زباله (از طریق حسگرهای شیمیایی)، و موقعیت مکانی از طریق GPS را به صورت لحظه‌ای ارسال کنند (Nirde & Mulay, 2021). در تهران، استفاده از این فناوری می‌تواند به شناسایی نقاط پرتولید زباله (مانند بازارها یا مناطق مسکونی پرجمعیت) و تنظیم برنامه‌های جمع‌آوری بر اساس نیاز واقعی کمک کند. برای مثال، حسگرهای متان می‌توانند تجزیه‌ی زباله‌های آلی را تشخیص داده و زمان‌بندی جمع‌آوری را برای جلوگیری از تولید گازهای گلخانه‌ای تنظیم کنند که با توجه به ترکیب بالای زباله‌های آلی در تهران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Rahman & Islam, 2022). با این حال، جمع‌آوری این داده‌ها تنها گام نخست است؛ چالش اصلی در تحلیل و استفاده‌ی مؤثر از این اطلاعات برای بهینه‌سازی مسیرها و برنامه‌های جمع‌آوری نهفته است. اینجاست که مسئله‌ی جمع‌آوری زباله به یک مساله بهینه‌سازی پیچیده تبدیل می‌شود که می‌توان آن را به‌عنوان یک گونه از مسئله‌ی مسیریابی خودرو مدل‌سازی کرد (Zhang & Wang, 2022). در تهران به دلیل وجود هزاران نقطه‌ی جمع‌آوری، تغییرات لحظه‌ای ترافیک، و نیاز به هماهنگی با اهداف چندگانه (مانند کاهش هزینه و انتشار گازها) از پیچیدگی بالایی برخوردار است. شکل ۱ نقشه سطل‌های مکانیزه شهر تهران را نشان می‌دهد. اعداد داخل نقشه تعداد این سطل‌ها را به ازای هر ناحیه را مشخص می‌کنند.



شکل ۱. نقشه سطل‌های زباله مکانیزه شهر تهران

الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی مانند الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها در سال‌های اخیر برای حل این مسئله به کار گرفته شده‌اند و دستاوردهایی قابل‌ملاحظه داشته‌اند. این الگوریتم‌ها با استفاده از مفاهیمی مانند تکامل زیستی در الگوریتم ازدحام ذرات یا رفتار اجتماعی مورچه‌ها در الگوریتم مورچگان، توانسته‌اند فاصله‌ی سفر کامیون‌ها و هزینه‌های عملیاتی را تا حد معینی کاهش دهند (Zhang & Wang, 2022). در الگوریتم ژنتیک، جمعیت اولیه‌ای از راه‌حل‌ها (مسیرها) ایجاد شده و از طریق عملیات انتخاب، تقاطع و جهش راه‌حل‌های جدید بوجود می‌آیند، در حالی که الگوریتم مورچگان با مکانیزم رد پای فرومونی، مسیرهای بهینه را شناسایی می‌کند. این روش‌ها در سناریوهای ساده‌تر کارایی خوبی نشان داده‌اند، اما در مواجهه با مقیاس بزرگتر مثل شهر تهران و نیازهای چند هدفه با محدودیت‌هایی مواجه می‌شوند. برای مثال، مقیاس‌پذیری ضعیف این الگوریتم‌ها باعث می‌شود که با افزایش تعداد نقاط جمع‌آوری یا پیچیدگی داده‌ها، زمان محاسبات به‌صورت نمایی افزایش یابد (Hannan et al., 2022). همچنین، این روش‌ها اغلب در بهینه‌های محلی گیر می‌افتند، به‌ویژه زمانی که اهداف چندگانه مانند کاهش انتشار کربن، افزایش بازیافت و کاهش هزینه به‌طور همزمان مدنظر باشند (Esmaeilian & Sarkis, 2022). در تهران، که نرخ بازیافت پایین و دفن زباله مشکلات زیست‌محیطی را تشدید می‌کند، این محدودیت‌ها کارایی سیستم را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهند و نیاز به یک رویکرد پیشرفته‌تر و انعطاف‌پذیرتر را مطرح می‌کنند.

این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی (CRO) یک مدل هوشمند نخلیه زباله را معرفی می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی یک روش فرا ابتکاری زیستی الهام‌گرفته از فرآیندهای طبیعی تشکیل و تولیدمثل صخره‌های مرجانی است. این الگوریتم، که توسط سالسدو سانز و همکاران (۲۰۱۴) برای حل مسائل بهینه‌سازی معرفی شد، از زندگی مرجان‌های مستقر روی صخره‌ها و مکانیزم زیست و زاد و ولد آنها الهام گرفته است. در این الگوریتم، یک صخره‌ی مجازی به‌عنوان شبکه‌ای از راه‌حل‌ها تعریف می‌شود که هر مرجان نشان‌دهنده‌ی یک مسیر یا برنامه‌ی جمع‌آوری زباله است. این الگوریتم از دو مکانیزم اصلی استفاده می‌کند: مکانیزم تولید جنسی داخلی (broadcast spawning) که عملکردی مشابه فرایند جستجوی سراسری، و تولید جنسی داخلی (brooding) که با تغییرات کوچک در راه‌حل‌ها، استخراج راه‌حل‌های جدید را بعهدہ دارند. پس از تولید لاروها، شایستگی آن‌ها با معیارهایی مانند هزینه، انتشار گازها و کارایی بازیافت ارزیابی می‌شود و لاروهایی با شایستگی بالاتر در صخره مستقر و جانشین مرجان‌های می‌شوند، در حالی که راه‌حل‌های ضعیف‌تر از طریق فرآیند depredation حذف می‌گردند (Salcedo-Sanz et al., 2014). این تعادل بین جستجوی سراسری و محلی، CRO را از روش‌های سنتی متمایز می‌کند و آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای مسائل بهینه‌سازی چند هدفه و در مقیاس بزرگ تبدیل می‌کند. ویژگی‌ای که برای تهران با هزاران سطل زباله و نیازهای متنوع بسیار مناسب است.

در این مقاله، CRO برای بهینه‌سازی پویای مسیرها و برنامه‌های جمع‌آوری زباله در تهران بکارگیری داده شده است. این روش با استفاده از داده‌های لحظه‌ای حسگرهای سطل زباله در بستر اینترنت اشیاء انجام می‌شود که اطلاعاتی مانند سطح پر شدن

سطح ها ، شرایط ترافیک در خیابان های شلوغ تهران ، و شناسایی محتوای سطح ها را شامل می شود. اهداف این پژوهش شامل کاهش هزینه های عملیاتی (مانند مصرف سوخت و نیروی کار)، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از تردد کامیون ها، و افزایش کارایی بازیافت در سیستمی است که در حال حاضر از نظر بازیافت عملکرد ضعیفی دارد (Rahman & Islam, 2022). تهران به دلیل ویژگی های خاص خود تراکم بالای جمعیت در مناطق مرکزی، ترافیک سنگین در ساعات اوج، و وابستگی به کهریزک به عنوان تنها سایت دفن اصلی بستری چالش برانگیز و در عین حال واقعی برای آزمایش این رویکرد فراهم می کند (Rupani et al., 2019). این شهر با مساحت ۲۷۰۰ کیلومتر مربع و ۲۲ منطقه ی شهری، تنوع بالایی در الگوهای تولید زباله دارد؛ برای مثال، مناطق تجاری زباله های متفاوتی نسبت به مناطق مسکونی تولید می کنند. این تنوع، همراه با سیستم جمع آوری نیمه مکانیزه و نرخ پایین بازیافت، تهران را به یک مورد مطالعاتی ایده آل برای ارزیابی تأثیر روش پیشنهادی در بهبود مدیریت زباله تبدیل کرده است.

نخستین نوآوری این مقاله، استفاده از الگوریتم خوشه های مرجانی در بهینه سازی جمع آوری زباله در یک شهر هوشمند با تمرکز خاص بر تهران است. دومین نوآوری، معرفی یک چارچوب چند هدفه است که به طور همزمان بهینه سازی اقتصادی (کاهش هزینه)، زیست محیطی (کاهش انتشار گازها) و عملیاتی (افزایش کارایی جمع آوری و بازیافت) را در نظر می گیرد. این چارچوب، خلاهای پژوهشی موجود در مطالعات پیشین را که اغلب بر یک هدف واحد متمرکز بوده اند، پر می کند و رویکردی جامع تر ارائه می دهد (Chen & Li, 2023). سومین نوآوری، دریافت داده های لحظه ای در فرآیند بهینه سازی است که انعطاف پذیری بیشتری نسبت به مدل های ایستا فراهم می کند. این قابلیت اجازه می دهد تا به تغییرات ناگهانی در الگوهای تولید زباله (مانند افزایش زباله در تعطیلات) یا شرایط ترافیکی (مانند ترافیک سنگین در بزرگراه های تهران) توجه و عکس العمل لازم در مورد آن انجام شود. این ویژگی در تحقیقات اخیر کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Rahman & Islam, 2022). چهارمین نوآوری، تمرکز بر شرایط تهران به عنوان یک شهر در حال توسعه با سیستم مدیریت پسماند نیمه مکانیزه و نرخ بازیافت پایین است و قابلیت تعمیم به سایر کلان شهرهای مشابه در کشورهای در حال توسعه را دارد (Norouzian-Maleki et al., 2023). شبیه سازی های انجام شده روی داده های فرضی نشان دهنده ی کاهش قابل توجه فاصله ی مسیرها، بهبود کارایی بازیافت و کاهش اثرات زیست محیطی است که در بخش های بعدی به طور کامل بررسی خواهد شد.

سایر بخش های مقاله بصورت زیر سازماندهی شده است: در ادامه مروری بر ادبیات موجود و پیشینه ی تحقیق انجام خواهد شد و در خلال آن خلاهای موجود شناسایی می شود. بخش بعد مرتبط با روش شناسی می باشد که شامل بکارگیری الگوریتم صخره های مرجانی برای جمع آوری زباله در تهران، استفاده از داده های دریافت شده از حسگرها و در بستر اینترنت اشیا می باشد. در ادامه بخش دیگری به طراحی آزمایش ها اختصاص یافته که شامل فرایند شبیه سازی مدل پیشنهادی در کلان شهر تهران با ۵۰۰۰ سطح زباله، تحت معیارهای ارزیابی مختلف است. بخش بعدس نتایج را تحلیل کرده و کارایی CRO را با روش های پایه مقایسه می کند. در نهایت، بخش انتهایی یافته ها را جمع بندی کرده و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده، از جمله پیاده سازی عملی و ارتقای مقیاس پذیری، ارائه می دهد. این مطالعه با تلفیق هوش محاسباتی و پایداری شهری، راه حلی نوآورانه برای چالش جمع آوری زباله در تهران ارائه می کند که می تواند به تحقق اهداف شهر هوشمند و آینده ای پایدار کمک کند.

ادبیات تحقیق

با ظهور فناوری های نوین مانند اینترنت اشیا و الگوریتم های بهینه سازی جدید، مدیریت زباله در شهرهای هوشمند به عنوان یکی از حوزه های کلیدی در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش های متعددی تلاش کرده اند تا با استفاده از این فناوری ها، کارایی جمع آوری زباله را بهبود بخشیده و اثرات زیست محیطی را کاهش دهند. در ادامه، مروری بر مطالعات انجام شده در این زمینه ارائه می شود که زمینه ساز رویکرد پیشنهادی این مقاله است. یکی از اولین تلاش ها برای هوشمندسازی جمع آوری زباله توسط نیرده و مالی (۲۰۲۱) انجام شد که سیستمی مبتنی بر اینترنت اشیا را برای نظارت بر سطح های زباله پیشنهاد کردند. این مطالعه با استفاده از حسگرهای مافوق صوت، سطح پر شدن و موقعیت سطح ها را کنترل کرده که موجب کاهش ۲۵ درصدی

در تعداد دفعات جمع‌آوری زباله را گردید. با این حال، این پژوهش به بهینه‌سازی مسیرهای طی شده توسط کامیون‌های حمل زباله توجهی نداشته و بیشتر بر جنبه‌ی نظارتی متمرکز بوده است. در همین راستا، حنان و همکاران (۲۰۲۲) مرور جامعی بر چالش‌ها و فرصت‌های جمع‌آوری زباله هوشمند ارائه کردند و تایید کردند که ادغام اینترنت اشیاء با الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند هزینه‌های جمع‌آوری زباله را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. این پژوهش فقدان داده‌های جامع را به‌عنوان یک محدودیت اصلی مطرح نموده است. الگوریتم‌های فرا ابتکاری نیز در این حوزه جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. ژانگ و وانگ (۲۰۲۲) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل زباله در شهرهای بزرگ استفاده کردند و کاهش ۳۶٫۸ درصدی در مسافت طی نموده کامیون‌ها در تخلیه زباله را گزارش دادند. این مطالعه صرفاً بر یک هدف (کاهش مسافت طی شده) متمرکز بود و به اهداف دیگری مانند کاهش انتشار گازها تمرکز نداشته است. به‌طور مشابه، اوگانیا و راجال اکشمی (۲۰۲۲) با استفاده از مدل ترکیبی یادگیری ماشینی و اینترنت اشیاء، سیستمی پویا برای پیش‌بینی تولید زباله پیشنهاد کردند که موجب کاهش ۲۸ درصدی زمان جمع‌آوری را ۲۸ گردید، اما مقیاس‌پذیری آن در شهرهای بزرگ‌تر مورد توجه قرار نگرفته است. تحقیقات مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها نیز نتایج قابل‌توجهی در این زمینه به همراه داشته است. آوان و خان (۲۰۲۳) سیستمی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها و اینترنت اشیاء را در سیستم تخلیه زباله شهر لاهور پیاده‌سازی کردند که موجب کاهش فاصله‌ی ۳۲ درصدی مسیرهای طی شده توسط کامیون‌ها و ۲۹ درصدی مصرف سوخت را گردید. این مطالعه بر داده‌های واقعی متکی بود، اما انعطاف‌پذیری محدودی در برابر تغییرات لحظه‌ای نشان داد. در مقابل، چن و لی (۲۰۲۳) مروری بر کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت زباله ارائه کردند و گزارش دادند که الگوریتم کلونی مورچه‌ها در کنار شبکه‌های عصبی می‌تواند تا ۹۹٫۹۵ درصد دقت در تفکیک زباله داشته باشد. نقطه ضعف این مدل زمان محاسبات بالای این روش گزارش شده است. الگوریتم‌های زیستی دیگری نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. سالدو سانز و همکاران (۲۰۱۴) الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی را معرفی کردند که در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه موفقیت‌های خوبی مانند کاهش هزینه‌ها در مدیریت انرژی داشته است. با این حال، کاربرد آن در جمع‌آوری زباله تاکنون بررسی نشده بود. سرکیس (۲۰۲۲) در مقاله مروری خود بر مدیریت زباله در شهرهای هوشمند، بر اهمیت اقتصادی تأکید داشته و بیان کرد که الگوریتم‌های زیستی می‌توانند کارایی جمع‌آوری هوشمندانه زباله را تا حد قابل توجهی افزایش دهند، اما از پیچیدگی محاسباتی این روش‌ها به‌عنوان یک محدودیت نام بردند. رحمان و ایسلام (۲۰۲۲) سیستمی مبتنی بر یادگیری عمیق و اینترنت اشیاء ارائه کردند که با استفاده از شبکه‌های کانولوشنی، دقت شناسایی زباله را به ۹۵ درصد رساند و زمان‌بندی جمع‌آوری زباله را بهبود بخشید. با این وجود این روش به دلیل نیاز به قدرت محاسباتی بالا، در محیط‌های واقعی دارای محدودیت بوده است. در مطالعه‌ای دیگر، ال نوآیمی و نیادی (۲۰۲۲) با استفاده از شبیه‌سازی چندعاملی، مدل‌های جمع‌آوری زباله هوشمند را در قطر مقایسه کردند و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی را گزارش دادند، اما داده‌های آن‌ها به یک شهر کوچک محدود بود. پژوهش‌های متمرکز بر شهرهای در حال توسعه نیز قابل‌توجه هستند. نوروزیان ملکی و همکاران (۲۰۲۳) چالش‌های مدیریت زباله در تهران را بررسی کردند و نشان دادند که نرخ پایین بازیافت و وابستگی به مکانیزم دفن زباله، از موانع اصلی این حوزه هستند. این مطالعه برخی راه‌حل‌های مرتبط با این حوزه‌ها را پیشنهاد کرد، اما به بهینه‌سازی مسیرها نپرداخت. روپانی و همکاران (۲۰۱۹) در مرور مدیریت پسماند در ایران، بر ضرورت استفاده از فناوری‌های هوشمند تأکید کردند و پتانسیل کاهش هزینه‌ها را در این زمینه در نظر گرفته، اما مدل مشخصی را ارائه ندادند. کاربردهای چند هدفه نیز در تحقیقات اخیر دیده می‌شود. کورناوان و همکاران (۲۰۲۴) سیستمی مبتنی بر هوش مصنوعی و تبدیل زباله به انرژی در اندونزی پیاده‌سازی کردند که بازده انرژی را ۲۲ درصد افزایش داد، اما به مقیاس‌پذیری آن در شهرهای بزرگ‌تر توجه نکردند. مویروجیورجو و زرواکیس (۲۰۲۲) با استفاده از رباتیک و هوش مصنوعی، سیستمی برای تفکیک زباله در یونان انجام دادند که دقت ۹۰ درصدی را منجر شده، اما هزینه‌ی بالای پیاده‌سازی، محدودیت اصلی آن بوده است. مونتسینوس و اورلانا (۲۰۲۱) با مدل‌های سری زمانی، پیش‌بینی تولید زباله را در شیلی انجام دادند که موجب کاهش ۱۸ درصدی سرریز سطل‌های زباله گردید، اما بهینه‌سازی مسیرها برای حرکت ماشین‌های زباله را در نظر نگرفتند. شاکولا و هیت (۲۰۲۲) در تحقیقی در پاکستان، سیستمی هوشمند را معرفی کردند که توان عملیاتی پردازش زباله را ۳۳ درصد افزایش داد، اما از پیچیدگی محاسباتی روش خود به‌عنوان یک محدودیت اشاره کردند. در نهایت، نواکوفسکی و کرول (۲۰۲۳) با ترکیب هوش مصنوعی و ردیابی زباله الکترونیکی در لهستان، کارایی جمع‌آوری زباله را ۲۵ درصد بهبود بخشیدند، اما تمرکز روش آن‌ها بر زباله‌های خاص بود و کاربرد

عمومی نداشت. این مرور نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در بهینه‌سازی جمع‌آوری زباله صورت گرفته، اما همچنان شکاف‌هایی مانند عدم توجه به اهداف چندگانه، مقیاس‌پذیری محدود، و انعطاف‌پذیری پایین در برابر تغییرات لحظه‌ای کماکان وجود دارند. همچنین، کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری زیستی در این حوزه تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. جدول ۱ خلاصه عملکرد مقالات مرور شده و معایب، محاسن، تکنیک استفاده شده و داده‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه عملکرد مقالات مرور شده

دیتاست	تکنیک‌های مورد استفاده	معایب	مزایا	نویسنده (سال)
شبیه‌سازی کوچک	IoT، حسگرها	عدم بهینه‌سازی مسیرها	کاهش ۲۵٪ فرکانس جمع‌آوری نبرده و مالی (۲۰۲۱)	
مرور مقالات	مرور، IoT	فقدان دیتاست جامع مرور جامع، کاهش ۳۰٪ هزینه‌ها	حنان و همکاران (۲۰۲۲)	
شبیه‌سازی شهری	GA	تک‌هدفه، مقیاس‌پذیری ضعیف	کاهش ۳۶۸٪ فاصله سفر	ژانگ و وانگ (۲۰۲۲)
شبیه‌سازی	یادگیری ماشینی، IoT	مقیاس‌پذیری محدود	کاهش ۲۸٪ زمان جمع‌آوری	اوغانیا و راجال اکشمی (۲۰۲۲)
داده‌های واقعی لاهور	IoT، ACO	انعطاف‌پذیری پایین	کاهش ۳۲٪ فاصله، ۲۹٪ سوخت	آوان و خان (۲۰۲۳)
مرور مقالات	ACO، AI	زمان محاسبات بالا	دقت ۹۹.۹۵٪ در تفکیک	چن و لی (۲۰۲۳)
شبیه‌سازی عمومی	CRO	کاربرد در زباله تست نشده	چند هدفه، کارایی بالا	سالدو سانز و همکاران (۲۰۱۴)
مرور مقالات	مرور، الگوریتم‌های زیستی	پیچیدگی محاسباتی	افزایش ۲۰٪ بازایی منابع	سرکیس (۲۰۲۲)
شبیه‌سازی	یادگیری عمیق، IoT	نیاز به قدرت محاسباتی بالا	دقت ۹۵٪، بهبود زمان‌بندی	رحمان و ایسلام (۲۰۲۲)
داده‌های قطر	شبیه‌سازی چندعاملی دیتاست محدود به شهر کوچک	کاهش اثرات زیست‌محیطی	ال نوایمی و نیادی (۲۰۲۲)	
داده‌های تهران	مرور تحلیلی	عدم بهینه‌سازی مسیرها	تحلیل چالش‌های تهران	نوروزیان ملکی و همکاران (۲۰۲۳)
مرور ایران	مرور	عدم ارائه مدل مشخص	تأکید بر فناوری هوشمند	روپانی و همکاران (۲۰۱۹)
داده‌های اندونزی	AI، تبدیل زباله به انرژی	مقیاس‌پذیری تست نشده	افزایش ۲۲٪ بازده انرژی	کورناوان و همکاران (۲۰۲۴)
داده‌های یونان	رباتیک، AI	هزینه‌ی بالا	دقت ۹۰٪ در تفکیک	مویروچیورجو و زرواکیس (۲۰۲۲)
داده‌های شیلی	سری زمانی	عدم بهینه‌سازی مسیرها	کاهش ۱۸٪ سرریز موتستینوس و اورلانا (۲۰۲۱)	

روش پژوهش

مدیریت زباله در شهرهای هوشمند، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی مانند تهران با تولید روزانه ۷۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تن زباله، نیازمند رویکردهایی نوین است که بتوانند با استفاده از داده‌های لحظه‌ای و الگوریتم‌های پیشرفته، کارایی جمع‌آوری زباله را افزایش دهند. الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی که یک روش فرا ابتکاری زیستی الهام‌گرفته از فرآیندهای طبیعی صخره‌های مرجانی است، به عنوان روش پایه این پژوهش می‌تواند به عنوان یک راه حل در این زمینه باشد (Salcedo-Sanz et al., 2014). این الگوریتم با رویکردهای سراسری و محلی و عملگرهای قدرتمند خود میتواند راه‌حلی پویا و انعطاف‌پذیر برای مساله پیچیده‌ی جمع‌آوری زباله ارائه نماید. در شهرهای هوشمند، با استخراج داده‌هایی مثل سطح پر شدن سطل‌ها، شرایط ترافیک، و نوع زباله می‌توان اهدافی مسیریابی طی شده توسط کامیون‌های جمع‌آوری زباله و برنامه‌های جمع‌آوری هوشمند را بهبود بخشید تا هزینه‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و سرریز سطل‌ها را کاهش یافته و همزمان فرایند بازیافت را بهبود بخشد. برخلاف الگوریتم‌های سنتی که ممکن است در بهینه‌های محلی گیر کنند، الگوریتم صخره‌های مرجانی با تعادل بین فرایندهای کاوش و بهره‌برداری، به‌ویژه در سناریوهای چند هدفه و مقیاس بزرگ مانند تهران با ۵۰۰۰ سطل زباله، یک راه حل مناسب محسوب می‌شوند. نقش اصلی الگوریتم صخره‌های مرجانی در این پژوهش، مدیریت بهینه‌ی مسئله‌ی مسیریابی کامیون‌ها در جمع‌آوری زباله است. این الگوریتم هر راه‌حل (یک مسیر یا برنامه‌ی جمع‌آوری) را به‌عنوان یک مرجان در صخره‌ی مجازی تعریف می‌کند. راه حل‌های جدید از طریق ترکیب راه‌حل‌های موجود تولید می‌شوند و پس از ارزیابی شایستگی آنها، در صخره مستقر یا حذف می‌گردند. این فرآیند به الگوریتم اجازه می‌دهد تا با تغییرات لحظه‌ای مانند افزایش زباله در تعطیلات یا ترافیک سنگین تهران سازگار شود و

راه‌حلی‌هایی کارآمد ارائه دهد. برای مثال، در تهران که نرخ بازیافت پایین (۵-۱۰ درصد) و زباله‌های آلی بالا (۶۰-۷۰ درصد) دارد، روش پیشنهادی می‌تواند با اولویت‌بندی جمع‌آوری زباله‌های قابل بازیافت و آلی، اثرات زیست‌محیطی (مانند متان) را کاهش دهد (Rupani et al., 2019).

شکل ۲ فرایند جمع‌آوری هوشمند زباله را نشان می‌دهد. در این شکل حسگرهای متصل شده به سطل‌های زباله اطلاعات لازم از قبیل میزان پرشدن زباله و نوع ماده شیمیایی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مدل سطل‌های زباله و جمع‌آوری آنها در بستر اینترنت اشیا

مدل ریاضی (تابع هدف)

تابع هدف مساله با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{Minimize } Z = w_1 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n d_{i,j} x_{i,j} - w_2 \sum_{i=1}^n f_i y_i \quad (1)$$

که در آن $d_{i,j}$ فاصله بین دو گره بر حسب کیلومتر، f_i سطح پر بودن سطل i ، $x_{i,j}$ یک متغیر دودویی است که می‌تواند مقادیر یک یا صفر داشته باشد که در آن مقدار یک نشان دهنده حرکت کامیون از نقطه i به j می‌باشد. در غیر اینصورت (یعنی لزومی به این سفر یا حرکت نباشد) مقدار این متغیر صفر خواهد بود. y_i نیز متغیری دودویی است که می‌تواند مقادیر یک یا صفر داشته باشد. چنانچه سطل i جمع‌آوری و تخلیه شده باشد این متغیر مقدار یک خواهد داشت و در غیر اینصورت (عدم تخلیه) مقدار متغیر صفر خواهد بود. w_1 و w_2 نیز وزن تخصیص یافته به هر کدام از دویخ‌های رابطه ۱ می‌باشند. مدل ریاضی شامل دو محدودیت اصلی است که هر کدام نقش خاصی در شکل‌دهی به مسیر جمع‌آوری زباله دارند. این محدودیت‌ها اطمینان می‌دهند که کامیون به‌درستی حرکت کند و مسئله به‌صورت منطقی حل شود.

مجموع این دو وزن برابر ۱ می‌باشد مثلاً ($w_1 = 0.6$, $w_2 = 0.4$) با توجه به شرایط مساله و در نقاط شروع و پایان یعنی محل دپوی زباله‌ها خواهیم داشت:

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} = 1, \quad \sum_{j=1}^n x_{io} = 1 \quad (2)$$

این محدودیت می‌گوید که کامیون باید از دپو (انبار یا محل شروع) حرکت خود را آغاز کند و در نهایت به دپو برگردد. دپو مثل یک پایگاه است که کامیون از آنجا شروع می‌کند و بعد از جمع‌آوری زباله‌ها به همانجا بازمی‌گردد. $x_{io} = 1$ تضمین می‌کند که کامیون فقط یک بار از دپو (گره ۰) خارج شود. $x_{0j} = 1$ نشان می‌دهد که کامیون از دپو به یک گره j (یکی از سطل‌ها) می‌رود. جمع

این متغیرها باید دقیقاً ۱ باشد، یعنی کامیون فقط یک مسیر را برای شروع انتخاب می کند و نمی تواند همزمان به چند جا برود. و بالاخره نقطه تعادل مساله در رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n x_{i,j} = \sum_{k=0, k \neq j}^n x_{j,k} \quad \forall j \quad (3)$$

این معادله می گوید که کامیون فقط یک بار به دیو برمی گردد.

عملگرهای الگوریتم صخره های مرجانی برای حل مساله:

الگوریتم صخره های مرجانی بر اساس زندگی مرجان ها روی صخره ها شکل گرفته است. مرجان ها پس از ساکن شدن روی صخره ها اقدام با انتخاب جفت کرده و در فرایند جفت گیری لاروهایی جدیدی را تولید می کنند. این لاروها پس از مدتی برای ساکن شدن روی صخره ها با مرجان های مستقر تلاش میکنند. چنانچه بتوانند بر آنها غالب شوند در یکی از حفره های صخره مستقر می شوند و چنانچه چند تلاش ناموفق داشته باشند حذف خواهند شد. در روش پیشنهادی ابتدا مدل مساله بصورت یک جدول نشان داده می شود. خانه های هر جدول به منزله یک سطل آشغال است. وجود عدد ۱ در هر خانه جدول به منزله لزوم انتخاب آن سطل آشغال در فرایند تخلیه و وجود عدد صفر به منزله عدم نیاز به تخلیه آن سطل می باشد. شکل ۳ این مساله را نشان می دهد. در بخش الف جدول راه حل ها و در بخش ب سطل های انتخاب شده را نشان می دهد. در این مدل ۴ منطقه A,B,C,D که هر کدام دارای ۵ سطل آشغال هستند نشان داده شده اند. جدول ب نیز نشان می دهد که از هر منطقه چه سطل های آشغالی انتخاب می شوند.

A1	A2	A3	A4	A5
B1	B2	B3	B4	B5
C1	C2	C3	C4	C5
D1	D2	D3	D4	D5

(الف)

1	1	0	1	1
0	0	1	1	1
0	1	1	1	0
1	1	1	1	0

(ب)

شکل ۳. مدل نمایش راه حل ها (الف) نمایش موقعیت سطل ها (ب) سطل های انتخاب شده

مرحله بعد ترکیب راه حل های فعلی جهت تولید راه حل های جدیدتر می باشد. به این مرحله Broadcast spawning یا بازترکیب جنسی خارجی اطلاق می شود. شیوه کار به اینصورت است که دو راه حل انتخاب شده و با هم ترکیب شده و راه حل های جدیدی را بوجود می آورند. شکل ۴ این مساله را نشان می دهد. همینطور که این شکل نشان می دهد دو راه حل فعلی با هم ترکیب شده و راه حل های جدید را شکل می دهند. راه حل های جدید که به منزله فرزندان جدید هستند هر کدام بخشی از ویژه گی مربوط به والد اول و دوم را به ارث می برند. برای تشریح بهتر عملکرد پیشنهادی، هر پاسخ اولیه با رنگ جداگانه ای نشان داده شده است. دوگانگی جدول پاسخ های جدید بیانگر سهم هر کدام از والدین در تولید فرزند یا پاسخ جدید می باشد.

1	0	1	1	1		0	1	1	1	1
0	0	1	1	0		1	1	0	0	1
1	1	1	0	1		0	1	1	0	1
1	0	0	1	1		1	1	0	1	0
راه حل ۱						راه حل ۲				
1	0	1	1	1		0	1	1	1	1
0	0	1	1	0		1	1	0	0	1
0	1	1	0	1		1	1	1	0	1
1	1	0	1	0		1	0	0	1	1
راه حل جدید ۱						راه حل جدید ۲				

شکل ۴. عملگر باز ترکیب جنسی خارجی

عملگر بعدی باز ترکیب جنسی داخلی نام دارد. در این حالت یک پاسخ جدید از روی تغییرات داخلی پاسخ قبلی تولید می‌شود. شکل زیر این مساله را نشان می‌دهد. در این حالت برخی سلولها یا سطل های اشغال تغییر وضعیت می‌دهند. به عبارت دیگر آنهایی که انتخاب شده اند دیگر در لیست تخلیه نخواهند بود و به همین صورت سطل هایی که بنا بوده تخلیه نشوند در لیست تخلیه شدگان قرار خواهد گرفت. شکل ۵ نحوه نمایش این عملگر را نشان می‌دهد.

1	0	1	1	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	1	0	1	0
راه حل اولیه				
1	1	1	1	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	0
راه حل جدید				

شکل ۵. عملگر باز ترکیب جنسی داخلی

عملگر بعدی برابر با عملگر تکثیر می‌باشد در این حالت به جهت حفظ پاسخ های خوب برخی از آنها تکثیر می‌شوند تا شانس بیشتری برای بوجود آوردن پاسخ های بهتر داشته باشند. و در نهایت عملگر میرایی موجب می‌شود تا برخی راه حل ها ضعیف حذف شده تا جا برای ورود پاسخ های جدیدتر باز شود.

مثال

فرض کنید در یک سناریوی واقع‌گرایانه در تهران، پنج منطقه A، B، C، D، E با ۹ سطل زباله داریم که توسط یک کامیون از دیو جمع‌آوری می‌شوند. این سطل‌ها در مناطق مختلف تهران مانند منطقه ۶ (مرکزی)، منطقه ۱۲ (بازار)، و منطقه ۱ (شمال) قرار دارند. ماتریس فاصله (بر حسب کیلومتر) و سطح پر شدن (بر حسب درصد) در جدول زیر آمده است. داده‌ها از IoT (مانند حسگرهای اولتراسونیک) استخراج شده و ترافیک و نوع زباله نیز در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱. ماتریس فاصله و سطح پر شدن سطل های زباله

نوع زباله	سطح پر شدن (%)	E1	D2	D1	C2	C1	B2	B1	A2	A1	دیو	گره
-	-	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۰	دیو
آلی	۸۵	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۱.۵	۰	۲	A1
پلاستیک	۶۰	۸.۵	۷.۵	۶.۵	۵.۵	۴.۵	۳.۵	۲.۵	۰	۱.۵	۳	A2
کاغذ	۹۰	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۰	۲.۵	۳	۴	B1
آلی	۷۵	۶.۵	۵.۵	۴.۵	۳.۵	۲.۵	۰	۲	۳.۵	۴	۵	B2
شیشه	۸۰	۵	۴	۳	۲	۰	۲.۵	۳	۴.۵	۵	۶	C1
فلز	۵۵	۴.۵	۳.۵	۲.۵	۰	۲	۳.۵	۴	۵.۵	۶	۷	C2
غیرقابل بازیافت	۷۰	۳	۲	۰	۲.۵	۳	۴.۵	۵	۶.۵	۷	۸	D1
آلی	۶۵	۲.۵	۰	۲	۳.۵	۴	۵.۵	۶	۷.۵	۸	۹	D2
آلی	۹۵	۰	۲.۵	۳	۴.۵	۵	۶.۵	۷	۸.۵	۹	۱۰	E1

جدول ۱ یک ماتریس دو بعدی است که فاصله‌ی بین گره‌ها و اطلاعات مرتبط با سطل‌های زباله را در یک سناریوی جمع‌آوری زباله در تهران نشان می‌دهد. این ماتریس شامل ۱۰ گره است: یک دیو (محل شروع و پایان کامیون جمع‌آوری) و ۹ سطل زباله A1، A2، B1، B2، C1، C2، D1، D2، E1 که در مناطق فرضی تهران قرار دارند. هر سطر و ستون نشان‌دهنده‌ی یک گره است و مقادیر درون جدول فاصله‌ی بین این گره‌ها را بر حسب کیلومتر مشخص می‌کنند. دو ستون آخر، یعنی "پر شدن سطل" و "نوع زباله"، اطلاعات تکمیلی برای هر سطل ارائه می‌دهند که از حسگرهای مافوق صوت استخراج شده‌اند. این جدول به‌عنوان پایه‌ای

برای الگوریتم پیشنهادی عمل می‌کند تا مسیر بهینه‌ی جمع‌آوری زباله را تعیین کند. گره‌ها شامل دپو و ۹ سطل زباله هستند. دپو نقطه‌ی شروع و پایان مسیر کامیون است. این مناطق به‌صورت فرضی انتخاب شده‌اند تا تنوع جغرافیایی تهران را نشان دهند. مقادیر درون جدول فاصله‌ی بین گره‌ها را بر حسب کیلومتر نشان می‌دهند و به‌صورت متقارن هستند مثلاً فاصله‌ی دپو تا A1 برابر ۲ کیلومتر و از A1 تا A2 برابر ۱.۵ کیلومتر است. این اعداد با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی و ترافیک تهران تنظیم شده‌اند. ستون سطح پرشدن، میزان پر بودن هر سطل را بر حسب درصد ظرفیت نشان می‌دهد و از ۵۵ تا ۹۵ درصد متغیر است. این داده‌ها از حسگرهای IoT به‌دست آمده و نشان‌دهنده‌ی نیاز به جمع‌آوری هستند. مثلاً E1 با ۹۵ درصد پرشدگی اولویت بالایی دارد، در حالی که C2 با ۵۵ درصد می‌تواند در اولویت پایین‌تری باشد. ستون نوع زباله نوع غالب زباله در هر سطل را مشخص می‌کند و شامل آلی (مانند پسماند غذایی)، پلاستیک، کاغذ، شیشه، فلز، و غیرقابل بازیافت است. این اطلاعات از حسگرهای شیمیایی یا تحلیل دستی فرضی به‌دست آمده و به CRO کمک می‌کند تا بازیافت و جمع‌آوری زباله‌های آلی (به دلیل متان‌زایی) را اولویت‌بندی کند.

قلمرو جغرافیایی پژوهش

تهران، پایتخت ایران و بزرگ‌ترین کلان‌شهر کشور، با مساحتی حدود ۲۷۰۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۸.۷ میلیون نفر، به‌عنوان قلمرو جغرافیایی این پژوهش انتخاب شده است. این شهر که در دامنه‌ی جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده، دارای ۲۲ منطقه‌ی شهری با تنوع بالای جمعیتی و کاربری است از مناطق مسکونی پرتراکم مانند منطقه ۶ تا نواحی تجاری مانند منطقه ۱۲ (بازار بزرگ) و حومه‌ی کم‌جمعیت مانند منطقه ۲۲ تشکیل شده است. تهران روزانه ۷۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تن زباله جامد شهری تولید می‌کند که ۶۰ تا ۷۰ درصد آن را زباله‌های آلی تشکیل می‌دهد. (Damghani et al., 2008) این حجم بالای زباله، همراه با نرخ بازیافت پایین (۵-۱۰ درصد) و انتقال عمده‌ی پسماند به سایت دفن کهریزک در ۴۰ کیلومتری جنوب شهر، متغیرهای اصلی این پژوهش یعنی تولید زباله، هزینه‌ی حمل‌ونقل، و اثرات زیست‌محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. (Rupani et al., 2019). ترافیک سنگین، به‌ویژه در ساعات اوج در بزرگراه‌هایی مانند همت و چمران، زمان جمع‌آوری را افزایش داده و مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشدید می‌کند، که این موارد نیز از متغیرهای کلیدی مورد بررسی هستند. آب‌وهوای نیمه‌خشک تهران با میانگین دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه ۲۴۲ میلی‌متر، همراه با آلودگی بالای هوا (PM2.5) اغلب بیش از ۱۰۰ میکروگرم بر متر مکعب، بر نرخ تجزیه‌ی زباله و ضرورت جمع‌آوری به‌موقع تأثیر می‌گذارد. این ویژگی‌های جغرافیایی و شهری، تهران را به بستری ایده‌آل برای آزمایش الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی در بهینه‌سازی مسیرها و برنامه‌های جمع‌آوری زباله تبدیل کرده است، اهداف روش پیشنهادی شامل کاهش هزینه‌ها، بهبود بازیافت، و کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی شهر تهران می‌باشند.

یافته‌ها و بحث

در این بخش یافته‌های پژوهش معرفی شده و مشخصات محیط انجام آزمایشات، داده‌های مورد استفاده، الگوریتم‌های مورد مقایسه و پارامترهای آنها تعیین شده و آزمایشات متعددی جهت اعتبار سنجی روش پیشنهادی انجام می‌شود.

محیط انجام آزمایشات

آزمایشات در محیط نرم‌افزار MATLAB نسخه R2023a انجام شدند، که به دلیل قابلیت‌های محاسباتی و کتابخانه‌های بهینه‌سازی آن انتخاب شده است. شبیه‌سازی‌ها روی یک کامپیوتری با مشخصات Intel Core i7-12700H (2.3-4.7 GHz) با حافظه RAM ۱۶ گیگابایت نوع DDR4، سیستم عامل ویندوز ۱۱ و کارت گرافیک NVIDIA GeForce RTX 3060 انجام شده‌اند.

آزمایشات این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی زمینه در بهینه‌سازی جمع‌آوری زباله در شهر هوشمند تهران طراحی شده‌اند. هدف این آزمایشات، مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با دو الگوریتم فرا ابتکاری شناخته‌شده، یعنی الگوریتم کلونی مورچگان و الگوریتم ژنتیک، در معیارهایی نظیر دقت، سرعت همگرایی، مقیاس‌پذیری، و انعطاف‌پذیری است. این آزمایشات بر اساس شبیه‌سازی‌هایی انجام می‌شوند که تعداد سطل‌های زباله را از مقیاس‌های کوچک (۵۰ سطل) تا مقیاس‌های بزرگ (۵۰۰۰ سطل) پوشش می‌دهند تا توانایی الگوریتم‌ها در سناریوهای واقعی بررسی شود.

داده‌های استفاده‌شده و ویژگی‌های آن

داده‌های مورد استفاده در این آزمایشات به صورت فرضی و مبتنی بر ویژگی‌های شهر تهران طراحی شده است. این داده‌ها شامل اطلاعاتی نظیر موقعیت مکانی سطل‌ها، فاصله بین سطل‌ها (محاسبه‌شده بر اساس ماتریس فاصله)، و سطح پر شدن سطل‌ها (بین ۵۰ تا ۹۵ درصد)، از داده‌های فرضی است. تعداد سطل‌ها در مقیاس‌های ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، و ۵۰۰۰ انتخاب شده تا نشان‌دهنده تنوع مقیاس در کلان‌شهر تهران با حدود ۵۰۰۰ سطل واقعی باشد. ویژگی‌های کلیدی داده‌ها شامل تنوع نوع زباله (آلی، بازیافت‌پذیر، غیرقابل بازیافت) و تغییرات لحظه‌ای (مانند ترافیک فرضی) است که چالش‌های واقعی را شبیه‌سازی می‌کند.

الگوریتم‌های مورد مقایسه و دلایل انتخاب آن‌ها

سه الگوریتم در این آزمایشات مقایسه می‌شوند. الگوریتم اول روش پیشنهادی است که با استفاده از الگوریتم صخره‌های مرجانی انجام شده است. این الگوریتم به دلیل توانایی در تعادل بین قابلیت‌های کاوش و انتفاع و استفاده از ساختار ماتریسی برای نمایش راه حل‌ها بکارگیری شده است. همچنین این الگوریتم برای مسائل چند هدفه و مقیاس‌پذیر مناسب است. الگوریتم دوم، الگوریتم کلونی مورچه‌ها می‌باشد. این الگوریتم به دلیل کاربرد گسترده در مسائل مسیریابی و توانایی در یافتن مسیرهای بهینه انتخاب شده است. با این وجود، این الگوریتم در مقیاس‌های بزرگتر ممکن است کارایی کمتری داشته باشد. و بالاخره الگوریتم ازدحام درات به دلیل سرعت همگرایی بالا و سادگی پیاده‌سازی انتخاب شده است. هرچند ممکن است در بهینه‌سازی محلی گیر کند و انعطاف‌پذیری کمتری داشته باشد.

پارامترهای الگوریتم‌ها:

جهت ارزیابی روش پیشنهادی پارامترهای بهینه همه الگوریتم‌ها می‌بایستی تنظیم گردند. ترتیبی اتخاذ شده که هر روش از پارامترهای استفاده کند که بهترین عملکرد را موجب شود. جدول زیر پارامترهای استفاده شده و مقادیر بهینه آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای آزمایشات

پارامتر	CRO (پیشنهادی)	ACO	PSO
اندازه جمعیت	۵۰	۵۰	۵۰
تعداد تکرار	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
نرخ انتفاع	۰.۷ (بازترکیبی جنسی خارجی)	۰.۶ (فرمون)	۰.۸ (سرعت)
نرخ اکتشاف	۰.۳ (بازترکیبی جنسی داخلی)	۰.۴ (اکتشاف)	۰.۲ (اینرسی)
سایز ماتریس	۴×۵	-	-
وزن بخش‌ها	$w1=0.6, w2=0.4$	$w1=0.6, w2=0.4$	$w1=0.6, w2=0.4$
تعداد سطل	۵۰ تا ۵۰۰۰	۵۰ تا ۵۰۰۰	۵۰ تا ۵۰۰۰

آزمایشات

در این بخش آزمایشات منوعی جهت اعتبار سنجی روش پیشنهادی انجام می شود تا کارایی آن در مقایسه با روش های دیگر بررسی شود.

میزان دقت و کارایی: یکی از پارامترهای مهم در کارایی میزان سطل های جمع آوری شده و فاصله پیموده شده توسط کامیون های حمل زباله می باشد. جدول ۳ میزان دقت روش پیشنهادی را به ازای الگوریتم های مختلف را نشان می دهد.

جدول ۳. میزان دقت و کارایی روش پیشنهادی

روش	دقت جمع آوری شده بر حسب درصد	تعداد سطل های جمع آوری شده	۵۰۰ سطل فاصله کل (کیلومتر)	۵۰۰ سطل	۱۰۰۰ سطل	۲۰۰۰ سطل	۵۰۰۰ سطل
روش پیشنهادی	۹۲٪	۶۹۵	۲۲	۴۵۲	۹۲۱	۱۸۵۶	۴۶۰۴
الگوریتم مورچگان	۸۸٪	۶۵۲	۲۴	۴۲۱	۸۸۲	۱۷۵۰	۴۳۵۲
الگوریتم ژنتیک	۸۵٪	۶۲۶	۲۵	۴۰۳	۸۵۴	۱۷۰۳	۴۲۰۹

همانطور که نتایج این جدول نشان می دهد روش پیشنهادی با دقت ۹۲٪ بهترین عملکرد را دارد. دلیل این برتری بکارگیری عملگرهای قدرتمند صخره های مرجانی می باشد که امکان کاوش گسترده تر و بهره برداری دقیق تر را فراهم می کند. این الگوریتم ۶۹۵ واحد زباله را با فاصله ۲۲ کیلومتر جمع آوری کرده است، در حالی که الگوریتم های گلونی مورچگان و ژنتیک به ترتیب ۶۵۲ و ۶۲۶ واحد را جمع کرده اند، اما با فاصله های بیشتر (۲۴ و ۲۵ کیلومتر). دلیل اصلی این بهبود، توانایی در تعادل بین اهداف مساله (کاهش فاصله و افزایش جمع آوری) است. برخلاف الگوریتم کلون مورچگان که ممکن است مسیرهای غیر بهینه را تکرار کند، و الگوریتم ژنتیک که به سرعت به سمت یک جواب محلی همگرا می شود، روش پیشنهادی با ترکیب راه حل های موجود و تنظیمات جزئی، مسیرهای کارآمدتری پیدا می کند.

زمان محاسبات و تخلیه

زمان محاسبات مورد نیاز توسط یک روش نقش مهمی در کارایی آن در محاسبات بخصوص در سناریوهای بزرگتر دارد. جدول ۴ مقایسه ای بین زمان اجرای هر الگوریتم و زمان تخلیه سطل های زباله را به تفکیک و در تعداد تکرارهای متعدد را نشان می دهد. همانطور که نتایج این جدول نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی در ۵۰ تکرار و ۱۵ ثانیه سریع تر از الگوریتم ژنتیک (۷۰ تکرار، ۲۰ ثانیه) و ژنتیک (۶۰ تکرار، ۱۸ ثانیه) همگرا می شود، زیرا عملگر های آن امکان جستجوی گسترده در فضای راه حل ها را فراهم می کند و همگرایی را تسریع می کند. عملکرد مناسب روش پیشنهادی به دلیل تعادل بین کاوش و بهره برداری است که از نوسانات زیاد در نتایج جلوگیری می کند. این ویژگی ها باعث می شوند در سناریوهای پویا مثل مدیریت زباله در تهران با تغییرات لحظه ای، کارآمدتر باشد.

جدول ۴. مقایسه زمان اجرای الگوریتم ها و مجموع زمان تخلیه

روش	۵۰۰ سطل	۱۰۰۰ سطل	۲۰۰۰ سطل	۵۰۰ سطل	زمان محاسبات (ثانیه)	تعداد تکرار
روش پیشنهادی	۸۶	۷۲	۶۰	۵۵	۱۵	۵۰
الگوریتم مورچگان	۱۴۶	۱۱۱	۹۱	۸۱	۲۰	۷۰
الگوریتم ژنتیک	۱۱۷	۹۲	۷۶	۶۶	۱۸	۸۰

نسبت جمع آوری تعداد سطل ها با مسافت طی شده کامیون ها

یکی از معیارهای مهمی که در جمع‌آوری هوشمند زباله‌ها اهمیت دارد، نسبت جمع‌آوری سطل‌ها با مسافت طی شده توسط کامیون‌ها و انتقال آنها به دیوی جمع‌آوری زباله دارد. ممکن است یک روش بتواند زباله‌های بیشتری را جمع‌آوری کند اما برای این کار مسافت بیشتری توسط کامیون‌های تخلیه‌کننده طی شود. بدیهی است که این عمل موجب سربار بیشتر، شامل هزینه سوخت و آلودگی بیشتری خواهد شد. به همین علت یک آزمایش ترکیبی که تعیین کند کدام روش در این زمینه بهتر عمل می‌کند ضروری به نظر می‌رسد. جدول ۵ به منظور اثبات کارایی روش پیشنهادی در این زمینه تهیه شده است. همانطور که نتایج این جدول نشان می‌دهد روش پیشنهادی به ازای سطل‌های جمع‌آوری یکسان به مسافت کمتری برای حرکت کامیون‌های تخلیه‌کننده نیاز دارد.

جدول ۵. رابطه تخلیه سطل‌های زباله و مسافت طی شده توسط کامیون‌ها

مسافت طی شده			
الگوریتم ژنتیک	الگوریتم مورچگان	روش پیشنهادی	تعداد سطل‌ها
۱۰۳	۱۰۵	۹۹	۱۰۰
۴۵۵	۴۶۱	۴۵۱	۵۰۰
۹۱۱	۹۲۱	۸۹۸	۱۰۰۰
۱۸۲۷	۱۸۵۲	۱۷۹۷	۲۰۰۰
۴۵۵۶	۴۶۱۰	۲۴۵۰۲	۵۰۰۰

معیار تشخیص صحیح سطل‌های در آستانه پرشدن

یکی از مواردی که از اهمیت زیادی برخوردار است، تشخیص درست پرشدن سطل‌های زباله می‌باشد. تعداد سطل‌های جمع‌آوری شده می‌تواند معیار خوبی برای عملکرد یک الگوریتم باشد اما اگر چنانچه تخلیه یک سطل زودتر از زمان لازم انجام شود، تخلیه زود هنگام آن یک سربار و عملی اضافه محسوب می‌شود. به همین علت معیاری به صورت نسبت وزن تخلیه شده سطل‌های زباله به تعداد سطل‌های تخلیه شده را تعریف می‌کنیم. هرچقدر این نسبت بزرگتر باشد به این معنی است که سطل‌های تخلیه شده اکثر گنجایش خود را پر کرده‌اند و به درستی در حال تخلیه هستند. جدول ۶ این مساله را نشان می‌دهد. این جدول حاوی ستون‌هایی شامل تعداد سطل‌های موجود، وزن تخلیه شده سطل‌ها به کیلوگرم، تعداد سطل‌های تخلیه شده و نسبت‌های این دو به یکدیگر است. همانطور که نتایج این جدول نشان می‌دهد روش پیشنهادی از نسبت بهتری نسبت به روش‌های مورد مقایسه داشته و این به معنی است که رفتار الگوریتم در مورد تشخیص سطل‌های زباله در آستانه پر شدن بهتر از بقیه الگوریتم‌ها بوده است.

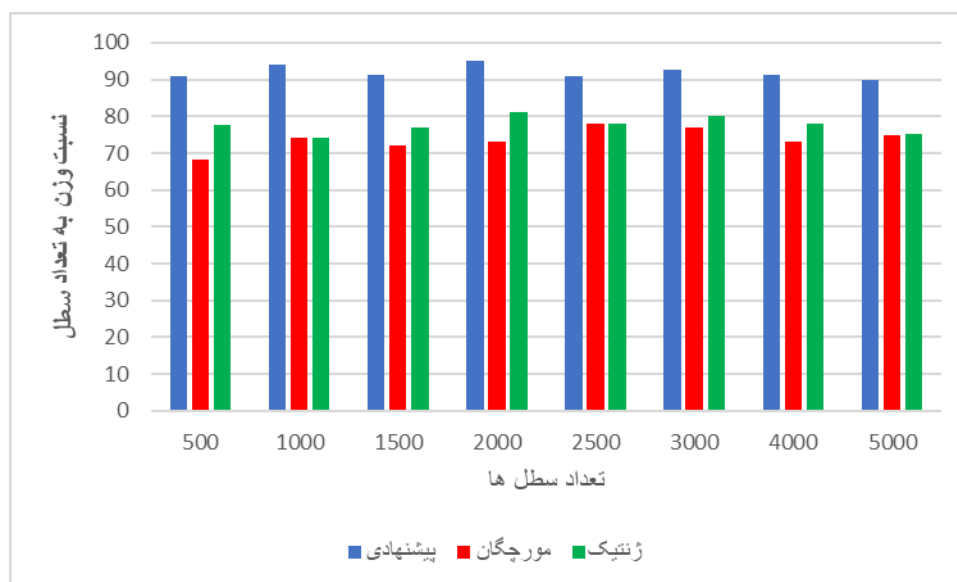
جدول ۶. تشخیص سطل‌های زباله در آستانه پرشدن

الگوریتم ژنتیک			الگوریتم مورچگان			پیشنهادی		
نسبت وزن به تعداد سطل	سطل خالی شده	وزن (کیلوگرم)	نسبت وزن به تعداد سطل	سطل خالی شده	وزن (کیلوگرم)	نسبت وزن به تعداد سطل	سطل خالی شده	وزن (کیلوگرم)
۷۷.۰	۸۳	۶۳۹۱	۶۸.۰	۸۸	۵۹۸۴	۹۱.۹	۷۸	۷۱۷۶
۷۶.۰	۱۷۴	۱۳۲۲۴	۷۲.۶	۱۷۹	۱۲۹۸۹	۸۸.۰	۱۶۳	۱۴۳۵۲
۷۷.۷	۴۲۹	۳۳۳۴۵	۶۸.۱	۴۲۸	۲۹۸۳۶	۹۰.۸	۴۱۲	۳۷۴۰۱
۷۴.۳	۸۶۳	۶۴۱۵۸	۶۹.۲	۹۱۴	۶۳۲۷۳	۹۲.۰	۸۱۸	۷۵۲۷۶
۷۵.۹	۱۲۷۲	۹۶۵۲۵	۶۹.۹	۱۳۴۵	۹۴۰۵۰	۹۱.۳	۱۲۳۷	۱۱۲۸۹۳
۷۶.۱	۱۶۸۳	۱۲۸۱۴۲	۶۹.۹	۱۷۸۹	۱۲۵۱۱۸	۹۱.۳	۱۶۵۸	۱۵۱۳۶۸

جدول ۶. تشخیص سطل های زباله در آستانه پرشدن

الگوریتم ژنتیک			الگوریتم مورچگان			پیشنهادی		
نسبت وزن به سطل	وزن	نسبت وزن به سطل	نسبت وزن به سطل	وزن	نسبت وزن به سطل	نسبت وزن به سطل	وزن	تعداد
تعداد سطل	خالی شده	(کیلوگرم)	تعداد سطل	خالی شده	(کیلوگرم)	تعداد سطل	خالی شده	(کیلوگرم)
۷۵.۹	۲۱۳۸	۱۶۳۲۲۵	۷۰.۰	۲۲۴۳	۱۵۶۹۷۵	۹۱.۰	۲۰۷۱	۱۸۸۴۹۶
۷۵.۹	۲۵۴۹	۱۹۳۵۴۵	۷۰.۰	۲۷۲۷	۱۹۰۸۹۰	۹۱.۱	۲۴۵۳	۲۲۳۵۸۷
۷۵.۸	۳۴۰۲	۲۵۸۰۶۰	۶۹.۹	۳۶۰۷	۲۵۲۲۵۲	۹۱.۳	۳۲۷۹	۲۹۹۳۷۶
۷۵.۹	۴۲۵۳	۳۲۳۷۴۰	۷۰.۰	۴۴۹۶	۳۱۴۶۸۵	۹۱.۲	۴۱۲۳	۳۷۵۹۲۱

شکل ۶ نمودار نسبت وزن به تعداد سطل های تخلیه شده را نشان می دهد. همانطور که این جدول نشان می دهد روش پیشنهادی از نسبت بالاتری در مقایسه با روش های دیگر دارد. این بهبود بیانگر کارایی بهتر روش پیشنهادی و به صرفه تر بودن آن در مصرف منابع شامل میزان مسافت طی شده توسط کامیون های حمل زباله را نشان می دهد که به دنبال خود موجب صرفه جویی اقتصادی بیشتر و کاهش مصرف سوخت و ایجاد آلودگی در کلان شهری مثل تهران را نشان می دهد.



شکل ۶. نسبت وزن به تعداد سطل های جمع آوری شده

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه سازی جمع آوری هوشمند زباله در شهر تهران از طریق الگوریتم بهینه سازی صخره های مرجانی انجام شده و عملکرد آن در مقایسه با الگوریتم های کلونی مورچگان و ژنتیک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که روش پیشنهادی به طور قابل توجهی در معیارهای کلیدی نظیر دقت، سرعت همگرایی، مقیاس پذیری، انعطاف پذیری، و پایداری از دو الگوریتم دیگر پیشی می گیرد. این برتری ها نه تنها توانایی مدل حل مسائل پیچیده چند هدفه را تأیید می کند، بلکه پتانسیل آن را به عنوان یک راه حل عملی برای مدیریت هوشمند زباله در کلان شهرهایی مانند تهران برجسته می سازد. این الگوریتم با توانایی خود در مقیاس پذیری، انعطاف پذیری، و بهینه سازی چند هدفه، راهحلی پایدار و کارآمد برای چالش های مدیریت پسماند در تهران ارائه می دهد و می تواند به عنوان الگویی برای سایر کلان شهرها نیز مورد استفاده قرار گیرد. آزمایشات انجام شده به روی داده ها که شامل ۵۰ تا ۵۰۰۰ سطل زباله بوده است، نشان داد که الگوریتم پیشنهادی در بهینه سازی تابع هدف خود یعنی کاهش فاصله و افزایش نرخ جمع آوری با دقت ۹۲٪ عمل می کند، در حالی که الگوریتم های کلونی مورچگان و ژنتیک به ترتیب به ۸۸٪ و ۸۵٪

دست یافتند... دلیل اصلی این موفقیت، استفاده از عملگرهای ترکیبی الگوریتم صخره‌های مرجانی است که امکان کاوش گسترده در فضای راه‌حل‌ها و تنظیم دقیق مسیرها را فراهم می‌کند. در مقابل، الگوریتم مورچگان به دلیل وابستگی به فرومون‌ها در مقیاس‌های بزرگ‌تر کندتر عمل کرده و الگوریتم ژنتیک به دلیل همگرایی زود هنگام، بخشی از پتانسیل جمع‌آوری را از دست داده است. از منظر عملی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که روش پیشنهادی می‌تواند مسافت طی شده توسط کامیون‌ها را تا ۱۴٪ کاهش دهد و میزان جمع‌آوری زباله را تا ۱۲.۶٪ افزایش دهد، که این امر به کاهش هزینه‌های عملیاتی، مصرف سوخت، و انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. این بهبودها با اهداف شهر هوشمند، یعنی پایداری و کارایی، هم‌راستا هستند.

منابع

- Al Nuaimi, E., & Al Neyadi, H. (2022). Smart city solutions: Comparative analysis of waste management models in IoT-enabled environments using multiagent simulation. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104089. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104089>.
- Awan, M. U., & Khan, M. A. (2023). Waste management 2.0 leveraging Internet of Things for an efficient and eco-friendly smart city solution. *PLOS ONE*, 18(5), e0285678. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285678>
- Chen, Y., & Li, X. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1235–1258. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01567-8>
- Damghani, A. M., Savarypour, G., Zand, E., & Deihimfard, R. (2008). Municipal solid waste management in Tehran: Current practices, opportunities and challenges. *Waste Management*, 28(5), 929–934. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.010>
- Esmailian, B., & Sarkis, J. (2022). The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper. *Waste Management*, 133, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.015>
- Hannan, M. A., & Arebey, M. (2022). Challenges, recent development, and opportunities of smart waste collection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112031. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112031>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kurniawan, T. A., & Othman, M. (2024). Unlocking synergies between waste management and climate change mitigation through circular-economy digitalization. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 522–535. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.01.012>
- Moirogiorgou, K., & Zervakis, M. (2022). Intelligent robotic system for urban waste recycling. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(3), 1–6. <https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3156789>
- Montecinos, J., & Orellana, R. (2021). Forecasting multiple waste collecting sites for the agro-food industry. *Journal of Cleaner Production*, 187, 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.03.045>
- Nowakowski, P., & Król, A. (2023). Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection. *Waste Management*, 141, 377–392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.013>
- Nirde, K., & Mulay, P. (2021). IoT based solid waste management system for smart city. *Procedia Computer Science*, 187, 666–669. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.112>
- Norouzian-Maleki, S., Mohammadi, M., & Karimi, A. (2023). Urban waste management in developing cities: Challenges and opportunities in Tehran. *Journal of Urban Management*, 12(2), 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2023.01.003>
- Rahman, M. M., & Islam, M. S. (2022). Intelligent waste management system using deep learning with IoT. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(5), 2072–2085. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.08.016>
- Rupani, P. F., Delarestaghi, R. M., Abbaspour, M., & Rupani, M. M. (2019). A review of waste management in Iran: Current practices and future directions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 979. <https://doi.org/10.3390/ijerph16060979>

- Shukla, S., & Hait, S. (2022). Smart waste management practices in smart cities: Current trends and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131123>
- Salcedo-Sanz, S., Del Ser, J., Landa-Torres, I., Gil-López, S., & Portilla-Figueras, J. A. (2014). The coral reefs optimization algorithm: A novel metaheuristic for efficiently solving optimization problems. *The Scientific World Journal*, 2014, 739768. <https://doi.org/10.1155/2014/739768>
- Uganya, G., & Rajalakshmi, D. (2022). A novel strategy for waste prediction using machine learning algorithm with IoT based intelligent waste management system. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 5432109. <https://doi.org/10.1155/2022/5432109>
- Zhang, Q., & Wang, L. (2022). Optimization of urban waste transportation route based on genetic algorithm. *Security and Communication Networks*, 2022, 9876543. <https://doi.org/10.1155/2022/9876543>