



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 Computer Engineering, Ra.C., 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: 07 April 2025

Received in revised form: 05 May 2025

Accepted: 23 May 2025

Published online: 04 April 2026

Keywords:

Smart City, Waste Collection Management, Internet of Things (IoT), Environmental Sensors, Coral Reef Optimization (CRO) Algorithm, Tehran City

ABSTRACT

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. 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. 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. 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. 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: Asghari, A., Azgomi, H., & Zoraghchian, A.A. (2026). Optimization of Waste Collection in Smart Cities (Case Study: Tehran City). *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 21(1), 23-37.

<https://doi.org/10.71633/jshsp.2026.1203324>



© 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.



بهینه‌سازی جمع‌آوری زباله در شهرهای هوشمند (مطالعه موردی: کلان شهر تهران)

علی اصغری^{۱*}، حسین ازگومی^۲ و علی عباس زورقچیان^۳

۱. گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی موسسه آموزش عالی شفق، تنکابن، نام ایران

۲. گروه مهندسی کامپیوتر، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۳. گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی صنعتی قائم، قائم شهر، ایران

* نویسنده مسئول: Email: Asghari_Ali@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

کلیدواژه‌ها:

شهر هوشمند، مدیریت جمع‌آوری زباله، اینترنت اشیا، حسگرهای محیطی، الگوریتم صخره‌های مرجانی، شهر تهران

انباشت زباله در کلان‌شهرهایی مانند تهران، مدیریت شهری را با چالش مواجه کرده است، زیرا روش‌های سنتی جمع‌آوری زباله در مناطق پرجمعیت ناکارآمد هستند. شهرهای هوشمند با ارائه راه‌حل‌های فناورانه، کیفیت زندگی شهری را بهبود می‌بخشند و سیستم‌های هوشمند جمع‌آوری زباله زمان خدمات، آلودگی و هزینه‌ها را کاهش می‌دهند. این مطالعه با تمرکز بر جمع‌آوری زباله در تهران، به دنبال افزایش پایداری و کارایی با استفاده از اینترنت اشیا و الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. با توجه به افزایش جهانی زباله پیش‌بینی‌شده ۳/۴ میلیارد تن تا سال ۲۰۵۰ این پژوهش ناکارآمدی‌های زمان‌بندی، مصرف انرژی، آلودگی و هزینه‌ها را با مدلی هوشمند هدف قرار می‌دهد. این مطالعه کاربردی، جمع‌آوری زباله در تهران را با الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی بهینه می‌کند. رویکرد چند مرحله‌ای الگوریتم پیشنهادی، نه تنها سطح پر شدن مخازن و ترافیک را کنترل می‌کند بلکه نوع زباله را در نظر می‌گیرد تا تفکیک مناسب‌تری انجام شود. در مدل پیشنهادی حسگرهای متصل روی سطوح زباله اطلاعات مرتبط به داده‌ها از قبیل سطح پر شدن سطل و نوع زباله را جمع‌آوری کرده و الگوریتم پیشنهادی مسیرها و زمان‌بندی‌ها را بهینه می‌کند. کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی کلونی مورچه سنجیده شده است و آن را در مقایسه با این روش‌ها کاراتر نشت داده است. الگوریتم هوشمند پیشنهادی با استفاده از حسگرها و در بستر اینترنت اشیا، در مقایسه با روش‌های سنتی در تهران، هزینه‌ها، مسافت طی‌شده، انتشار گازها و زمان تخلیه را کاهش می‌دهد. این روش، راه‌حلی مقیاس‌پذیر مبتنی بر اینترنت اشیا برای مدیریت زباله، ترافیک و حجم بالای زباله ارائه می‌دهد. بستر اینترنت اشیا و حسگرهای مربوطه و ترکیب با الگوریتم صخره‌های مرجانی، مدیریت زباله را با بهینه‌سازی مسیرها، کاهش هزینه‌ها و زمان بهبود می‌بخشد. تکرارهای متوالی مدلی کارآمد ارائه داده که در همه اهداف از روش‌های کلاسیک پیشی می‌گیرد.

استناد: اصغری، علی؛ اربابی ازگومی، حسین و زورقچیان، علی عاس. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی جمع‌آوری زباله در شهرهای هوشمند. (مطالعه موردی: کلان شهر تهران). *مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی*، ۲۱(۱)، ۳۷-۲۳.



<https://doi.org/10.71633/jshsp.2026.1203324>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت

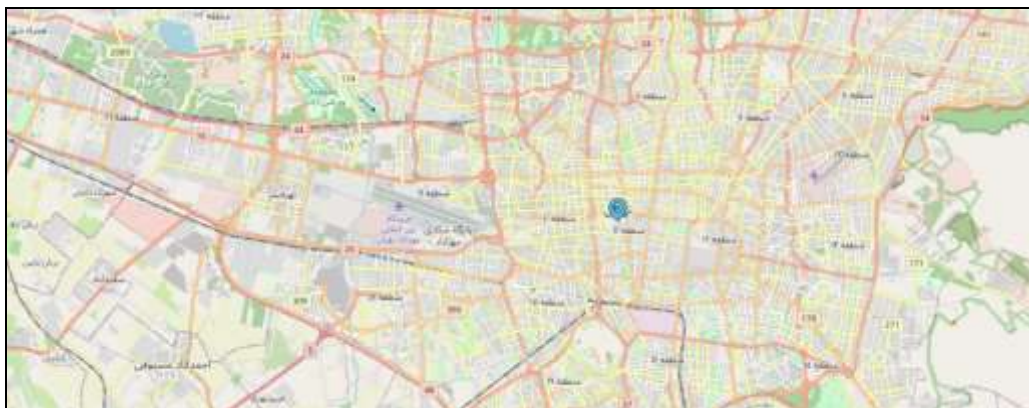
© نویسندگان



مقدمه

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 توسعه 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 نشان‌دهنده 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 (Norouzian-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 قابل ملاحظه داشته‌اند. این الگوریتم‌ها با استفاده از مفاهیمی مانند تکامل زیستی در الگوریتم ازدحام ذرات یا رفتار اجتماعی مورچه‌ها در الگوریتم مورچگان، توانسته‌اند فاصله 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، درحالی 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 نخله 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 سالدو 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 صخره مجازی به‌عنوان شبکه‌ای از راه‌حل‌ها تعریف می‌شود که هر مرجان نشان‌دهنده 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 فرایند 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

سطح‌ها، شرایط ترافیک در خیابان‌های شلوغ تهران و شناسایی محتوای سطح‌ها را شامل می‌شود. اهداف این پژوهش شامل کاهش هزینه‌های عملیاتی (مانند مصرف سوخت و نیروی کار)، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تردد کامیون‌ها، و افزایش کارایی بازیافت در سیستمی است که در حال حاضر از نظر بازیافت عملکرد ضعیفی دارد (Rahman & Islam, 2022). تهران به دلیل ویژگی‌های خاص خود تراکم بالایی جمعیت در مناطق مرکزی، ترافیک سنگین در ساعات اوج، و وابستگی به کهریزک به‌عنوان تنها سایت دفن اصلی بستری چالش‌برانگیز و در عین حال واقعی برای آزمایش این رویکرد فراهم می‌کند (Rupani et al., 2019). این شهر با مساحت ۲۷۰۰ کیلومتر مربع و ۲۲ منطقه‌ی شهری، تنوع بالایی در الگوهای تولید زباله دارد؛ برای مثال، مناطق تجاری زباله‌های متفاوتی نسبت به مناطق مسکونی تولید می‌کنند. این تنوع، همراه با سیستم جمع‌آوری نیمه‌مکانیزه و نرخ پایین بازیافت، تهران را به یک مورد مطالعاتی ایده‌آل برای ارزیابی تأثیر روش پیشنهادی در بهبود مدیریت زباله تبدیل کرده است.

نخستین نوآوری این مقاله، استفاده از الگوریتم خوشه‌های مرجانی در بهینه‌سازی جمع‌آوری زباله در یک شهر هوشمند با تمرکز خاص بر تهران است. دومین نوآوری، معرفی یک چارچوب چند هدفه است که به‌طور همزمان بهینه‌سازی اقتصادی (کاهش هزینه)، زیست‌محیطی (کاهش انتشار گازها) و عملیاتی (افزایش کارایی جمع‌آوری و بازیافت) را در نظر می‌گیرد. این چارچوب، خلاهای پژوهشی موجود در مطالعات پیشین را که اغلب بر یک هدف واحد متمرکز بوده‌اند، پر می‌کند و رویکردی جامع‌تر ارائه می‌دهد (Chen & Li, 2023). سومین نوآوری، دریافت داده‌های لحظه‌ای در فرآیند بهینه‌سازی است که انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به مدل‌های ایستا فراهم می‌کند. این قابلیت اجازه می‌دهد تا به تغییرات ناگهانی در الگوهای تولید زباله (مانند افزایش زباله در تعطیلات) یا شرایط ترافیکی (مانند ترافیک سنگین در بزرگراه‌های تهران) توجه و عکس‌العمل 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 به‌عنوان یک شهر در حال توسعه با سیستم مدیریت پسماند نیمه‌مکانیزه و نرخ بازیافت پایین است و قابلیت تعمیم به سایر کلان‌شهرهای مشابه در کشورهای در حال توسعه را دارد (Norouzzian-Maleki et al., 2023). شبیه‌سازی‌های انجام شده روی داده‌های فرضی نشان‌دهنده‌ی کاهش قابل‌توجه فاصله‌ی مسیره‌ها، بهبود کارایی بازیافت و کاهش اثرات زیست‌محیطی است که در بخش‌های بعدی به‌طور کامل بررسی خواهد شد.

سایر بخش‌های مقاله بصورت زیر سازماندهی شده است: در ادامه مروری بر ادبیات موجود و پیشینه تحقیق انجام خواهد شد و در خلال آن خلاهای موجود شناسایی می‌شود. بخش بعد مرتبط با روش‌شناسی می‌باشد که شامل بکارگیری الگوریتم صخره‌های مرجانی برای جمع‌آوری زباله در تهران، استفاده از داده‌های دریافت شده از حسگرها و در بستر اینترنت اشیاء می‌باشد. در ادامه بخش دیگری به طراحی آزمایش‌ها اختصاص یافته که شامل فرآیند شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در کلان‌شهر تهران با ۵۰۰۰ سطح زباله، تحت معیارهای ارزیابی مختلف است. بخش بعدس نتایج را تحلیل کرده و کارایی CRO را با روش‌های پایه مقایسه می‌کند. در نهایت، بخش انتهایی یافته‌ها را جمع‌بندی کرده و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده، از جمله پیاده‌سازی عملی و ارتقای مقیاس‌پذیری، ارائه می‌دهد. این مطالعه با تلفیق هوش محاسباتی و پایداری شهری، راه‌حلی نوآورانه برای چالش جمع‌آوری زباله در تهران ارائه می‌کند که می‌تواند به تحقق اهداف شهر هوشمند و آینده‌ای پایدار کمک کند.

با ظهور فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء و الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید، مدیریت زباله در شهرهای هوشمند به‌عنوان یکی از حوزه‌های کلیدی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های متعددی تلاش کرده‌اند تا با استفاده از این فناوری‌ها، کارایی جمع‌آوری زباله را بهبود بخشیده و اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. در ادامه، مروری بر مطالعات انجام شده در این زمینه ارائه می‌شود که زمینه‌ساز رویکرد پیشنهادی این مقاله است. یکی از اولین تلاش‌ها برای هوشمندسازی جمع‌آوری زباله توسط نیرده و مالی (۲۰۲۱) انجام شد که سیستمی مبتنی بر اینترنت اشیاء را برای نظارت بر سطح‌های زباله پیشنهاد کردند. این مطالعه با استفاده از حسگرهای مافوق صوت، سطح پر شدن و موقعیت سطح‌ها 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 تأیید 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 "بریک 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 اشیا، 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 اشیا 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. سالسدو سائز 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 به عنوان یک محدودیت نام بردند. رحمان و ایسلام (۲۰۲۲) سیستمی مبتنی بر یادگیری عمیق و اینترنت اشیا 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 قابل توجه 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 به عنوان یک محدودیت اشاره کردند. در نهایت، نوکوفسکی 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 قابل‌توجهی 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	نیرده 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 ۳۶٫۸٪ فاصله سفر	ژانگ و وانگ (۲۰۲۲)
شبیه‌سازی	یادگیری ماشینی، IoT	مقیاس‌پذیری محدود	کاهش ۲۸٪ زمان جمع‌آوری	اوگانیا 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	سالسدو 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	مونتسینوس 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 فرایندهای 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 مسیرهای 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. راه‌حل‌های 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 راه‌حلی 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 پر شدن زباله و نوع ماده شیمیایی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مدل سطل های زباله و جمع آوری آنها در بستر اینترنت اشیا

مدل ریاضی (تابع هدف)

تابع هدف مساله با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

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

که در آن d_{ij} فاصله بین دو گره بر حسب کیلومتر، f_i سطح پر بودن سطل i ، x_{ij} 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 دوبخش 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:

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} = 1, \quad \sum_{i=1}^n x_{i0} = 1 \quad (2)$$

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. $x_{i0} = 1$ 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 می‌کند و نمی‌تواند همزمان به چند جا برود. و بالاخره نقطه تعادل مساله در رابطه ۳ نشان داده شده است.

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

این معادله می‌گوید که کامیون فقط یک بار به دپو برمی‌گردد.

عملگرهای الگوریتم صخره‌های مرجانی برای حل مساله

الگوریتم صخره‌های مرجانی بر اساس زندگی مرجان‌ها روی صخره‌ها شکل گرفته است. مرجان‌ها پس از ساکن شدن روی صخره‌ها اقدام با انتخاب جفت کرده و در فرایند جفت‌گیری لاروهایی جدیدی را تولید می‌کنند. این لاروها پس از مدتی برای ساکن شدن روی صخره‌ها با مرجان‌های مستقر تلاش می‌کنند. چنانچه بتوانند بر آن‌ها غالب شوند در یکی از حفره‌های صخره مستقر می‌شوند و چنانچه چند تلاش ناموفق داشته باشند حذف خواهند شد. در روش پیشنهادی ابتدا مدل مساله بصورت یک

جدول نشان داده می‌شود. خانه‌های 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 می‌باشد. شکل (۳) این مساله را نشان می‌دهد. در بخش الف جدول راه حل‌ها و در بخش ب سطل‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد. در این مدل ۴ منطقه A,B,CD که هر کدام دارای ۵ سطل آشغال هستند نشان داده شده‌اند. جدول ب نیز نشان می‌دهد که از هر منطقه چه سطل‌های آشغالی انتخاب می‌شوند.

A1	A2	A3	A4	A5	1	1	0	1	1
B1	B2	B3	B4	B5	0	0	1	1	1
C1	C2	C3	C4	C5	0	1	1	1	0
D1	D2	D3	D4	D5	1	1	1	1	0

(الف)

(ب)

شکل ۳. مدل نمایش راه حل‌ها (الف) نمایش موقعیت سطل‌ها (ب) سطل‌های انتخاب شده

مرحله بعد ترکیب راه حل‌های فعلی جهت تولید راه حل‌های جدیدتر می‌باشد. به این مرحله Broadcast spawning یا بازترکیب جنسی خارجی اطلاق می‌شود. شیوه کار به این صورت است که دو راه حل انتخاب شده و با هم ترکیب شده و راه حل‌های جدیدی را بوجود می‌آورند. شکل (۴) این مساله را نشان می‌دهد. همین‌طور که این شکل نشان می‌دهد دو راه حل فعلی با هم ترکیب شده و راه حل‌های جدید را شکل می‌دهند. راه حل‌های جدید که به منزله فرزندان جدید هستند هر کدام بخشی از ویژگی مربوط به والد اول و دوم را به ارث می‌برند. برای تشریح بهتر عملکرد پیشنهادی، هر پاسخ اولیه با رنگ جداگانه‌ای نشان داده شده است. دوگانگی جدول پاسخ‌های جدید بیانگر سهم هر کدام از والدین در تولید فرزند یا پاسخ جدید می‌باشد.

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. عملکرد بازترکیب جنسی خارجی

عملگر بعدی بازترکیب 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 سطل‌های آشغال تغییر وضعیت می‌دهند. به عبارت دیگر آنهایی که انتخاب شده‌اند دیگر در لیست تخلیه نخواهند بود و به همین صورت سطل‌هایی 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. عملکرد بازترکیب جنسی داخلی

عملگر بعدی برابر با عملگر تکثیر می‌باشد در این حالت به جهت حفظ پاسخ‌های خوب برخی از آنها تکثیر می‌شوند تا شانس بیشتری برای بوجود آوردن پاسخ‌های بهتر داشته باشند. و در نهایت عملگر میرایی موجب می‌شود تا برخی راه حل‌ها ضعیف حذف شده تا جا برای ورود پاسخ‌های 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 ۲. ماتریس فاصله و سطح پر شدن سطل‌های زباله

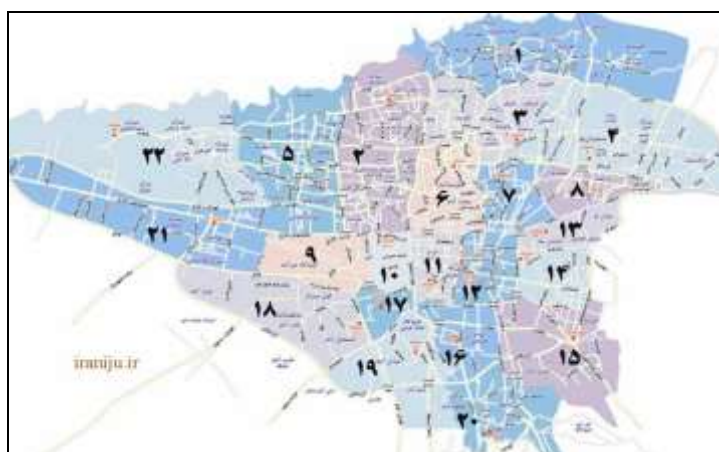
نوع زباله	سطح پر شدن (%)	E1	D2	D1	C2	C1	B2	B1	A2	A1	دیو	گره
-	-	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۰	دیو
آلی	۸۵	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۱,۵	۰	۲	A1
پلاستیک	۶۰	۸,۵	۷,۵	۶,۵	۵,۵	۴,۵	۳,۵	۲,۵	۰	۱,۵	۳	A2
کاغذ	۹۰	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۰	۲,۵	۳	۴	B1
آلی	۷۵	۶,۵	۵,۵	۴,۵	۳,۵	۲,۵	۰	۲	۳,۵	۴	۵	B2
شیشه	۸۰	۵	۴	۳	۲	۰	۲,۵	۳	۴,۵	۵	۶	C1
فلز	۵۵	۴,۵	۳,۵	۲,۵	۰	۲	۳,۵	۴	۵,۵	۶	۷	C2
غیر قابل 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 (۲) 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 به عنوان پایه‌ای برای الگوریتم پیشنهادی عمل می‌کند تا مسیر بهینه‌ی جمع‌آوری زباله را تعیین کند. گره‌ها شامل دیو و ۹ سطل زباله هستند. دیو نقطه‌ی شروع و پایان مسیر کامیون است. این مناطق به صورت فرضی انتخاب شده‌اند تا تنوع جغرافیایی تهران را نشان دهند. مقادیر درون جدول فاصله‌ی بین گره‌ها را بر حسب کیلومتر نشان می‌دهند و به صورت متقارن هستند مثلاً فاصله‌ی دیو 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 پر شدن، 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 به دست 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 به دست 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، به عنوان 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. آبروهوای 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.



شکل ۶. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

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 به‌منظور 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 سطوح 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 براساس 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 بهینه 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	بازترکسی جنسی خارجی (۰/۷)	فرمون (۰/۶)	سرعت (۰/۸)
نرخ اکتشاف	بازترکيب جنسی داخلی (۰/۳)	اکتشاف (۰/۴)	اینرسی (۰/۲)
سایز ماتریس	۴×۵	-	-
وزن بخش‌ها	۰,۴, w2=۰,۶w1=	۰,۴, w2=۰,۶w1=	۰,۴, w2=۰,۶w1=
تعداد سطل	۵۰ تا ۵۰۰۰	۵۰ تا ۵۰۰۰	۵۰ تا ۵۰۰۰

آزمایشات

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

میزان دقت و کارایی

یکی از پارامترهای مهم در کارایی میزان سطل‌های جمع‌آوری شده و فاصله پیموده شده توسط کامیون‌های حمل زباله می‌باشد. جدول (۳) میزان دقت روش پیشنهادی را به ازای الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳. میزان دقت و کارایی روش پیشنهادی

روش	دقت بر حسب درصد	تعداد سطل‌های جمع‌آوری شده	فاصله کل (کیلومتر)	سطل ۵۰۰	سطل ۱۰۰۰	سطل ۲۰۰۰	سطل ۵۰۰۰
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 جدول (۳) نشان می‌دهد روش پیشنهادی با دقت ۹۲ درصد بهترین عملکرد را دارد. دلیل این برتری بکارگیری عملگرهای قدرتمند صخره‌های مرجانی می‌باشد که امکان کاوش گسترده‌تر و بهره‌برداری دقیق‌تر را فراهم می‌کند. این الگوریتم ۶۹۵ واحد زباله را با فاصله ۲۲ کیلومتر جمع‌آوری کرده است، در حالی که الگوریتم‌های گلونی مورچگان و ژنتیک به ترتیب ۶۵۲ و ۶۲۶ واحد را جمع کرده‌اند، اما با فاصله‌های بیشتر (۲۴ و ۲۵ کیلومتر). دلیل اصلی این بهبود، توانایی در تعادل بین اهداف مساله (کاهش فاصله و افزایش جمع‌آوری) است. برخلاف الگوریتم کلون مورچگان که ممکن است مسیرهای غیربهرینه را تکرار کند، و الگوریتم ژنتیک که به سرعت به سمت یک جواب محلی همگرا می‌شود، روش پیشنهادی با ترکیب راه‌حل‌های موجود و تنظیمات جزئی، مسیرهای کارآمدتری پیدا می‌کند.

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) مقایسه‌ای بین زمان اجرای هر الگوریتم و زمان تخلیه سطل‌های زباله را به تفکیک و در تعداد تکرارهای متعدد را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج این جدول نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی در ۵۰ تکرار و ۱۵ ثانیه سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک (۷۰ تکرار، ۲۰ ثانیه) و ژنتیک (۶۰ تکرار، ۱۸ ثانیه) همگرا می‌شود، زیرا عملگرهای آن امکان جستجوی گسترده در فضای راه‌حل‌ها را فراهم می‌کند و همگرایی را تسریع می‌کند. عملکرد مناسب روش پیشنهادی به دلیل تعادل بین کاوش و بهره‌برداری است که از نوسانات زیاد در نتایج جلوگیری می‌کند. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند در سناریوهای پویا مثل مدیریت زباله در تهران با تغییرات لحظه‌ای، کارآمدتر باشد.

جدول ۴. مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها و مجموع زمان تخلیه

روش	تعداد تکرار	زمان محاسبات (ثانیه)	سطل ۵۰۰	سطل ۱۰۰۰	سطل ۲۰۰۰	سطل ۵۰۰۰
روش پیشنهادی	۵۰	۱۵	۵۵	۶۰	۷۲	۸۶
الگوریتم مورچگان	۷۰	۲۰	۸۱	۹۱	۱۱۱	۱۴۶
الگوریتم ژنتیک	۸۰	۱۸	۶۶	۷۶	۹۲	۱۱۷

نسبت جمع‌آوری تعداد سطل‌ها با مسافت طی شده کامیون‌ها

یکی از معیارهای مهمی که در جمع‌آوری هوشمند زباله‌ها اهمیت دارد، نسبت جمع‌آوری سطل‌ها با مسافت طی شده توسط کامیون‌ها و انتقال آنها به دپوی 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. هرچه قدر 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 پرشدن 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	۱۳۳۲۴	۷۲,۶	۱۷۹	۱۲۹۸۹	۸۸,۰	۱۶۳	۱۴۳۵۲
۷۷,۷	۴۲۹	۳۳۳۴۵	۶۸,۱	۴۳۸	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
۷۵,۹	۲۱۳۸	۱۶۲۲۲۵	۷۰,۰	۲۲۴۳	۱۵۶۹۷۵	۹۱,۰	۲۰۷۱	۱۸۸۴۹۶
۷۵,۹	۲۵۴۹	۱۹۳۵۴۵	۷۰,۰	۲۷۲۷	۱۹۰۸۹۰	۹۱,۱	۲۴۵۳	۲۲۴۵۸۷
۷۵,۸	۳۴۰۲	۲۵۸۰۶۰	۶۹,۹	۳۶۰۷	۲۵۲۲۵۲	۹۱,۳	۳۲۷۹	۲۹۹۳۷۶
۷۵,۹	۴۲۵۳	۳۲۲۷۴۰	۷۰,۰	۴۴۹۶	۳۱۴۶۸۵	۹۱,۲	۴۱۲۳	۳۷۵۹۲۱

شکل (۶) نمودار نسبت وزن به تعداد سطل‌های تخلیه شده را نشان می‌دهد. همانطور که این جدول نشان می‌دهد روش پیشنهادی از نسبت بالاتری در مقایسه با روش‌های دیگر دارد. این بهبود بیانگر کارایی بهتر روش پیشنهادی و به صرفه‌تر بودن آن در مصرف منابع شامل میزان مسافت طی شده توسط کامیون‌های حمل زباله را نشان می‌دهد که به دنبال خود موجب صرفه‌جویی اقتصادی بیشتر و کاهش مصرف سوخت و ایجاد آلودگی در کلان‌شهری مثل تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نسبت وزن به تعداد سطل‌های جمع‌آوری شده

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی جمع‌آوری هوشمند زباله در شهر تهران از طریق الگوریتم بهینه‌سازی صخره‌های مرجانی انجام شده و عملکرد آن در مقایسه با الگوریتم‌های کلونی مورچگان و ژنتیک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که روش پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی در معیارهای کلیدی نظیر دقت، سرعت همگرایی، مقیاس‌پذیری، انعطاف‌پذیری، و پایداری از دو الگوریتم دیگر پیشی می‌گیرد. این برتری‌ها نه تنها توانایی مدل حل مسائل پیچیده چند هدفه را تأیید می‌کند، بلکه پتانسیل آن را به‌عنوان یک راه‌حل عملی برای مدیریت هوشمند زباله در کلان‌شهرهایی مانند تهران برجسته می‌سازد. این الگوریتم با توانایی خود در مقیاس‌پذیری، انعطاف‌پذیری، و بهینه‌سازی چند هدفه، راه‌حلی پایدار و کارآمد برای چالش‌های مدیریت پسماند در تهران ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر کلان‌شهرها نیز مورد استفاده قرار گیرد. آزمایشات انجام‌شده به روی داده‌ها که شامل ۵۰ تا ۵۰۰۰ سطل زباله بوده است، نشان داد که الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی تابع هدف خود یعنی کاهش فاصله و افزایش نرخ جمع‌آوری با دقت ۹۲ درصد عمل می‌کند، در حالی که الگوریتم‌های کلونی مورچگان و ژنتیک به ترتیب به ۸۸ درصد و ۸۵ درصد 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 درصد کاهش دهد و میزان جمع‌آوری زباله را تا ۱۲/۶ درصد 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>.
- Esmaeilian, 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*, 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>.