Industrial Management Journal

Print ISSN: 2008-5885

Online ISSN: 2423-5369

Designing a Multi-Objective Stable Mathematical Model for Routing Municipal Waste Collection Vehicles

Afrouz Rahmandoust
PhD Candidate, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: rahmandoust_a@hotmail.com

Ashkan Hafezalkotob *
*Corresponding Author, Associate Prof., Department of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: a_hafez@azad.ac.ir

Bijan Rahmani Parchikolaei
Associate Prof., Department of Mathematics, Nour Branch, Islamic Azad University, Nour, Iran. E-mail: bijanrah40@gmail.com

Amir Azizi
Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: azizi@srbiau.ac.ir

Abstract

Objective

Waste collection poses a significant challenge for contemporary societies. Given the inevitability of ongoing human waste production, the organization of municipal waste collection holds paramount importance. Against the backdrop of escalating environmental pollutants over recent decades and crises induced by global warming, governments have increasingly prioritized addressing sustainability issues. The objective of this study was to formulate an urban waste collection network with a municipal sustainability perspective. To achieve this goal, we proposed a multi-objective mathematical model that incorporates economic, social, and environmental considerations pertaining to the routing of urban waste collection vehicles.

Methods

This study introduces an integer multi-objective mathematical model centred on stability components to address the routing problem of urban waste collection vehicles, to design an optimal network for urban waste collection. The model was addressed using real data from waste collection in Iran's Saveh city. GAMS software was employed for solving the model in small dimensions, while MATLAB software was utilized for solving the model in larger dimensions. The proposed model incorporates a robust approach to handle

uncertainty. Multi-objective meta-heuristic algorithms were applied to solve the model in scenarios with larger dimensions. A comparative analysis was subsequently conducted, evaluating solution methods based on both the values of the objective function and the solution time.

Results

The economic objective of this study encompasses the overall costs associated with transporting waste from collection points to processing and recycling centres, along with the expenses related to waste recycling. Its environmental objective focuses on minimizing pollution resulting from the transportation of collected waste. Lastly, its social objective is to maximize citizens' satisfaction with urban waste collection. The results demonstrated that the proposed mathematical model establishes a rational relationship between the incurred costs, the quantity of waste collected, the distance travelled, and the amount of pollution generated during the transportation of waste.

Conclusion

The model presented in this study optimized the urban waste collection system by incorporating dimensions of sustainability. This was achieved by formulating separate objective functions to address various aspects of urban waste collection. The results showed that in the economic dimension, waste collection costs, which account for the largest share of the total cost of waste management, decreased significantly. The collection cost was reduced by optimizing the collection routes and reducing the costs related to recycling collected waste. In addition, in the social dimension, by considering the amount of waste collected compared to the waste produced, the level of satisfaction of citizens was calculated. Finally, the results showed that by reducing the environmental effects related to the recycling and transportation of the collected waste, the proposed model had an acceptable performance.

Keywords: Sustainability, Municipal waste collection, Routing, Uncertainty.

Citation: Rahmandoust, Afrouz; Hafezalkotob, Ashkan; Rahmani Parchikolaei, Bijan & Azizi, Amir (2023). Designing a Multi-Objective Stable Mathematical Model for Routing Municipal Waste Collection Vehicles. *Industrial Management Journal,* 15(4), 680-709. (*in Persian*)

Industrial Management Journal, 2023, Vol. 15, No 4, pp. 680-709
Published by University of Tehran, Faculty of Management
https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.350291.1007997
Article Type: Research Paper
© Authors
Received: October 23, 2022
Received in revised form: July 23, 2023
Accepted: September 16, 2023
Published online: January 20, 2024

مدیریت صنعتی
شاپا چاپی: ۵۸۸۵-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۵۳۶۹-۲۴۲۳

طراحی مدل ریاضی چندهدفه استوار مبتنی بر پایداری برای مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری

افروز رحمان دوست

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: rahmandoust_a@hotmail.com

اشکان حافظ الکتب *

* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران. رایانامه: a_hafez@azad.ac.ir

بیژن رحمانی پرچیکلایی

دانشیار، گروه ریاضی، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران. رایانامه: bijanrah40@gmail.com

امیر عزیزی

استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: azizi@srbiau.ac.ir

چکیده

هدف: موضوع جمع‌آوری پسماند، یکی از چالش‌های بزرگ جوامع مدرن است. از آنجا که تولید پسماند در هر زمان اجتناب‌ناپذیر است، توجه به سامان‌دهی جمع‌آوری پسماند شهری، امری بسیار مهم و ضروری است. این در حالی است که با توجه به افزایش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر و بروز بحران‌های ناشی از گرم شدن زمین، پرداختن به مسائل پایداری بیش از پیش در دستور کار دولت‌ها قرار گرفته است. این پژوهش با هدف طراحی یک شبکه جمع‌آوری پسماند شهری با رویکرد پایداری شهری اجرا شده است. برای این منظور، یک مدل ریاضی چندهدفه پیشنهاد شده که نگرانی‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مربوط به مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری را در نظر گرفته است.

روش: در این پژوهش با هدف طراحی یک شبکه بهینه برای جمع‌آوری پسماند شهری، یک مدل ریاضی چندهدفه عدد صحیح مبتنی بر مؤلفه‌های پایداری، برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری ارائه شده است. برای حل مدل، از داده‌های واقعی مربوط به جمع‌آوری پسماند در شهر ساوه استفاده شد. به‌کمک نرم‌افزار گمز، مدل در ابعاد کوچک و به‌کمک نرم‌افزار متلب، مدل در ابعاد بزرگ حل شد. در مدل پیشنهادی از رویکرد استوار برای برخورد باعدم قطعیت استفاده شد. برای حل مدل در ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه استفاده شد. درنهایت بین روش‌های حل بر اساس مقدار تابع هدف و زمان حل، مقایسه‌ای انجام گرفت.

یافته‌ها: هدف اقتصادی پژوهش، محاسبه مجموع هزینه‌های حمل پسماندها از نقاط جمع‌آوری به مراکز پردازش و مراکز بازیافت زباله و نیز هزینه‌های مربوط به بازیافت پسماندهاست. هدف زیست‌محیطی پژوهش، کاهش آلودگی ناشی از حمل پسماندهای جمع‌آوری شده است و در نهایت، هدف اجتماعی آن، به حداکثررساندن رضایت شهروندان از جمع‌آوری پسماند شهری است. در این

پژوهش نشان دادیم که مدل ریاضی پیشنهادی، بین هزینه‌های انجام شده، حجم پسماند جمع‌آوری شده، مسافت پیموده شده و میزان آلودگی تولید شده از حمل‌ونقل پسماندها، تناسب منطقی برقرار می‌کند.

نتیجه‌گیری: مدل ارائه شده در این پژوهش با در نظر گرفتن ابعاد پایداری در جمع‌آوری شدن پسماند شهری با ارائه توابع هدف مجزا، موجب بهینه‌شدن سیستم جمع‌آوری پسماند شهری شد. نتایج نشان داد که در بُعد اقتصادی، هزینه‌های جمع‌آوری پسماند که بیشترین سهم از هزینه کل مدیریت پسماند را به خود اختصاص می‌دهد، کاهش چشمگیری یافته است. دلیل کاهش هزینه جمع‌آوری، بهینه‌کردن مسیرهای جمع‌آوری و کاهش هزینه‌های مربوط به بازیافت پسماند جمع‌آوری شده بود. همچنین در بُعد اجتماعی با درنظر گرفتن حجم پسماند جمع‌آوری شده نسبت به پسماند تولید شده، میزان رضایت شهروندان محاسبه شد. درنهایت نتایج نشان داد که با کاهش اثرهای زیست‌محیطی مربوط به بازیافت و حمل‌ونقل پسماند جمع‌آوری شده، مدل پیشنهادی عملکرد خوبی داشته است.

کلیدواژه‌ها: پایداری، پسماند شهری، جمع‌آوری، مسیریابی، عدم قطعیت.

استناد: رحمان دوست، افروز؛ حافظ الکتب، اشکان؛ رحمانی پرچیکلایی، بیژن و عزیزی، امیر (۱۴۰۲). طراحی مدل ریاضی چندهدفه استوار مبتنی بر پایداری برای مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری. *مدیریت صنعتی*، ۱۵(۴)، ۶۸۰- ۷۰۹.

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۵، شماره ۴، صص. ۶۸۰- ۷۰۹
ناشر: دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران
نوع مقاله: علمی پژوهشی
© نویسندگان
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰
doi: https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.350291.1007997

مقدمه

یکی از مسائل بسیار مهم زیست‌محیطی کشورهای در حال توسعه، مدیریت پسماند شهری است. با مدیریت منطقی مسئله، علاوه بر کاهش وقت و هزینه، تأثیرهای منفی زیست‌محیطی را نیز می‌توان به حداقل رساند. حجم پسماندهای جامد شهری، در بسیاری از کشورهای در حال توسعه مانند چین، برزیل و هند، روند افزایش مداوم را نشان می‌دهد. اهمیت این موضوع تا جایی است که به‌عنوان چالش «محاصرهٔ زباله» در جهان شناخته شده است (زورپاس[1]، ۲۰۲۰؛ بادویج[2]، ۲۰۱۵). پسماند جامد شهری (پسماندهای جامد شهری) یکی از عوامل اصلی تغییر آب‌وهوا و گرم‌شدن کره زمین است (ولی‌زاده، مظفری و حافظ‌الکتب[3]، ۲۰۲۲). کارایی سیستم جمع‌آوری پسماند شهری باید با بهداشت، اقتصاد و مهندسی محیط زیست هماهنگ باشد و با دیگر شرایط عمومی جامعه برنامه‌ریزی هماهنگ شود. بنابراین مدیریت پسماند شهری، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا اگر پسماندهای یک اجتماع به درستی جمع‌آوری و دفع نگردند، بر محیط زیست و سلامت روانی و بهداشتی و پاکیزگی محیط جامعه لطمه وارد می‌کند (اسلام پناه، جعفرنژاد، حیدری دهویی و تقی‌زاده یزدی، ۱۴۰۲).

از میان تمام مراحل مدیریت پسماند، جمع‌آوری زباله از مرکز تولید زباله به مرکز مدیریت زباله، یعنی مسیریابی جمع‌آوری زباله، مسئلهٔ مهمی به‌شمار می‌رود (جایونیچ و همکاران[4]، ۲۰۱۶؛ سانجیوی و شهابودین[5]، ۲۰۱۶؛ ریشتر، نگ و پن[6]، ۲۰۱۸). یکی از نکات مهم در این گونه مسائل، مسیریابی خودروهاست (هانان و همکاران[7]، ۲۰۱۷). علاوه بر این، جمع‌آوری پسماند نیز به‌مانند سایر برنامه‌ریزی‌های شهری، می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد. در گذشته، بسیاری از محققان تکنیک‌های بهینه‌سازی ناکارآمد را برای مدیریت عدم قطعیت در طرح‌های مدیریت زیست‌محیطی پیشنهاد می‌کردند (شو، هوانگ، شین و کائو[8]، ۲۰۰۹). تکنیک‌های برنامه‌نویسی فازی و تصادفی، به‌طور کلی برای حل مسائل مدیریت پسماند مربوط به عدم اطمینان در تدارکات زنجیرهٔ تأمین استفاده شدند (سلطانی، صادق و هیوگی[9]، ۲۰۱۷).

شهر ساوه، به‌دلایل متعددی از جمله داشتن شهر صنعتی کاوه، به‌عنوان بزرگ‌ترین شهر صنعتی کشور و یکی از قطب‌های مهم صنعت در ایران، در سال‌های اخیر توسعه چشمگیری پیدا کرده است. این رشد چشمگیر جمعیت شهری، مشکلات مختلفی را در زمینه‌های مختلف به همراه داشته است. یکی از مسائل بزرگ و نگران‌کننده در این شهر، افزایش مداوم حجم زباله‌های جامد شهری است که به‌دلیل رشد جمعیت و فعالیت‌های صنعتی گسترده در این منطقه است که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند مشکلات جدی بهداشتی و زیست‌محیطی را به همراه داشته باشد. این مشکلات نیازمند راه‌کارهایی پایدار و چندجانبه است که بتواند عوامل اقتصادی، اجتماعی و محیطی را دربرگیرد. از این رو با توجه به مطالب بیان شده، تمرکز اصلی این پژوهش، پرداختن به پرسش‌های اساسی زیر است:

1. Zorpas
2. Bowdewijn
3. Valizadeh, Mozafari & Hafezalkotob
4. Jaunich et al.
5. Sanjeevi & Shahabudeen
6. Richter, Ng & Pan
7. Hannan et al
8. Xu, Huang, Qin & Cao
9. Soltani, Sadiq & Hewage

۱. مطالعات قبلی انجام شده در حوزه مدل‌سازی جمع‌آوری پسماند شهری عوامل پایداری را چگونه در مدل ریاضی درنظر گرفته‌اند؟
۲. چگونه می‌توان با توجه به تأثیر متقابل و پیچیده عوامل اقتصادی، اجتماعی و محیطی، یک مدل بهینه را برای جمع‌آوری زباله‌های شهر ساوه طراحی کرد؟
۳. در چارچوب مدل پیشنهادی، چگونه می‌توان عدم قطعیت‌های ذاتی در تولید زباله شهری را به‌طور مؤثر مدیریت کرد تا از انعطاف‌پذیری سیستم مدیریت پسماند در مواجهه با هرگونه شرایط غیرقطعی اطمینان حاصل کرد؟

برای مدیریت پسماند شهری، تسهیلاتی از جمله مراکز پردازش، مراکز جمع‌آوری، مراکز دفع و تعدادی وسایل نقلیه و نفرات مربوطه در نظر گرفته شده است. در مدل پیشنهادی، وسایل نقلیه پسماند را از سطل‌های زباله شهری جمع‌آوری کرده و به مراکز پردازش منتقل می‌کنند. سپس، پسماندها پس از پردازش به مراکز دفع یا مراکز بازیافت منتقل می‌شوند. پس از انجام این پژوهش، انتظار می‌رود به اهداف زیر دست یابیم:

۱. مطالعهٔ تحقیقات انجام شده در حوزهٔ مدیریت پسماند شهری با رویکرد مدل‌سازی ریاضی؛
۲. ارائهٔ یک شبکهٔ بهینه برای جمع‌آوری پسماند شهری که براساس عوامل پایداری بهینه شده است؛
۳. برخورد با عدم قطعیت موجود در شبکه با درنظر گرفتن سناریوهای مختلف.

ساختار پژوهش برای مطالعهٔ حاضر به‌گونهٔ ذیل تنظیم شده است. مرور ادبیات مربوطه در بخش پیشینهٔ نظری و تجربی بررسی شده است. پیش‌نیازها و مفروضات در بخش روش‌شناسی و ساختار مدل ریاضی مسئله در بخش بعدی ارائه شده است. در ادامه، مثال عددی و نتایج تحلیلی و تحلیل حساسیت به بحث گذاشته شده است. در پایان بینش‌های مدیریتی و نتایج نهایی پژوهش ارائه شده است.

پیشینهٔ نظری پژوهش

امروزه مهندسی و مدیریت پسماند به مسئلهٔ مهمی تبدیل شده است و به‌عنوان یکی از علوم پیشرفته در سطح جهان مطرح بوده و جزء جدایی‌ناپذیر مدیریت شهری است. افزایش روزافزون جمعیت و توسعهٔ شهرها، مدیران و برنامه‌ریزان شهری را بر آن داشته است تا با انجام مطالعات و تحقیقات وسیع، به تهیهٔ برنامه‌های علمی و اصولی در جهت توسعهٔ منطقی شهرها و توجه به نیازها و احتیاجات شهروندان گام بردارند. تعدادی از مطالعات اخیر در خصوص مدیریت پسماند شهری وجود دارد که می‌توان به تحقیقات عدالت‌پور، میرزاپور آل هاشم، کریمی و باهلی[1] (۲۰۱۸)؛ ملو، سانتوس، فریتاس، یوکویاما و کاماروتا[2] (۲۰۱۸ب)؛ فرناندز ـ آراسیل، اورتونیو ـ پادیلا و ملگارجو ـ مورنو[3] (۲۰۱۸)؛ سان و لواتی[4] (۲۰۱۶) و تحقیقات مربوط به صرفه‌جویی در هزینه جمع‌آوری پسماندهای جامد شهری (زسیگرایووا، سمیائو و بیجوکو[5]،

1. Edalatpour, Mirzapour Al-e-hashem, Karimi & Bahli
2. Mello, Santos, Freitas, Yokoyama & Cammarota
3. Fernández-Aracil, Ortuño-Padilla & Melgarejo-Moreno
4. Son and Louati
5. Zsigraiova, Semiao & Beijoco

۲۰۱۳؛ عبدلی، عبدالمالک، جلول، مثقونی و آدو[1]، ۲۰۱۶؛ بوسکویک، یوویچیچ، یووانـوویچ و سـیموویچ[2]، ۲۰۱۶؛ نگـوین، نگوین، نگوین و دین[3]، ۲۰۱۷) اشاره کرد. سایر تحقیقات را به شرح زیر خلاصه می‌کنیم:

اسلام پناه و همکاران (۱۴۰۲)، یک مدل ریاضی چندهدفه عدد صحیح، بـرای مسـئله مکـان‌یـابی بـه‌منظـور طراحـی زنجیرهٔ تأمین پایدار ارائه دادند. اهداف اقتصادی شامل درآمد و هزینه‌های زنجیرهٔ تأمین، اهداف زیست‌محیطی شامل میـزان انتشار کربن در حمل ونقل و عملیات و اهداف اجتماعی، شامل حوادث سالیانه، رفاه رانـندگان، محـل زنـدگی نیـروی کـار و استخدام و اخراج نیروی کار بود. فرحی ولوکلایی (۱۴۰۰) نیز مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک ایمنـی در فرایند پردازش پسماند شهری در محیط فازی انجام داد. شعبانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهش دیگری تلاش کردند تـا با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف اکولوژیک، بهترین محل به‌منظور دفن بهداشتی زباله‌ها مشخص شـود تـا کمتـرین آسیب به محیط زندگی وارد شود. بدین منظور با استفاده از انجام تحلیل‌هـای محلـی در محـیط ArcGIS، محـل دفـن پسماندهای شهری مشخص شد. برای این منظور داده‌های رقومی مورد نیاز جمع‌آوری شدند و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، معیارها ارزش‌گذاری و سپس به محیط ArcGIS برده شدند و محـل دفـن بهداشـتی پسـماندهای شهری مشخص شد. دای، لی و هوانگ[4] (۲۰۱۱) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صـحیح، بـرای بهینـه‌سـازی جریـان پسماند و تخصیص ظرفیت در پکن، پیشنهاد دادند. علاوه بر ایـن، سـانتی بـانز و همکـارانش[5] (۲۰۱۳) نیـز یـک مـدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح تهیه کردند تا بتواند از پسـماندهای جامـد شـهری در بخـش غربـی و مرکـزی مکزیـک برنامه‌ریزی کند. در این حالت، مدل تصمیمات تاکتیکی بهینه مشترک را برای طراحی سیستم مدیریت پسماندهای جامد شهری مانند فناوری پردازش پسماند و مکان آن‌ها، تخصیص پسماند از گره‌های تولیـد بـه اجـزای سیسـتم و همچنـین توزیع محصولات بازیافتی به شهرهای بازار به‌دست می‌آورد. فلیپس و مونـدال[6] (۲۰۱۴) نیـز براسـاس ارزیـابی مـاتریس ارزیابی سریع ضربه برای گزینه‌های دفع زباله جامد شهری در هند، یک مدل ریاضی پایدار پیشنهاد کردند. نتـایج نشـان داد که از پنج گزینه مورد بررسی، گاززدایی امیدوارکننده‌ترین گزینهٔ پایداری با ارزش S بـه‌دسـت آمـده ۰/۰۶۹ بـود کـه نشان‌دهندهٔ پایداری بسیار ضعیف بود.

اینگلز، دولارت و ووت[7] (۲۰۱۶) مسئلهٔ جمع‌آوری پسماند را یکی از کاربردهای مسئلهٔ مسیریابی خـودرو مـی‌داننـد. آن‌ها طراحی شبکه خدمات تلفیقی شهری حجم مواد زائد جامد را به حالت‌های حمل‌ونقل اختصاص داده و فرکانس‌های حمل‌ونقل را در طول افق برنامه‌ریزی تعیین کردند. سوکوپوفا، استروک و هربیچک[8] (۲۰۱۷) رویکرد جدیدی مبتنـی بـر تقاضای شهروندان برای خدمات جمع‌آوری پسماند مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روی نتایج قبلی به‌دست‌آمده از داده‌های مربوط به خصوصیات اجتماعی و جمعیت شناختی ساخته شده و بر رابطه سن و هزینه پسماندهای جامـد شـهری تمرکـز

1. Abdelli, Abdelmalek, Djelloul, Mesghouni & Addou
2. Boskovic, Jovicic, Jovanovic & Simovic
3. Nguyen, Nguyen, Nguyen & Dinh
4. Dai, Li & Huang i
5. Santibanez-Aguilar
6. Phillips and Mondal
7. Inghels, Dullaert & Wout
8. Soukopová, Struk & Hřebíček

نموده، و به‌طور خاص روی پیری جمعیت متمرکز شدند. گاریبای رودریگز، لاگونا مارتینز، ریکو رامیرز و بوتلو آلوارز[1] (۲۰۱۸) یک ساختار لجستیکی و جغرافیایی مجموعه غیررسمی، تجاری‌سازی و بازیافت ملی و بین‌المللی پسماند بازیافت شده از یک شهر متوسط در مکزیک را ارائه دادند. آن‌ها از روش ارزیابی چرخه زندگی برای تعیین تأثیر محیطی که بازیافت پسماند از مجموعه غیررسمی در سیستم پسماندهای جامد شهری دارد، استفاده کردند. همچنین شاخص حاشیه‌نشینی به‌عنوان روشی برای ارزیابی وضعیت اقتصادی جمع‌آوری پسماند مورد استفاده قرار دادند. ایبانز فورز و همکاران[2] (۲۰۱۸) به تجزیه‌وتحلیل تکامل سیستم مدیریت پسماند جامد شهری (پسماندهای جامد شهری) جوجوپسوا (برزیل) پرداختند. آن‌ها برای این کار سیستم مدیریت پسماند در شهرداری جوجوپسوا را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ با ویژگی‌های اقتصادی و میزان جمعیت در مناطق مختلف شهر بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده مستقیماً از ذی‌نفعان مختلف درگیر در سیستم پسماندهای جامد شهری مورد بررسی قرار دادند. در جدول ۱ به بررسی دقیق‌تر برخی از تحقیقات انجام شده جمع‌آوری پسماند شهری پرداخته‌ایم.

جدول ۱ تحقیقات انجام شده جمع‌آوری پسماند شهری

نویسندگان (سال)	نوع مدل		ویژگی‌های مدل		اهداف			روش حل	
	تک هدفه	چندهدفه	قطعی	غیرقطعی	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی	دقیق	فرا ابتکاری
ارکوت، کاراگیانیدیس، پرکولیدیس و تجاندرا[3] (۲۰۰۸)	*		*		*	*			
تاوارس، زسیگرایووا، سمیائو و کاروالیو[4] (۲۰۰۹)	*		*		*	*		*	
لی و هوانگ[5] (۲۰۱۰)		*		*	*	*		*	
فاسیو، پرسونا و زنین[6] (۲۰۱۱)		*	*		*	*			*
سانتی بانز و همکاران (۲۰۱۳)		*		*	*	*	*	*	
ژانگ و هوانگ[7] (۲۰۱۴)	*			*	*	*			*
فری، د لورنا دینیز چاوز و ریبیرو[8] (۲۰۱۵)	*		*		*			*	
اینگلز و همکاران (۲۰۱۶)		*	*		*	*	*	*	
حبیبی، اسدی، صادقی و برزین‌پور[9] (۲۰۱۷)		*	*		*	*	*		*
میردار هریجانی، منصور و کریمی[10] (۲۰۱۷)		*	*		*	*	*	*	

1. Garibay-Rodriguez, Laguna-Martinez, Rico-Ramirez & Botello-Alvarez
2. Ibáñez-Forés et al.
3. Erkut, Karagiannidis, Perkoulidis & Tjandra
4. Tavares, Zsigraiova, Semiao & Carvalho
5. Li & Huang
6. Faccio, Persona & Zanin
7. Zhang & Huang
8. Ferri, de Lorena Diniz Chaves & Ribeiro
9. Habibi, Asadi, Sadjadi & Barzinpour
10. Mirdar Harijani, Mansour & Karimi

نویسندگان (سال)	نوع مدل		ویژگی‌های مدل		اهداف			روش حل	
	تک هدفه	چندهدفه	قطعی	غیرقطعی	اقتصادی	زیست‌محیطی	اجتماعی	دقیق	فرا ابتکاری
یاداو، کارماکار، دیکشیت و بورجی[1] (۲۰۱۸)	*			*	*			*	
بابایی تیرکلایی، مهدوی و سیداصفهانی[2] (۲۰۱۸)		*		*		*		*	*
عدالت‌پور و همکاران (۲۰۱۹)	*		*		*	*		*	
بابایی تیرکلایی و همکاران (۲۰۲۰)	*		*		*	*		*	
ولی‌زاده (۲۰۲۰)		*		*	*		*	*	
ولی‌زاده و همکاران (۲۰۲۱)		*		*	*	*		*	
ولی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲)		*		*	*	*		*	*
رحمانی‌فر و همکاران (۲۰۲۳)		*	*		*	*			*
تیرکولایی، گلی، گوتمن، وبر و شودزکا[3] (۲۰۲۳)		*	*		*	*	*		*
محمدی تبار، قدسی‌پور و حافظ‌الکتب[4] (۲۰۲۳)	*		*			*			*
پژوهش حاضر (۲۰۲۳)		*		*	*		*	*	*

پیشینهٔ تجربی پژوهش

تحقیقات گذشته در حوزه بهینه‌سازی فرایندهای جمع‌آوری زباله شهری، بینش‌های ارزشمندی را ارائه داده‌اند (تیرکلایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ ولی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، اکثر این تحقیقات، علیرغم تأکید بر اهمیت پایداری در مدیریت پسماند، نتوانسته‌اند مدل‌های ریاضی جامعی ارائه دهند که اهداف چندگانه‌ای از جمله بهره‌وری هزینه، کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و بهبود کیفیت خدمات را به‌طور کامل در نظر بگیرند. این شکاف در ادبیات موجود را بیان می‌کند و نشان می‌دهد که پایداری، در مدل‌های مسیریابی جمع‌آوری زباله شهری به‌طور کامل ترکیب نشده است.

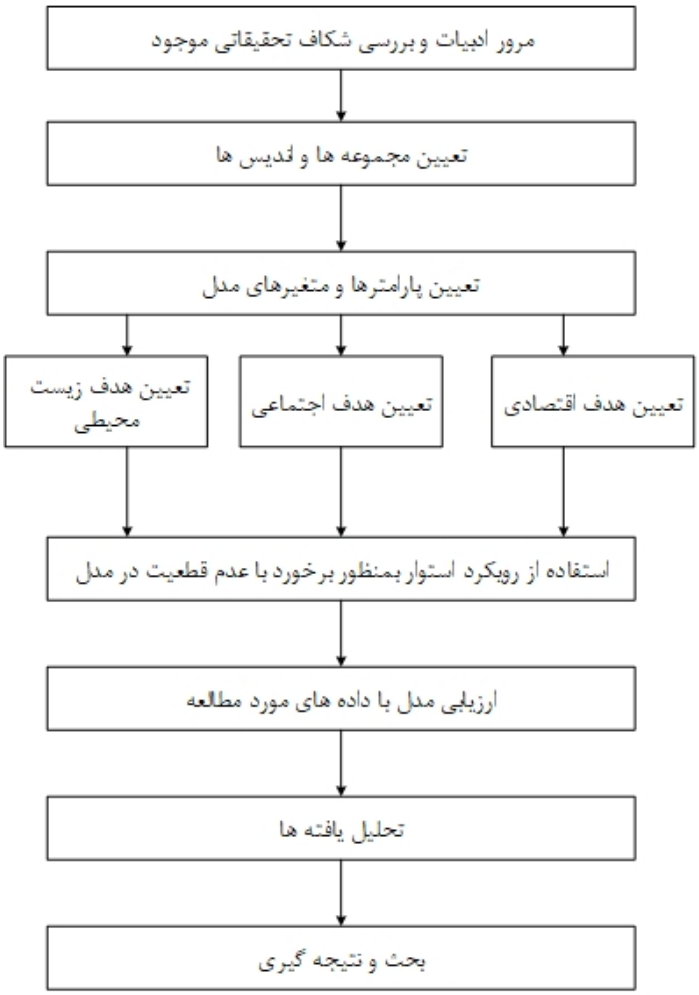
اطلاعات نشان می‌دهد که در حالی که برخی از مقالات به پیچیدگی‌های بهینه‌سازی چند هدفه در جمع‌آوری زباله شهری پرداخته‌اند، تعداد محدودی از راه‌حل‌های عملی و واقعی ارائه کرده‌اند. مدل‌ها باید نه تنها از نظر نظری صحیح باشند بلکه با شرایط واقعی محیط‌های شهری سازگاری داشته باشند. این شرایط ممکن است با توجه به محدودیت‌ها و الزامات مختلف مناطق، به‌طور قابل توجهی متفاوت باشند. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اکثر مطالعات پیشین سعی شده است تا مدیریت پسماند برای به حداقل رساندن هزینه کل و یا تخصیص پسماند به مراکز مختلف از جمله بازیافت یا مراکز دفع که تنها بخشی از بهینه‌سازی زنجیره است، طراحی شود. علاوه بر این در تحقیقات پیشین فقط به

1. Yadav, Karmakar, Dikshit & Bhurjee
2. Babaee Tirkolaee, Mahdavi, & Seyyed Esfahani
3. Tirkolaee, Goli, Gütmen, Weber & Szwedzka
4. Mohammaditabar, Ghodsypour & Hafezalkotob

یکی از عوامل پایداری پرداخته شده است و در هیچ‌یک از تحقیقات انجام شده عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌صورت توأم درنظر گرفته نشده است؛ از این رو احساس می‌شود که در ادامه تحقیقات انجام شده، آنالیز فرایند جمع‌آوری پسماند بازنگری شود. بنابراین، نیاز است تا مدلی جامع‌تر از گذشته ارائه شود؛ به‌نحوی که بتواند علاوه‌بر در نظر گرفتن عوامل پایداری به‌صورت توأم، عدم قطعیت ناشی از میزان تولید پسماند شهری را نیز پوشش دهد.

روش شناسی پژوهش

در این پژوهش از رویکرد مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح، مدل ریاضی مسئله فرموله می‌شود و سپس مدل به یک مدل استوار توسعه می‌یابد. بر اساس طبقه‌بندی جان واکر (۱۹۹۸) روش پژوهش حاضر، تحلیلی ریاضی و از نظر هدف، کاربردی است. گام‌های اجرایی تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. برای جمع‌آوری داده‌ها از بانک‌های اطلاعاتی شهر ساوه استفاده شده است. مفروضات مسئلهٔ پژوهش، در شرایط عدم قطعیت برای ارائه مدل‌سازی ریاضی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. گام‌های اجرایی پژوهش

هدف مسئله تعریف شده، بهینه‌کردن سه تابع هدف مجزا شامل هدف اقتصادی (کاهش هزینه‌ها)، هدف اجتماعی (افزایش رضایت شهروندان) و هدف زیست‌محیطی (کاهش آلودگی ناشی از حمل پسماندها) است. در مدل ارائه شده وسایل نقلیه، به‌همراه نفرات مربوطه، پسماند را از سطح شهر جمع‌آوری می‌کنند. به عبارتی وسایل نقلیه موظف‌اند طی دوره زمانی مشخص، تمامی سطل‌های زباله را در ناحیهٔ مشخص شده تخلیه و پسماند جمع‌آوری شده را به مراکز پردازش حمل کنند. هر یک از وسایل نقلیه و نفرات مستقر در ناوگان، موظف هستند از یک ایستگاه ابتدایی شروع به حرکت کرده و سطل‌های زباله را در طول مسیر تخلیه کنند و پس از به حداکثر رسیدن ظرفیت وسایل نقلیه به ایستگاه ابتدایی برگردند. پس از جمع‌آوری، پسماندها به مراکز پردازش انتقال داده می‌شوند. برای ارائهٔ یک مدل ریاضی، نخستین گام مشخص‌کردن مفروضات مسئله است؛ از این رو مفروضات مدل ارائه شده به شرح زیر است:

- تعداد وسایل نقلیه، نفرات و همچنین برنامه جمع‌آوری پسماند سطل پسماندی در آغاز دورهٔ برنامه‌ریزی مشخص و معلوم است. به عبارت دیگر در طول فرایند جمع‌آوری پسماند شهری هیچ وسیلهٔ نقلیه جدیدی به سیستم اضافه نمی‌شود. این فرض به کاهش آلودگی تولید شده ناشی از حمل‌ونقل وسایل نقلیه کمک می‌کند.
- اولین جمع‌آوری پسماند برای هر وسیلهٔ نقلیه و نفرات از ایستگاهی آغاز می‌شود که نزدیک‌ترین محل به محل استقرار آن‌هاست؛ به این معنا که زیرتورها به نحوی طراحی شده‌اند تا کوتاه‌ترین مسیر به سطل‌های زباله انتخاب و جمع‌آوری پسماند صورت پذیرد. این فرض، علاوه‌بر کاهش بی‌نظمی و کاهش زمان جمع‌آوری پسماند، میزان مصرف سوخت را نیز کاهش می‌دهد.
- زمان جمع‌آوری پسماند توسط هر وسیلهٔ نقلیه از قبل تعیین شده است. به عبارت دیگر، جمع‌آوری پسماند در یک زمان مشخص شروع و در یک زمان مشخص پایان می‌یابد. وسایل نقلیه موظف‌اند در زمان مشخص شده تمامی پسماند شهری را جمع‌آوری کنند.

ساختار مدل ریاضی

حال برای نوشتن یک مدل ریاضی، ابتدا باید نمادها و علائم ریاضی مربوط به آنرا معرفی کرد و سپس به توضیح مدل ریاضی پرداخت. در مسئله پیشنهادی تعدادی وسیلهٔ نقلیه v برای جمع‌آوری پسماند w از نقاط i و j درنظر گرفته شده است. درواقع نقاط i و j نشان‌دهندهٔ سطل‌های زباله‌ای هستند که به‌ترتیب در ابتدا و انتهای مسیر قرار دارند و برای جمع‌آوری کامل پسماندهای شهری وسایل نقلیه، باید حداقل یک بار از نقاط تعیین شده بازدید کنند. زباله‌های جمع‌آوری شده پس از جمع‌آوری به مراکز پردازش r منتقل می‌شوند. پس از پردازش پسماندهای جمع‌آوری شده، پسماندهای قابل بازیافت به مراکز بازیافت k منتقل شده و در آنجا بازیافت می‌شوند. در ادامه به تعیین پارامترها و فرمول‌نمودن مسئله پرداخته شده است:

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

N : مجموعه‌ای از همهٔ نقاط است.

V : مجموعه‌ای از همهٔ وسائل نقلیه است.

R : مجموعه‌ای از همهٔ مراکز جمع‌آوری است.

K : مجموعه‌ای از همهٔ مراکز بازیافت است.

W : مجموعه‌ای از همهٔ پسماندها است.

i, j : اندیس مربوط به نقاط تولید پسماند $(i \neq j)$

v: اندیس مربوط به وسائل نقلیه

r: اندیس مربوط به مراکز جمع‌آوری

k: اندیس مربوط به مرکز بازیافت

w: اندیس مربوط به پسماندها

پارامترهای مسئله

بعد از مشخص‌کردن اندیس‌های مدل نوبت به تعیین پارامترها می‌رسد. توجه داشته باشید کـه تمـامی هزینـه‌هـا و سـود دولت برحسب دلار درنظر گرفته شده است. این پارامترها عبارت‌اند از:

cr_{wvir} : هزینهٔ حمل هر واحد پسماند w توسط وسیلهٔ نقلیه v از نقطه i به نقطه r

ck_{wvrk} : هزینهٔ حمل هر واحد پسماند w توسط وسیلهٔ نقلیه v از نقطه r به نقطه k

ch_{kw} : هزینهٔ بازیافت پسماندw توسط مرکز بازیافت k

ei_{wvir} : میزان آلودگی ناشی از حمل یک واحد پسماند w توسط وسیلهٔ نقلیه v از نقطه i به نقطهٔ r

er_{wvrk} : میزان آلودگی ناشی از حمل یک واحد پسماند w توسط وسیلهٔ نقلیهٔ v از نقطهٔ r به نقطهٔ k

d_{ijrk} : فاصلهٔ بین نقاط i, j, s, k.

wf_{rw} : وزن پسماند w حمل شده به مرکز جمع‌آوری r

wg_{kw} : وزن پسماند w حمل شده به مرکز بازیافت k

q_w : میزان تخمینی پسماند بازیافت شده w

p_{vij} : ظرفیت وسیلهٔ نقلیه v

U_{kw} : ظرفیت بازیافت مرکز k ام برای بازیافت پسماند w.

dem_w : میزان پسماند تولید شده w.

متغیرهای مسئله

با توجه به هدف مسئله باید متغیرهای مدل را تعیین کنیم که این متغیرها عبارت‌اند از:

X_{vijr} : اگر وسیلهٔ نقلیه v از یال (i,j) یا (i,r) یا (j,r) عبور کند ارزش آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

Y_{vkr} : اگر وسیلهٔ نقلیه v از یال (k,r) عبور کند ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

Z_{kw} : اگر مرکز بازیافت k پسماند w را بازیافت کند ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر۰ است.

E_{iv} : اگر گره iام آخرین گره‌ای باشد که وسیلهٔ نقلیه v ام سرویس می‌دهد، ارزش آن ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

H_w : میزان پسماند جمع‌آوری شده.

مدل مسئله

رابطهٔ ۱)
$$min\ f_1 = \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in S} X_{vijr} cr_{wvir} wf_{rw} d_{ijrk} + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R} Y_{vkr} ck_{wvrk} wg_{kw} d_{ijrk} + \sum_{w\in W}\sum_{k\in K} Z_{kw} ch_{kw}\, q_w$$

رابطهٔ ۲)
$$max\ f_2 = \sum_{w\in W}\sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{r\in R} H_w X_{vijr} \,/\, \sum_{w\in W} dem_w$$

رابطهٔ ۳)
$$min\ f_3 = \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in S} X_{vijr} ei_{wvir} d_{ijrk} + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R} Y_{vkr} er_{wvrk} d_{ijrk}$$

S.t:

رابطهٔ ۴)
$$\sum_{w\in W} U_{kw} \le \sum_{v\in V}\sum_{r\in S} y_{vkr} \quad \forall\, k \in K$$

رابطهٔ ۵)
$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R} X_{v0jr} = 0 \ \forall\, j \in N$$

رابطهٔ ۶)
$$\sum_{v\in V} Y_{vk0} = 0 \ \forall\, k \in K$$

رابطهٔ ۷)
$$\sum_{r\in R}\sum_{v\in V} X_{vijr} - \sum_{r\in R}\sum_{v\in V} X_{vjir} = 0 \quad \forall\, (i,j) \in N$$

رابطهٔ ۸)
$$\sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V} X_{vijr} + \sum_{k\in K}\sum_{v\in V} Y_{vkr} = 1 \quad \forall\, r \in R$$

رابطهٔ ۹)
$$\sum_{w\in W} Z_{kw} \ge 1 \ \forall\, k \in K$$

رابطهٔ ۱۰)
$$\sum_{v\in V} E_{iv} + p_{vji} = p_{vij} \quad \forall\, (i,j) \in N$$

رابطهٔ ۱۱)
$$\sum_{(i,j)\in N} X_{vijr} \ge \sum_{k\in K} Y_{vkr} \quad \forall\, v \in V, r \in R$$

رابطهٔ ۱۲)
$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R} Y_{vkr} \ge \sum_{w\in W} Z_{kw} \quad \forall\, k \in K$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R} q_w Y_{vkr} \le \sum_{w\in W} U_{kw} Z_{kw} \quad \forall\, k\in K, w\in W$$ رابطهٔ ۱۳)

$$d_{ijrk}, q_w, U_{kw} \ge 0 \; \forall (i,j)\in N, r\in R, k\in K, w\in W$$ رابطهٔ ۱۴)

$$X_{vijr}\,, Y_{vkr}, Z_{kw}, E_{iv} \in (0,1) \;\; \forall\, (i,j)\in N, r\in R, k\in K, w\in W, v\in V$$ رابطهٔ ۱۵)

رابطه ۱ مربوط به تابع هدف اقتصادی است که هزینه جمع‌آوری و بازیافت پسماند را حداقل می‌کند. قسمت اول، مجموع هزینه‌های حمل پسماندها را از سطل‌های زباله به مراکز پردازش توسط وسایل نقلیه نشان می‌دهد. قسمت دوم، گویای مجموع هزینه‌های حمل پسماندها از مراکز پردازش به مراکز بازیافت توسط وسایل نقلیه است و قسمت سوم، نشان‌دهندهٔ مجموع هزینه‌های مربوط به بازیافت پسماندهاست. همان گونه که در بالا اشاره شد، تابع هدف، به‌دنبال کمینه کردن تمامی این هزینه‌هاست. رابطهٔ ۲ مربوط به تابع هدف اجتماعی است که تلاش می‌کند رضایت شهروندان را از شبکه جمع‌آوری پسماند حداکثر کند. رابطهٔ ۳ مربوط به تابع هدف زیست‌محیطی است که به‌دنبال حداقل کردن آلودگی ناشی از حمل پسماندهای جمع‌آوری شده است. قسمت اول، نشان‌دهندهٔ مجموع آلودگی تولید شده ناشی از حمل پسماندها از سطل‌های زباله به مراکز پردازش توسط وسایل نقلیه است. قسمت دوم، مجموع آلودگی تولید شده ناشی از حمل پسماندها، از مراکز پردازش به مراکز بازیافت توسط وسایل نقلیه را نشان می‌دهد.

محدودیت ۴ محدودیت ظرفیت مراکز بازیافت را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۵ و ۶ تضمین می‌کنند که جمع‌آوری تمامی پسماندهای شهری، باید توسط وسایل نقلیه پوشش داده شود. واضح است که اگر سمت چپ محدودیت‌های ۵ و ۶ بیش از یک شود، جمع‌آوری پسماند بازیافت شده توسط وسایل نقلیه انجام شده است. محدودیت‌های ۷ و ۸ پیوستگی زنجیره را تضمین می‌کند. محدودیت ۹ تضمین می‌کند که بازیافت پسماند حداقل برای یک محموله پسماند جمع‌آوری شده انجام شود. محدودیت ۱۰ تضمین می‌کند که اگر ظرفیت وسیلهٔ نقلیه پر شود، آن نقطه پایانی جمع‌آوری برای وسیلهٔ نقلیه است. محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند که پسماند حمل شده از مراکز پردازش، بیشتر از پسماند جمع‌آوری شده نباشد. محدودیت ۱۲ تضمین می‌کند که پسماند بازیافت، بیشتر از پسماند حمل شده از مراکز بازیافت شده نباشد. محدودیت ۱۳ محدودیت ظرفیت مراکز بازیافت را بیان می‌کند. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ نوع متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

مدل استوار

رویکرد بهینه‌سازی استوار[1] یک متدلوژی مورد استفاده در مسائل بهینه‌سازی است که به تصمیم‌گیران این امکان را می‌دهد تا با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترها و ورودی‌ها، به‌دنبال راه‌حل‌هایی بگردند که در حضور تغییرات

1. Robust Optimization

ناگهانی یا عدم قطعیت‌ها عملکرد مناسبی داشته باشند (ولی زاده و همکاران، ۲۰۲۳). برخلاف روش‌های دیگر مانند منطق فازی که با احتمالاتی کمیاب و امکانی تطابق کمتری بین مدل و واقعیت دارند، رویکرد استوار به شکل دقیق تری تغییرات ناگهانی و عدم قطعیت ها را در نظر می‌گیرد. این روش به تعادل بین کارایی (بهره وری) و اطمینان (تضمین عملکرد در شرایط نامطلوب) می‌پردازد. در مدل پیشنهادی، برخی پارامترها و ورودی‌ها تحت تأثیر تغییرات ناگهانی یا عدم قطعیت‌ها قرار دارند. با استفاده از رویکرد استوار، تلاش می‌شود تا راه‌حل‌هایی یافته شوند که حتی در شرایط نامطلوب هم مدل پیشنهادی عملکردی مناسب داشته باشد. در کل، رویکرد استوار به تصمیم گیران کمک می‌کند تا مسائل بهینه‌سازی را به شکلی واقع‌گرایانه‌تر و با توجه به واقعیت‌های عدم قطعیت حل کنند و راه‌حل‌هایی را پیاده‌سازی کنند که در مقابل تغییرات ناگهانی مقاوم باشند.

در این مدل، تابع هدف به دو بخش شامل استواری در مدل و جواب تقسیم شد. در استواری مدل ممکن است در بعضی از قسمت‌های مدل، جواب غیرموجه داشته باشیم. بنابراین استواری میزان غیر موجه بودن در سناریوهای غیرموجه را کمینه می‌سازد؛ ولی در استواری جواب، اگر جواب بهینه ما، همان جواب بهینه استوار باشد، بهینگی تحت هیچ شرایطی تغییر نمی‌کند. بر اساس پژوهش‌های مروری انجام شده در حوزۀ بهینه‌سازی استوار، روشی که مالوی و همکاران[1] (۱۹۹۵) ارائه کردند، قابلیت دارد که میزان ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده یا میزان سطح خدمت را در نظر بگیرد و همچنین این روش جواب‌هایی را ارائه می‌دهد که نسبت به تحقق داده‌های هر یک از سناریوهای موجود در مجموعه سناریوها، حساسیت کمی دارند. روش مالوی به‌دلیل اثربخشی آن در مدل‌سازی سیستم های پیچیده با متغیرهای متعدد، که با پیچیدگی‌های مسئله تحقیق ما هم‌سو است، کاملاً شناخته شده است. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات قبلی با موفقیت رویکرد مالوی را در حوزه‌های مشابه به‌کار برده‌اند و پایه‌ای برای کاربرد آن در تحقیق ما فراهم کرده‌اند. با استفاده از روش مولوی، هدف ما این بود که از مزایای یک مدل تثبیت شده و معتبر برای به‌دست آوردن بینش‌های معنادار و نتایج استوار در مطالعه خود استفاده کنیم.

محدودیت‌ها نیز به دو دسته محدودیت‌های ساختاری و کنترلی تقسیم‌بندی می‌شوند که محدودیت‌های ساختاری مستقل از سناریو و عدم قطعیت هستند و محدودیت‌های کنترلی، محدودیت های وابسته به سناریو هستند. درواقع بهینه سازی استوار بین جواب بهینه مدل و شدنی بودن مدل یک سبک سنگین کردن[2] در اختیار تصمیم گیرنده قرار می‌دهد.

مدل بهینه‌سازی استوار برای یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی به‌صورت مدل زیر می‌توان نشان داد:

$$Min\ Z = \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) \quad \text{رابطۀ ۱۶)}$$

$$Wx = b \quad \text{رابطۀ ۱۷)}$$

$$B_s x + C_s y_s + \delta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega \quad \text{رابطۀ ۱۸)}$$

1. ???
2. Trade Off

رابطهٔ ۱۹) $$x \geq 0, y_s \geq 0 \; \forall s \in \Omega$$

متغیر x در این مدل یک متغیر طراحی یا مستقل از سناریو است و محدودیت ۱۸ نیز یک محدودیت ساختاری است. متغیر y_s نیز یک متغیر کنترلی یا وابسته به سناریو است. محدودیت ۱۹ نیز یک محدودیت کنترلی است و پارامترهای $\{B_s, C_s, e_s\}$ نیز پارامترهای تحت تأثیر سناریو هستند. همچنین بردار خطای δ_s، معیار نشدنی بودن در محدودیت‌های کنترل را تحت سناریوهای مختلف نشان می‌دهد (ولی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳).

بخش اول تابع هدف، مربوط به حل استوار است که نزدیک ترین جواب به بهینگی را به ازای همه سناریوها ارزیابی می‌کند. بخش دوم تابع هدف، معیار استواری مدل است که مربوط به شدنی بودن مدل به ازای تقریباً همه سناریوهایی است که امکان رخداد دارند. به‌عبارت‌دیگر، محدودیت‌های کنترل را تحت بعضی از سناریوها در صورت تجاوز از ناحیه شدنی مدل جریمه می‌کند (جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۵). ω به‌عنوان ضریب ریسک‌گریزی تعریف شده است که سبک‌سنگین کردن بین بهینگی و شدنی بودن مدل را نشان می‌دهد. برای مثال اگر ω برابر صفر باشد، این احتمال وجود دارد که جواب مدل نشدنی و خارج از فضای حل مدل شود و اگر این ضریب مقدار بالایی باشد، علاوه بر اینکه مدل شدنی بودن را به ازای سناریوهای مختلف حفظ می‌کند، به افزایش هزینه نیز منجر می‌شود (جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۵). مالوی و همکاران (۱۹۹۵) تعریف مناسب برای $\sigma(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_s)$ را به‌صورت زیر ارائه کردند:

رابطهٔ ۲۱) $$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s\in\Omega} P_s \xi_s + \lambda \sum_{s\in\Omega} P_s (\xi_s - \sum_{s\acute{\in}\Omega} P_{s'} \xi_{s'})$$

ضریب تغییرپذیری λ، میزان حساسیت تابع هدف به تغییر در داده‌های ورودی تحت سناریوهای مختلف است و با افزایش λ این تغییرپذیری (واریانس) کمتر می‌شود. جبارزاده و همکارانش (۲۰۱۵) نیز $\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$ را به‌صورت زیر تعریف کردند:

رابطهٔ ۲۲) $$\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) = \sum_{s\in\Omega} P_s \delta_s$$

درنتیجه می‌توان تابع هدف مدل را به‌صورت زیر بار دیگر مدل کرد:

رابطهٔ ۲۳) $$Min\ Z = \sum_{s\in\Omega} P_s \xi_s + \lambda \sum_{s\in\Omega} P_s (\xi_s - \sum_{s\acute{\in}\Omega} P_{s'} \xi_{s'}) + \sum_{s\in\Omega} P_s \delta_s$$

مدل را در حالت عدم قطعیت با بهینه سازی استوار و استفاده از رویکرد مالوی مجدداً مدل‌سازی نموده که به صورت زیر است:

s : اندیس سناریو.

بعد از مشخص کردن اندیس‌های مدل نوبت به تعیین پارامترها می‌رسد، این پارامترها عبارت‌اند از:

ρ_s : احتمال رخداد هر سناریو.

q_w^s : میزان تخمینی بازیافت پسماند w تحت سناریوی s.

λ : ضریب اهمیت تغییرپذیری.

ω : ضریب اهمیت شدنی بودن مدل

با توجه به هدف مسئله باید متغیرهای مدل را تعیین کنیم که این متغیرها عبارت‌اند از :

X^s_{vijr} : اگر تحت سناریوی s وسیلهٔ نقلیه v از یال (i,j) یا (i,r) یا (j,r) عبور کند ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

Y^s_{vkr} : اگر تحت سناریوی s وسیلهٔ نقلیه v از یال (k,r) عبور کند ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

Z^s_{kw} : اگر تحت سناریوی s مرکز بازیافت k پسماند w را بازیافت کند ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر۰ است.

E^s_{iv} : اگر تحت سناریوی s گره i ام آخرین گره‌ای باشد که وسیلهٔ نقلیه v ام سرویس می‌دهد ارزش آن ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

H^s_w : میزان پسماند جمع‌آوری شده.

θ_s, θ'_s : متغیرهای انحرافی توابع هدف.

δ_{ks} : متغیر نقض محدودیت کنترلی.

بیان ریاضی اهداف مسئله

رابطهٔ ۲۴)

$$
\begin{aligned}
Min\ Z = & \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\rho_s X^s_{vijr} cr_{wvir} d_{ijrk} \\
& + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{k\in K}\sum_{s\in S}\rho_s Y^s_{vkr} ck_{wvrk} d_{ijrk} \\
& + \sum_{k\in K}\sum_{w\in W}\sum_{s\in S}\rho_s Z^s_{kw} ch_{kw}\, q^s_w \\
& + \lambda\sum_{s\in S}\rho_s\Bigg(\sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R} X^s_{vijr} cr_{wvir} d_{ijrk} \\
& + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{k\in K} Y^s_{vkr} ck_{wvrk} d_{ijrk} + \sum_{k\in K}\sum_{w\in W} Z^s_{kw} ch_{kw}\, q^s_w \\
& - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\prime\in S}\rho_s X^{s\prime}_{vijr} cr_{wvir} d_{ijrk} \\
& - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{k\in K}\sum_{s\prime\in S}\rho_s Y^{s\prime}_{vkr} ck_{wvrk} d_{ijrk} \\
& - \sum_{k\in K}\sum_{w\in W}\sum_{s\prime\in S}\rho_s Z^{s\prime}_{kw} ch_{kw}\, q^s_w + 2\theta^{1\prime}_s\Bigg) + \omega\sum_{s\in S}\sum_{k\in K}\rho_s\, \delta^1_{ks}
\end{aligned}
$$

رابطهٔ ۲۵)

$$f_2 = \beta$$

رابطهٔ ۲۶)

$$f_3 = \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\rho_s X^s_{vijr} ei_{wvir} d_{ijrk} + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\rho_s Y^s_{vkr} er_{wvrk} d_{ijrk} + \lambda\sum_{s\in S}\rho_s\left(\sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} X^s_{vijr} ei_{wvir} d_{ijrk} + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} Y^s_{vkr} er_{wvrk} d_{ijrk} - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\prime\in S}\rho_s X^{s\prime}_{vijr} ei_{wvir} d_{ijrk} - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\sum_{s\prime\in S}\rho_s Y^{s\prime}_{vkr} er_{wvrk} d_{ijrk}\, q^s_w + 2\theta^{2\prime}_s\right) + \omega\sum_{s\in S}\sum_{k\in K}\rho_s \delta^{\,2}_{ks}$$

رابطهٔ ۲۷)

$$\left(\sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R} X^s_{vijr} cr_{wvir} d_{ijrk} + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{k\in K} Y^s_{vkr} ck_{wvrk} d_{ijrk} + \sum_{k\in K}\sum_{w\in W} Z^s_{kw} ch_{kw}\, q^s_w - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\prime\in S}\rho_s X^{s\prime}_{vijr} cr_{wvir} d_{ijrk} - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{k\in K}\sum_{s\prime\in S}\rho_s Y^{s\prime}_{vkr} ck_{wvrk} d_{ijrk} - \sum_{k\in K}\sum_{w\in W}\sum_{s\prime\in S}\rho_s Z^{s\prime}_{kw} ch_{kw}\, q^s_w + \theta^{1\prime}_s\right) \geq 0$$

رابطهٔ ۲۸)

$$\left(\sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} X^s_{vijr} ei_{wvir} d_{ijrk} + \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} Y^s_{vkr} er_{wvrk} d_{ijrk} - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{r\in R}\sum_{s\prime\in S}\rho_s X^{s\prime}_{vijr} ei_{wvir} d_{ijrk} - \sum_{(i,j)\in N}\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R}\sum_{s\prime\in S}\rho_s Y^{s\prime}_{vkr} er_{wvrk} d_{ijrk} + \theta^{2\prime}_s\right) \geq 0$$

$Eqs\ (4) - (16).$

نتایج محاسباتی در مطالعه کاربردی

شهر ساوه دارای ۳۰۰ هزار نفر جمعیت است. جهت جمع‌آوری پسماند در این شهر به مانند سایر نقاط ایران، در شرح وظایف شهرداری است که این نهاد با برگزاری مناقصه عمومی، به انتخاب پیمانکاران جهت جمع‌آوری پسماند تولید شده اقدام می‌کند. با توجه به صنعتی بودن این شهر، روزانه بالغ بر ۱۶۰ تن زباله شهری و صنعتی در این شهر تولید می‌شود. در مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده، سه مرکز تفکیک و پنج مرکز بازیافت پسماند به ظرفیت ۲۵۰ تن در روز درحال تفکیک و بازیافت پسماند تولید شده می‌باشند. ما در این پژوهش، حمایت دولت از پیمانکاران را در نظر گرفته‌ایم که این حمایت می‌تواند در کاهش هزینه کل پیمانکاران مؤثر باشد. در این حالت دولت در ازای هرواحد پسماند بازیافت شده توسط پیمانکار، یارانه‌ای به‌عنوان پاداش به پیمانکار تخصیص می‌دهد. توجه داشته باشید که نرخی به‌عنوان میزان نرمال بازیافت برای پیمانکار درنظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به وسایل نقلیه نیز از سایت پسماند ایران[1]، سایت شهرداری ساوه[2] و سایر سایت‌های مرتبط جمع‌آوری شده‌اند. باتوجه به اطلاعات موجود در شهرداری ساوه، تعداد وسایل نقلیه موجود ۴۵ دستگاه است که تعداد ۱۲۰ نفر این وسایل نقلیه را جهت جمع‌آوری پسماند همراهی می‌کنند. پارامترهای مربوط به خودروها در جدول ۲ نشان داده شده است. جدول ۳ نیز هزینه مسیرها و حجم زباله‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای مرتبط با حمل‌ونقل

میزان پسماند	تعداد مراکز بازیافت	تعداد مراکز پردازش	تعداد وسایل نقلیه
۱۶۰۰۰۰	۵	۳	۴۵

جدول ۳. اطلاعات مربوط به هزینه مسیرها و حجم زباله‌ها

شمارهٔ مسیر	طول مسیر (متر)	هزینه حمل (تومان)	حجم زباله (کیلوگرم)	شمارهٔ مسیر	طول مسیر (متر)	هزینه حمل (تومان)	حجم زباله (کیلوگرم)
۱	۱۲۵۲۴	۲۲۵۴۳۲	۴۴۸۵	۸	۱۶۳۳۳	۲۹۳۹۹۴	۴۴۱۴
۲	۱۵۳۲۸	۲۷۵۹۰۴	۳۹۴۶	۹	۱۸۲۴۵	۳۲۸۴۱۰	۳۹۶۲
۳	۱۱۰۲۴	۱۹۸۴۳۲	۳۴۹۹	۱۰	۱۷۲۷۵	۳۱۰۹۵۰	۳۸۴۶
۴	۱۲۳۵۴	۲۲۲۳۷۲	۴۳۷۱	۱۱	۱۸۱۸۷	۳۲۷۳۶۶	۴۴۱۹
۵	۸۸۵۶	۱۵۹۴۰۸	۴۶۲۷	۱۲	۲۰۵۲۴	۳۶۹۴۳۲	۴۵۵۹
۶	۱۰۳۷۴	۱۸۶۷۳۲	۴۳۴۱	۱۳	۱۹۸۲۱	۳۵۶۷۷۸	۴۵۷۹
۷	۱۴۰۴۷	۲۵۲۸۴۶	۴۵۲۴	۱۴	۲۰۹۱۶	۳۷۶۴۸۸	۴۶۷۹

1. https://pasmandiran.ir/
2. https://www.saveh.ir/fa-IR/DouranPortal/1/page/%D8%B5%D9%81%D8%AD%D9%87-%D8%A7%D8%B5%D9%84%DB%8C

برای حل مدل پیشنهادی با داده‌های واقعی و با روش حل دقیق توسط نرم افزار GAMS.23 به ۶۷/۵۲ ثانیه زمان نیاز دارد. در جدول‌های ۴ و ۵ میزان پسماند تولید شده در ۱۲ گره (نقطه)، بر اساس سه سناریو احتمالی ارائه شده است.

جدول ٤. اطلاعات مربوط به هزینه مسیرها و حجم زباله‌ها

سناریوها	میزان پسماند تولید شده در گره‌ها												احتمال وقوع
	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	٦	٥	٤	۳	۲	۱	
بیشترین میزان پسماند بازیافتی	۹۳۰	۷۰۰	۱۰۸۰	۶۹۰	۷۸۰	۶۳۰	۸۹۰	۵۱۰	۸۴۰	۵۸۰	۶۵۰	۱۱۰۰	۰/۳۵
میزان متوسط	۵۱۵	۴۰۰	۷۸۰	۳۰۵	۳۵۰	۲۸۰	۴۱۰	۲۹۰	۴۲۰	۲۶۰	۳۲۰	۷۸۰	۰/۴۵
کمترین میزان پسماند بازیافتی	۲۷۵	۲۳۰	۵۵۰	۱۷۵	۱۰۵	۱۶۰	۱۷۰	۷۰	۲۴۰	۱۰۵	۱۴۰	۴۲۰	۰/۲۰

برای مسئله در مقیاس کوچک، از روش حل دقیق توسط نرم‌افزار گمز و از حل کننده CPLEX انجام می‌شود. علاوه بر آن با توجه به افزایش نمایی در زمان محاسبات با بزرگ‌تر شدن اندازه مسئله، حل مسئله با راه حل دقیق امکان‌پذیر نبوده و دو الگوریتم فراابتکاری NSGAII و MOPSO برای حل مسائل با اندازه متوسط و بزرگ اتخاذ شد. الگوریتم‌های فراابتکاری در نرم‌افزار MATLAB 7.11 پیاده‌سازی شده‌اند. تمام آزمایش‌ها روی رایانه‌ای با پردازنده Core i7 3.40 گیگاهرتز، مجهز به ۸:۰۰ گیگابایت رم تحت سیستم عامل ویندوز ۱۱ انجام می‌شود.

دلیل انتخاب الگوریتم‌های فراابتکاری MOPSO و NSGAII: الگوریتم MOPSO به‌دلیل کارایی در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف متضاد و فضای جست‌وجوی بزرگ انتخاب شد، در حالی که NSGAII به‌عنوان یک الگوریتم شناخته شده و مؤثر در حفظ مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌های نامغلوب و سرعت آن در حل مسائل با پیچیده بالا انتخاب شد. از این دو الگوریتم به‌منظور ارزیابی عملکرد و تجزیه‌وتحلیل مسئله استفاده شد تا تعیین کنیم کدام رویکرد در مسائل خاص بهتر عمل می‌کند و بینش‌های متعددی در مورد مسئله بهینه‌سازی ارائه دهد. استفاده از دو الگوریتم، به ما امکان ارزیابی دقیق‌تر و تعمیم‌پذیری در زمینه رویکردهای فراابتکاری و رویکردهای بهینه‌سازی چند هدفه را می‌دهد و از تعصب بالقوه جلوگیری می‌کند.

الگوریتم های فراابتکاری معمولاً روی پارامترهای خود حساس هستند و جواب‌های ارائه شده به مقدار بسیار زیادی به پارامترهای آنان بستگی دارد. در یک طراحی پارامتر کارا، هدف اول شناسایی و تنظیم فاکتورهایی است که تغییرات پاسخ را به حداقل می‌رساند و هدف بعدی شناسایی فاکتورهای کنترل‌پذیر و کنترل‌ناپذیر است؛ از این رو با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ وارد پنجره (DOE) شده و روش تاگوچی[1] را انتخاب می‌کنیم. در اینجا باید تعداد فاکتورهای مورد نیاز جهت تعیین تعداد و نحوهٔ ترکیب سطوح آزمایش‌ها و تعداد سطوح مشخص شود. در ادامه پارامترهای استفاده شده برای حل این مدل توضیح داده خواهند شد. همان طور که بیان شد، در حل این مدل از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

1. Taguchi

جدول‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده پارامترهای در نظر گرفته شده برای الگوریتم الگوریتم‌های فراابتکاری است. در این جدول p_m نشان‌دهندهٔ نرخ جهش و p_c نشان‌دهنده نرخ ترکیب است. با توجه به آرایه‌های متعامد استاندارد تاگوچی[1]، L9 به‌عنوان طرح مناسب آزمایشی برای تنظیم پارامترهای پیشنهادی انتخاب شده است. آرایهٔ L9 طرح آزمایشی با ۹ آزمایش است. طرح‌های آزمایشی در جدول‌های ۵ و ۶ برای هر دو الگوریتم آمده است.

جدول ۵. طرح آزمایشی با آرایه متعامد L9 برای الگوریتم NSGA-II

پارامتر	تعریف پارامتر	سطح پارامتر در مسائل با ابعاد بزرگ			سطح پارامتر در مسائل با ابعاد متوسط			سطح پارامتر در مسائل با ابعاد کوچک		
		۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱
Max_{It}	ماکزیمم تعداد تکرار	۲,۷۰۰	۲,۵۰۰	۲,۴۰۰	۲,۳۰۰	۲,۲۰۰	۲,۱۰۰	۱,۱۰۰	۱,۰۰۰	۹۰۰
N_{pop}	تعداد جمعیت	۷۰	۶۰	۵۰	۷۰	۶۰	۵۰	۷۰	۶۰	۵۰
p_c	احتمال تقاطع	۰/۸	۵/۰	۵/۰	۷/۰	۷/۰	۵/۰	۵/۰	۷/۰	۶/۰
p_m	احتمال جهش	۰/۳	۰/۳	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۲

جدول ٦ طرح آزمایشی با آرایه متعامد L9 برای الگوریتم MOPSO

پارامتر	تعریف پارامتر	سطح پارامتر در مسائل با ابعاد کوچک		سطح پارامتر در مسائل با ابعاد متوسط		سطح پارامتر در مسائل با ابعاد بزرگ	
		۱	۲	۱	۲	۱	۲
Max_{It}	ماکزیمم تعداد تکرار	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۴۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۲۱۰۰
N_{pop}	تعداد جمعیت	۶۰	۷۰	۶۰	۷۰	۶۰	۷۰
N_{rep}	تعداد اعضاءآرشیو پارتو	۶۰	۷۰	۶۰	۷۰	۶۰	۷۰
W	ضریب اینرسی	۵	۶	۵	۶	۵	۶
C_1	ضریب یادگیری شخصی	۱/۴	۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۶
C_2	ضریب یادگیری جمعی	۱/۹	۲	۱/۹	۲	۱/۹	۲
p_m	احتمال جهش	۲	۲۵	۱۹	۲	۱۹	۲

نتایج و مقایسه‌ها

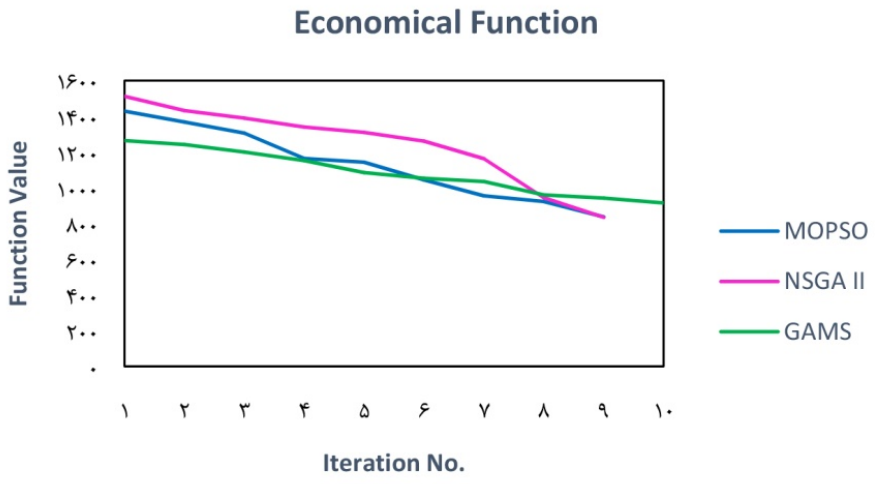
در این بخش نتایج به‌دست آمده از حل مدل توسط روش حل دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرند. برای این منظور، مرزهای پارتو به‌دست آمده توسط روش‌های حل مقایسه می‌شوند. در ادامه به بررسی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی و روش حل دقیق می‌پردازیم.

1. Orthogonal arrays

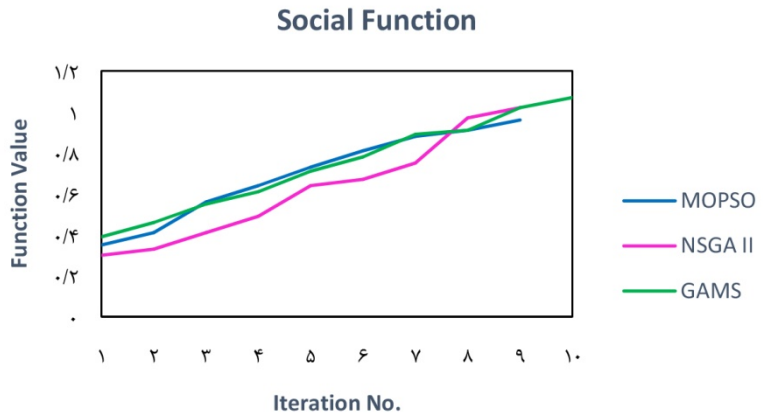
جدول ۷ جواب بهینه پارتو حاصل از حل توسط روش حل دقیق و الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO

شماره	GAMS			NSGA-II			MOPSO		
	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم
۱	۱۲۶۴	۰/۳۹	۱۴۸۷	۱۵۱۲	۰/۳	۱۶۰۸	۱۴۲۹	۰/۳۵	۱۳۹۲
۲	۱۲۴۲	۰/۴۶	۱۴۶۲	۱۴۳۲	۰/۳۳	۱۵۸۹	۱۳۶۸	۰/۴۱	۱۳۳۲
۳	۱۲۰۰	۰/۵۵	۱۴۰۴	۱۳۹۰	۰/۴۱	۱۵۴۴	۱۳۰۶	۰/۵۶	۱۲۹۰
۴	۱۱۵۲	۰/۶۱	۱۳۰۲	۱۳۴۰	۰/۴۹	۱۳۹۲	۱۱۶۴	۰/۶۴	۱۲۷۶
۵	۱۰۸۵	۰/۷۱	۱۱۳۳	۱۳۱۰	۰/۶۴	۱۳۸۳	۱۱۴۳	۰/۷۳	۱۲۴۷
۶	۱۰۵۳	۰/۷۸	۱۰۹۳	۱۲۶۱	۰/۶۷	۱۲۳۲	۱۰۴۴	۰/۸۱	۱۱۶۵
۷	۱۰۳۵	۰/۸۹	۱۰۶۲	۱۱۶۳	۰/۷۵	۱۱۷۴	۹۵۵	۰/۸۸	۱۱۳۵
۸	۹۶۰	۰/۹۱	۱۰۰۰	۹۴۴	۰/۹۷	۱۱۲۱	۹۲۳	۰/۹۱	۱۱۰۸
۹	۹۴۲	۱/۰	۹۹۴	۸۳۴	۱/۰۲	۱۰۴۲	۸۳۷	۰/۹۶	۱۰۳۰
۱۰	۹۱۵	۱/۰	۹۸۳	–	–	–	–	–	–

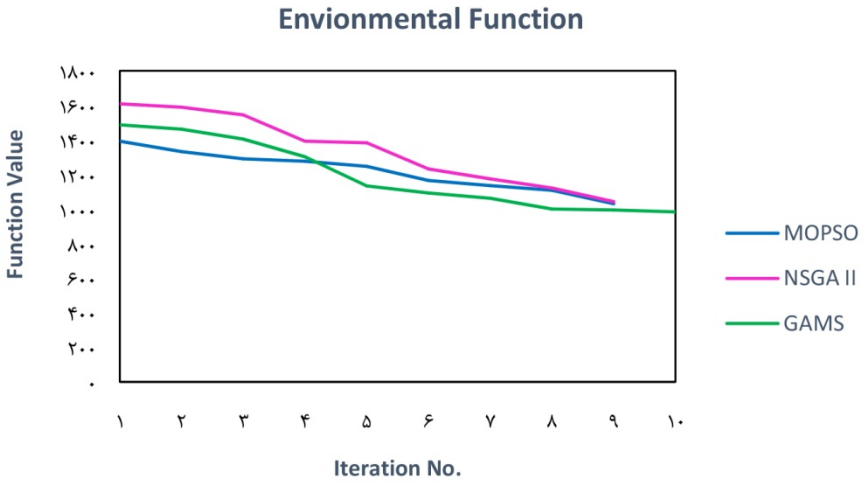
در شکل های ۲ تا ۴ نقاط پارتو به‌دست آمده توسط روش حل دقیق و دو الگوریتم برای مسئله به‌عنوان مثالی از ابعاد کوچک تشریح می‌شود.



شکل ۲. مرزهای پارتوی ایجادشده برای تابع هدف اقتصادی



شکل ۳. مرزهای پارتوی ایجادشده برای تابع هدف اجتماعی



شکل ٤. مرزهای پارتوی ایجادشده برای تابع هدف زیست‌محیطی

شکل‌های ۲ تا ۴ مرز پارتو ایجاد شده برای توابع هدف را نشان می‌دهد. با توجه به ذات تابع هدف اول (میزان هزینه) و تابع هدف سوم (سطح آلایندگی)، می‌توان مشاهده نمود که با تکرار مسئله به مراتب ارزش توابع هدف اول و سوم کاهش یافته است. البته که ارزش تابع هدف دوم (رضایت شهروندان) نیز در تکرارهای مختلف مسئله به مراتب افزایش یافته است. می‌توان دریافت که با کاهش آلایندهای زیست‌محیطی، رضایت عمومی رو به افزایش است. البته رضایت شهروندان به موارد دیگر از جمله میزان پسماند جمع‌آوری شده نیز بستگی دارد.

در ادامه به مقایسه الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه مطرح شده می‌پردازیم. پس از کدینگ مسئله به‌منظور ارزیابی کارایی و عملکرد الگوریتم MOPSO با الگوریتم NSGA-II در ۱۰ مسئله نمونه مورد سنجش قرار می‌دهیم. برای به‌دست آوردن نتایج قابل اطمینان از هر نمونه ۴ اجرا انجام می‌دهیم. نتایج نمونه به ازای ترکیبات بر اساس معیارهایی که در فصل قبل مطرح شد برای هر دو الگوریتم در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸ نتایج شاخص‌های متریک برای الگوریتم MOPSO و NSGA-II

MOPSO							
TIME	NPS	S	SNS	RAS	MID	n*m	Problem
۱۵۵	۶۰	۲/۴۹۲۶	۷۹/۱۸۱۴	۱/۰۲۶۸	۱/۱۵۳۸	۱۰*۲	SS[1] ۰۱
۱۵۰	۴۷	۲/۵۰۶۳	۵۷/۶۰۱۰	۰/۹۳۷۴	۱/۰۴۷۱	۱۰*۳	SS ۰۲
۱۶۴	۶۰	۲/۴۱۲۶	۸۸/۰۲۳۹	۰/۹۳۰۲	۱/۰۴۴۴	۱۵*۶	SS ۰۳
۱۷۷	۶۸	۲/۳۶۹۴	۱۱۶/۱۳۸۳	۰/۹۶۱۵	۱/۰۷۶۳	۲۰*۸	MS[2] ۰۴
۱۸۰	۷۲	۲/۲۲۸۸	۱۵۹/۸۹۳۷	۰/۹۴۸۹	۱/۰۶۹۲	۳۰*۱۲	MS ۰۵
۱۸۹	۴۵	۲/۳۱۱۴	۱۴۶/۴۲۹۲	۰/۹۴۴۶	۱/۰۶۲۸	۴۰*۱۶	MS ۰۶
۱۹۷	۴۷	۲/۳۸۵۱	۱۶۵/۳۸۷۲	۰/۹۳۹۶	۱/۰۵۶۱	۵۰*۲۰	LS[3] ۰۷
۲۱۴	۵۱	۲/۲۸۷۲	۱۹۴/۶۷۴۳	۰/۹۸۰۲	۱/۱۰۱۳	۶۰*۲۵	LS ۰۸
۲۲۱	۴۹	۲/۳۳۷۰	۱۹۱/۶۹۸۰	۰/۹۰۷۰	۱/۰۲۰۰	۸۰*۲۵	LS ۰۹
۲۳۶	۵۶	۲/۳۰۱۸	۲۲۳/۵۵۲۴	۰/۸۷۵۲	۰/۹۸۴۱	۸۰*۳۰	LS ۱۰
۲۱۳	۶۳	۲/۶۷۶۱	۱۶۱/۰۹۲۹	۱/۰۷۰۳	۱/۲۰۲۱		Total value
NSGA-II							
TIME	NPS	S	SNS	RAS	MID	n*m	Problem
۲۸۴	۱۳	۲/۰۷۰۱	۶۶/۷۱۶۸	۰/۹۱۸۲	۰/۹۱۵۹	۱۰*۲	SS ۰۱
۲۷۲	۱۶	۲/۰۴۴۱	۴۸/۶۴۴۵	۰/۷۶۱۹	۰/۷۵۰۳	۱۰*۳	SS ۰۲
۳۰۳	۱۶	۲/۰۳۰۸	۷۳/۹۴۸۸	۰/۹۷۱۷	۰/۹۶۹۹	۱۵*۶	SS ۰۳
۳۱۱	۳۶	۱/۹۲۰۳	۹۸/۸۹۹۹	۰/۹۴۳۱	۰/۹۳۹۶	۲۰*۸	MS ۰۴
۳۱۵	۲۶	۱/۸۱۳۴	۱۲۹/۷۴۲۵	۰/۸۷۷۸	۰/۸۷۵۲	۳۰*۱۲	MS ۰۵
۳۳۲	۲۷	۱/۸۵۷۹	۱۱۹/۵۳۲۶	۰/۸۴۶۵	۰/۸۴۱۱	۴۰*۱۶	MS ۰۶
۳۴۳	۳۰	۱/۷۹۱۰	۱۳۵/۲۸۴۴	۰/۸۴۶۴	۰/۸۳۹۵	۵۰*۲۰	LS ۰۷
۳۷۱	۳۲	۱/۸۳۲۲	۱۵۴/۰۸۵۰	۰/۷۶۶۹	۰/۷۶۱۷	۶۰*۲۵	LS ۰۸
۳۸۱	۲۲	۱/۸۲۳۳	۱۵۴/۹۳۲۶	۰/۷۵۰۸	۰/۷۴۷۲	۸۰*۲۵	LS ۰۹
۴۱۴	۲۱	۱/۷۱۱۸	۱۷۷/۴۴۸۲	۰/۷۷۹۲	۰/۷۷۶۰	۸۰*۳۰	LS ۱۰
۳۵۱	۲۵	۱/۹۹۱۹	۱۲۲/۲۰۶۶	۰/۸۹۲۱	۰/۸۸۷۲		Total value

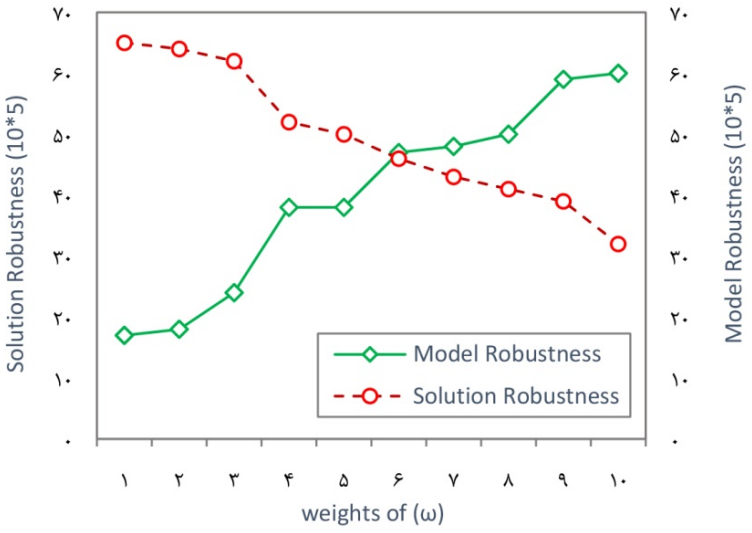
همچنین، شکل ۵ آرشیو پارتوی حاصل شده از اجرای الگوریتم‌ها در مسائل گوناگون را نشان می‌دهد.

1. Small Scale
2. Medium Scale
3. Large Scale

شکل ۵. نمودار نتایج محاسباتی شاخص‌های متریک در مسائل مختلف

تمام معیارهای مطرح شده در شکل ۵، به‌صورت کلی جواب‌های غیرمغلوب حاصله از هر الگوریتم را مورد بررسی قرار می‌دهند. در حقیقت معیارهای SNS و S در صورتی برای مقایسه دو الگوریتم مفیدند که جواب‌های غیرمغلوب دو الگوریتم از لحاظ معیار شاخص نرخ دستیابی به توابع هدف تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته باشند. توجه داشته باشید که برای معیار گستردگی جواب‌های غیرمغلوب (SNS) هرچه مقدار به‌دست آمده بیشتر باشد، نشان‌دهندهٔ این است که جواب‌های به‌دست‌آمده از پراکندگی بیشتری برخوردارند. برای به‌دست آوردن نتایج قابل اطمینان از معیار منطقه زیر

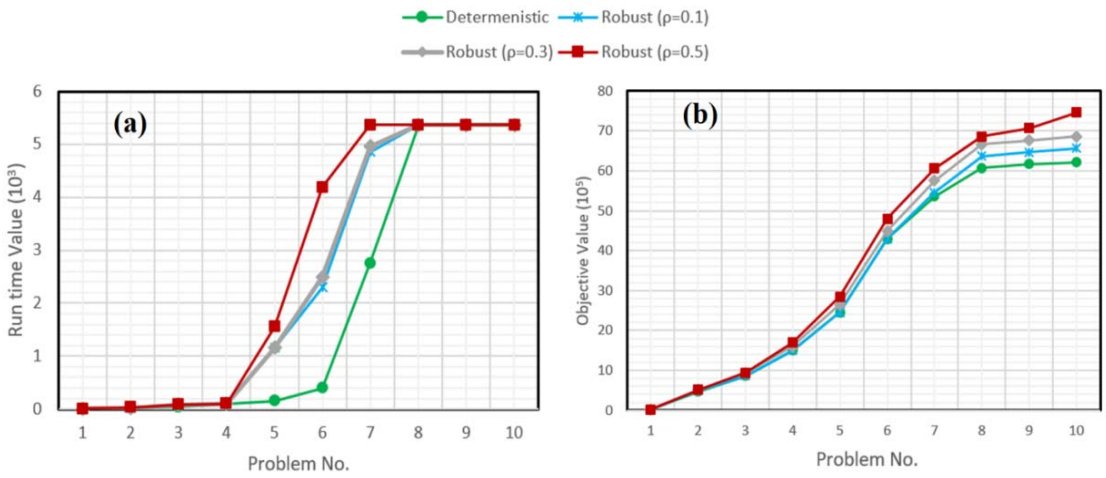
پوشش گستردگی جواب‌های غیرمغلوب (SNS) و جلوگیری از خطاهای آزمایش، در ابتدا نتایج جواب‌های غیر مغلوب حاصله از هر ۴ تکرار از الگوریتم را ثبت کرده و سپس جواب‌های غیر مغلوب حاصله از هر الگوریتم را با هم مقایسه می‌کنیم. در شکل ۶ تحلیل حساسیت مدل در دوحالت قطعی و استوار بر اساس پارامترهای تصادفی نشان داده شده است.



شکل ٦. تحلیل حساست مدل بر اساس میزان تابع هدف

همان طور که در شکل ۶ می‌توان دید ارزیابی استحکام مدل و استحکام روش حل بر اساس وزن ω است که نشان‌دهنده امکان‌سنجی مدل است (ولی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۱). همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، استحکام مدل مقادیر مختلفی را بر اساس مقدار متفاوت ω نشان می‌دهد. در واقع، مقادیر مختلف به‌دست‌آمده برای استحکام مدل نشان می‌دهد که محدودیت‌های کنترلی مدل مقاوم تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد مدل پیشنهادی دارد. شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش وزن ω، استحکام روش حل افزایش می‌یابد. اما با افزایش وزن ω ، شاهد روند نزولی در استحکام مدل هستیم که به‌دلیل ماهیت به حداقل رساندن مشکل است. به عبارت دیگر، با افزایش وزن ω، اگرچه استحکام مدل امکان‌پذیر است؛ اما در هر سناریو افزایشی در تابع هدف هزینه رخ داده است.

برای بررسی دقیق‌تر مدل و بررسی امکان‌سنجی مدل بر اساس نوسان‌های پارامترهای نامشخص، در شکل ۷، تجزیه‌وتحلیل حساسیت مدل بر اساس تغییر پارامتر ρ انجام شده است. با توجه به شکل ۷ (الف)، می‌توان مشاهده کرد که نتایج به‌دست آمده برای مدل در حالت استوار پاسخ‌های بسیار بهتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، در شکل ۷ (ب) عملکرد مدل پیشنهادی را بر اساس زمان حل قابل مشاهده است که افزایش تدریجی زمان حل مدل با افزایش اندازه پارامتر ρ را نشان می‌دهد.



شکل ۷ . تجزیه‌وتحلیل حساسیت مدل بر اساس پارامتر ρ

نتایج مدیریتی

مدیریت صحیح پسماند علاوه بر کاهش آلودگی محیط زیست، کاهش هزینه‌های مربوط به جمع‌آوری و دفع پسماند را به‌دنبال خواهد داشت. از سوی دیگر ورود این مواد به محیط زیست، موجب آلودگی آب، هوا و خاک و به خطر افتادن بهداشت و سلامت افراد جامعه می‌شود. همچنین تخمیر مواد فسادپذیر در پسماند موجب انتشار بوهای نامطبوع در محیط و در نتیجه آزار مردم می‌شود. ما در این تحقیق تلاش نمودیم که فرایند جمع‌آوری پسماندهای شهری را با درنظر گرفتن ابعاد پایداری، مدل‌سازی نموده و درصدد بهبود این فرایند قدم برداریم. پس از فورموله کردن مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری و حل مدل با استفاده از داده‌های واقعی شهر ساوه به‌عنوان مطالعه موردی به بینش‌های مدیریتی زیر دست یافتیم:

۱. به‌منظور کاهش هزینه‌های مربوط به جمع‌آوری پسماند شهری و درنظر گرفتن مؤلفه اقتصادی، مدیران می‌توانند با پیروی از مدل پیشنهادی، تعداد وسایل نقلیه و تعداد نیروی کار موردنیاز را به بهینه‌ترین شکل ممکن انتخاب نموده و با تعیین مسیرهای بهینه در کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل تلاش نمایند. شکل ۲ این تحقیق نشان داده است که در تکرارهای مختلف حل مدل پیشنهادی، هزینه کل به طرز چشمگیری کاهش یافته است.

۲. به‌منظور افزایش رضایت شهروندان از عملکرد سیستم جمع‌آوری پسماند شهری، مدیران می‌توانند با الگو از مدل پیشنهادی، تلاش نمایند تا با افزایش ظرفیت تسهیلات موجود و جمع‌آوری به‌موقع پسماندهای تولید شده، رضایت شهروندان را افزایش کنند.

۳. باتوجه به تأثیر مستقیم جمع‌آوری پسماند شهری و لزوم توجه به مسائل زیست‌محیطی، نیاز است تا مدیران اجرایی ضمن درنظر گرفتن خطرات مربوط به انباشت پسماند در سطح شهر و ایجاد آلودگی زیست‌محیطی، درصدد بهینه نمودن ناوگان جمع‌آوری از نظر میزان سوخت فسلی مصرفی و تأثیرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از حمل پسماند نیز اقدام نمایند. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شد، مدل پیشنهادی به‌طور

چشمگیری اثرهای زیست‌محیطی جمع‌آوری پسماند شهری را کاهش داده است و می‌تواند الگوی مناسبی جهت تصمیم‌گیری مدیران باشد.

نتیجه‌گیری

پسماند شهری یکی از مسائل اساسی و چالش برانگیز در شهرها و برای محیط زیست است که نیازمند توجه بیشتر است. در این تحقیق، با ارائه یک مدل ریاضی سعی شد مسیریابی وسایل نقلیه برای جمع‌آوری پسماند در شهر ساوه بهینه گردد. مدلی که در این تحقیق ارائه شده است، با توجه به ابعاد پایداری و عوامل محیطی مرتبط با جمع‌آوری پسماند شهری، توابع هدف مختلف را مورد بررسی قرار داده است. در بُعد اقتصادی، مدیریت هزینه‌ها بسیار حیاتی است و چون هزینه جمع‌آوری پسماند بخش اعظمی از هزینه‌های مدیریت پسماند را تشکیل می‌دهد، بهینه‌سازی مسیرها و کاهش هزینه‌های مرتبط با بازیافت پسماند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شد نتایج حل مدل در مقیاس کوچک و در طول تکرارهای مختلف به‌طور قابل توجهی کاهش هزینه‌های جمع‌آوری پسماند را نشان می‌دهد. علاوه بر آن اطلاعات مربوط به جدول ۸ نیز کاهش هزینه کل را در ابعاد بزرگ مسئله تایید می‌نماید. در بُعد اجتماعی، مطالعه حجم پسماند جمع‌آوری شده نسبت به پسماند تولید شده، از اهمیت خاص برخوردار است. این بهبود در جمع‌آوری پسماند باعث افزایش رضایت شهروندان از خدمات شهری میگردد. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شد نتایج حل مدل در مقیاس کوچک و در طول تکرارهای مختلف به‌طور قابل توجهی افزایش رضایت شهروندان را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به اطلاعات مربوط به جدول ۸ نیز افزایش رضایت شهروندان را در ابعاد بزرگ مسئله تایید می‌نماید. در نهایت، در بُعد زیست‌محیطی، همان طور که در شکل ۴ نشان داده شد نتایج حل مدل در مقیاس کوچک و در طول تکرارهای مختلف به‌طور شایان توجهی کاهش اثرهای زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. علاوه بر آن، اطلاعات مربوط به جدول ۸ نیز کاهش اثرهای زیست‌محیطی را در ابعاد بزرگ مسئله تأیید می‌نماید.

از آنجایی که برای حل مسائل با اندازه بزرگ این نرم افزار زمان بر می‌باشد الگوریتم ژنتیک ناملغوب و MOPSO را مورد استفاده قرار دادیم. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در ابعاد کوچک به مقایسه جواب‌های آن با جواب‌های حل GAMS و برای ابعاد بزرگ متوسط تابع هدف حاصل شده در ۱۰ تکرار را برای الگوریتم‌ها به‌دست می‌آوریم و آن‌ها را با هم مقایسه کرده و کارایی مدل پیشنهادی و قابلیت کاربرد الگوریتم‌ها را برای مسائل مختلف تست کردیم. نتایج محاسباتی نشان دادند که اگر چه هر دو روش هم از نظر زمانی و هم از نظر مقادیر تابع هدف مناسب می‌باشند، اما الگوریتم MOPSO براساس معیار Time وMID و Spacing از مطلوبیت بالاتری برخورداراست. از مقایسه الگوریتم‌ها، الگوریتم NSGA-II براساس معیار NPS وDiversity از مطلوبیت بالاتری برخوردار است.

در طراحی و مدیریت شبکه جمع‌آوری پسماند شهری، یکی از چالش های مهم مشارکت اجتماعی در این فرایند است. مشارکت اجتماعی می‌تواند به‌عنوان یک عامل کلیدی در بهبود بهره وری و زمانبندی مناسب برای جمع‌آوری پسماند شهری مورد استفاده قرار گیرد. با اشتراک گذاری اطلاعات و نظرات مردم، می‌توان به بهبود تعیین مسیر ها، زمانبندی مناسب‌تر جمع‌آوری، و استفاده بهینه از منابع انسانی و مالی دست یافت. این تعامل باعث می‌شود که شبکه

جمع‌آوری پسماند شهری به شکلی کارآمدتر و پایدارتر عمل کند. در طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل مدیریت پسماند، انتخاب مکان‌های مناسب برای مخزن‌ها و ایستگاه‌های جمع‌آوری از اهمیت بالایی برخوردار است. تحقیقات آتی می‌توانند با مدل‌سازی دقیق مکان‌های بهینه برای استقرار مخزن‌ها و ایستگاه‌های جمع‌آوری به بهبود کلی عملکرد سیستم کمک کنند. همچنین، با مدیریت بهینه ناوگان جمع‌آوری زباله‌ها و تخصیص مکان‌های موقت جهت استقرار بهینه افراد و وسیلهٔ نقلیه‌ها، زمان جمع‌آوری و هزینه‌ها کاهش می‌یابند. در این زمینه، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به بهبود عملکرد و بهره‌وری سیستم کمک کند و مشکلات مسیریابی و زمان‌بندی بهینه‌تری ارائه دهد.

منابع

اسلام پناه، آرش؛ جعفر نژاد، احمد؛ حیدری دهویی، جلیل؛ تقی‌زاده یزدی، محمدرضا (۱۴۰۲). طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس پسماندهای صنعتی با به‌کارگیری سیستم بین خودرویی هوشمند (VANET) مورد مطالعه: خودروسازی ایران. *مدیریت صنعتی*، ۱۵(۳)، ۴۴۷- ۴۷۷.

فرحی ولوکلایی، ابوالقاسم (۱۴۰۰). ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک ایمنی در فرایند پردازش پسماند شهری در محیط فازی. *مطالعات مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، ۷ (۱۸)، ۷۳- ۸۴.

References

Abdelli, I.S., Abdelmalek, F., Djelloul, A., Mesghouni, K., Addou, A. (2016). GIS based approach for optimized collection of household waste in Mostaganem city (Western Algeria). *Waste Management & Research*, 34 (5), 417–426.

Babaee Tirkolaee, E., Mahdavi, I., Seyyed Esfahani, M. M., (2018). A robust periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection considering drivers and crew's working time. *Waste Management*, 76, 138-146.

Boskovic, G., Jovicic, N., Jovanovic, S., Simovic, V. (2016). Calculating the costs of waste collection: a methodological proposal. *Waste Manage. Res*., 34 (8), 775–783.

Dai, C., Li, Y. P., Huang. G. H. (2011). A two-stage support-vector-regression optimization model for municipal solid waste management – A case study of Beijing, China, *Journal of Environmental Management*, 92(12), 3023-3037.

Edalatpour, M. A., Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J., Karimi, B., Bahli, B. (2018). Investigation on a novel sustainable model for waste management in megacities: A case study in Tehran municipality. *Sustainable Cities and Society*, 36, 286-301.

Erkut, E., Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., & Tjandra, S. A. (2008). A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. *European Journal of Operational Research,* 187, 1402–1421.

Eslampanah, A., Jafarnezhad, A., Heidary, J. & Taghizadeh-Yazdi, M. (2023). Utilizing Vehicular Ad Hoc Networks (VANET) for the Design of an Industrial Waste Reverse Supply Chain: A Case Study in the Iranian Automotive Industry. *Industrial Management Journal,* 15(3), 447-477. (*in Persian*)

Faccio, M., Persona, A., Zanin, G. (2011). Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Waste Management*, 31 (12), 2391–2405.

Fernández-Aracil, P., Ortuño-Padilla, A., Melgarejo-Moreno. J. (2018). Factors related to municipal costs of waste collection service in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 17520, 553-560.

Ferri, G. L., de Lorena Diniz Chaves, G., & Ribeiro, G. M. (2015). Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement. *Waste Management*, 40, 173–191.

Garibay-Rodriguez, J., Laguna-Martinez, M. G., Rico-Ramirez, V., Botello-Alvarez. J. E. (2018). Optimal municipal solid waste energy recovery and management: A mathematical programming approach. *Computers & Chemical Engineering*, 1192, 39405.

Habibi, F., Asadi, E., Sadjadi, S. J., & Barzinpour, F. (2017). A multi-objective robust optimization model for site-selection and capacity allocation of municipal solid waste facilities: A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 166, 816–834.

Ibáñez-Forés, V., Coutinho-Nóbrega, C., Bovea, M. D., Mello-Silva, C. de Júlia Lessa-Feitosa-Virgolino. (2018). Influence of implementing selective collection on municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study, Resources, *Conservation and Recycling*, 134, 100-111.

Inghels, D., Dullaert, W. & Vigo, D. (2016). A service network design model for multimodal municipal solid waste transport, *European Journal of Operational Research*, 254(1), 68-79.

Jaunich, M.K., Levis, J.W., DeCarolis, J.F., Gaston, E.V., Barlaz, M.A., Bartelt-Hunt, S.L., Jones, E.G., Hauser, L., Jaikumar, R. (2016). Characterization of municipal solid waste collection operations. *Resour. Conserv. Recycl.*, 114, 92–102.

Li, Y., & Huang, G. (2010). An interval-based possibilistic programming method for waste management with cost minimization and environmental-impact abatement under uncertainty. *Science of the total environment*, 408(20), 4296-4308.

Mello, V. M., Santos, D., Freitas, R., Yokoyama, L. & Cammarota, M. C. (2018). Energy generation in the treatment of effluent from washing of municipal solid waste collection trucks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30, 105-113.

Mirdar Harijani, A., Mansour, S., & Karimi, B. (2017b). Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste – A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 151, 96–108.

Mohammaditabar, D., Ghodsypour, SH. & Hafezalkotob, A. (2015). A game theoretical analysis in capacity-constrained supplier-selection and cooperation by considering the total supply chain inventory costs. *International Journal of Production Economics*, 181, 87-97.

Nguyen, T.K., Nguyen, T.N.A., Nguyen, N.D., Dinh, T.H.V. (2017). Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation based, and agent-based model. *Waste Management*, 59, 14–22. https://doi.org/ 10.1016/j.wasman.2016.10.048.

Phillips, J., Mondal. M. K. (2014). Determining the sustainability of options for municipal solid waste disposal in Varanasi, India. *Sustainable Cities and Society*, 10, 11-21.

Rahmanifar, G., Mohammadi, M., Sherafat, A., Hajiaghaei-Keshteli, M., Fusco, G., & Colombaroni, C. (2023). Heuristic approaches to address vehicle routing problem in the Iot-based waste management system. *Expert Systems with Applications*, 220, 119708.

Richter, A., Ng, K.T.W., Pan, C., 2018. Effects of Percent Operating Expenditure on Canadian Non-hazardous Waste Diversion. *Sustainable Cities and Society*, 38, 420–428. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.026.

Sanjeevi, V., Shahabudeen, P., 2016. Optimal routing for efficient municipal solid waste transportation by using ArcGIS application in Chennai. India. *Waste Manage. Res*. 34 (1), 11–21. https://doi.org/10.1177/0734242X15607430.

Santibañez-Aguilar, J. E., Ponce-Ortega, J. M., González-Campos, J. B., Serna-González, M., El-Halwagi. M. (2013). Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste, *Waste Management*, 33(12), 2607-2622.

Soltani, A., Sadiq, R., Hewage, K. (2017). The impacts of decision uncertainty on municipal solid waste management. *Journal of Environmental Management*, 19715, 305-315.

Son, L.H., Louati, A., 2016. Modeling municipal solid waste collection: a generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows. *Waste Manage*., 52, 34–49.

Soukopová, J., Struk, M., Hřebíček. (2017). Population age structure and the cost of municipal waste collection. A case study from the Czech Republic, *Journal of Environmental Management*, 203, 655-663.

Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V. & Carvalho M. G. (2009). Optimisation of municipal solid waste collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, 29(3), 1176-1185.

Tirkolaee, E. B., Goli, A., Gütmen, S., Weber, G. W., & Szwedzka, K. (2023). A novel model for sustainable waste collection arc routing problem: Pareto-based algorithms. *Annals of Operations Research*, 324(1-2), 189-214.

Valizadeh, J., Mozafari, P., & Hafezalkotob, A. (2022). Municipal waste management and electrical energy generation from solid waste: a mathematical programming approach. *Journal of Modelling in Management*, 17(1), 309-340.

Valizadeh, J., Sadeh, E., Amini, Z. & Hafezalkotob, A. (2020). Robust optimization model for sustainable supply chain for production and distribution of Polyethylene pipe, *Journal of Modelling in Management*, 15(4), 1613-1653.

Valizadeh, J. (2020). A novel mathematical model for municipal waste collection and energy generation: Case study of Kermanshah city. *Management of Environmental Quality*, 31(5), 1437-1453.

Xu, Y., Huang, G. H., Qin, X. S. & Cao, M. F. (2009). A stochastic robust chance-constrained programming model for municipal solid waste management under uncertainty. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(6), 352-363.

Yadav, V., Karmakar, S., Dikshit, A. K., Bhurjee A. K. (2018). Interval-valued facility location model: An appraisal of municipal solid waste management system. *Journal of Cleaner Production*, 17110, 250-263.

Zhang, X., Huang, G. (2014). Municipal solid waste management planning considering greenhouse gas emission trading under fuzzy environment. *Journal of Environmental Management*, 135, 11–18.

Zsigraiova, Z., Semiao, V. & Beijoco, F. (2013). Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of municipal solid waste collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal. *Waste Manage.*, 33, 793–806.