

مدیریت هوشمند پسماند الکترونیکی: بهینه‌سازی پویای مکان‌یابی - مسیریابی با استفاده از اینترنت اشیا

رضا سعدی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مسعود ربانی^۱

استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

زینب سازور

دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی چندهدفه برای مدیریت جمع‌آوری پسماند الکترونیکی ارائه شده که به صورت پویا از داده‌های بلادرنگ اینترنت اشیا بهره می‌گیرد. برخلاف مطالعات پیشین که تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص یا مسیریابی را جداگانه بررسی کرده‌اند، در این تحقیق یک چارچوب یکپارچه چندسطحی توسعه یافته است. در این چارچوب، تعیین محل مراکز جمع‌آوری، تخصیص پسماند و مسیریابی ناوگان ناهمگن به طور هم‌زمان و بر اساس هشدارهای پرشدگی سطل‌های هوشمند اتخاذ می‌شود. برای نخستین بار، سازوکار سرویس‌دهی پویا مبتنی بر آلام پرشدگی در قالب یک مدل دوهدفه با کمینه‌سازی هزینه و انتشار آلاینده‌ها فرمول‌بندی شده است. نمونه‌های کوچک با GAMS حل و برای ابعاد بزرگ، نسخه بهبودیافته NSGA-II توسعه و با MOPSO مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد NSGA-II از نظر دقت و زمان محاسباتی عملکرد بهتری دارد. بهره‌گیری از هشدارهای اینترنت اشیا موجب کاهش ۳۲ درصدی سفرهای غیرضروری، صرفه‌جویی ۱۵.۷ درصدی در سوخت و کاهش ۱۲.۴ درصدی انتشار آلاینده‌ها شده است.

کلمات کلیدی: مسئله مسیریابی وسیله نقلیه، NSGAII، محدودیت زمانی، ضایعات تجهیزات الکترونیک، وسایل نقلیه ناهمگن، مکان‌یابی، اینترنت اشیا

^۱ نویسنده مسئول: mrabani@ut.ac.ir

Smart e-waste management: Dynamic optimization of location-routing using the Internet of Things

Reza Saadi, Rezasaadi@ut.ac.ir

Ph.D Student, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Masoud Rabani, (corresponding author), Mrabani@ut.ac.ir

Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Zeinab Sazvar, sazvar@ut.ac.ir

Associate Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

This study presents a multi-objective location-routing model for the management of electronic waste (e-waste) collection, which dynamically utilizes real-time data from the Internet of Things (IoT). Unlike previous studies that examined location, allocation, or routing decisions separately and within static environments, this research develops an integrated multi-level framework. In this framework, decisions regarding the optimal location of collection centers, the allocation of e-waste from generation points, and the routing of a heterogeneous fleet of vehicles are made simultaneously, based on real-time fill-level alerts received from IoT-equipped smart bins. For the first time in the literature, a dynamic service mechanism triggered by fill-level alarms is formulated as a bi-objective optimization model. The two objectives are minimizing total system costs—including fixed costs of collection centers, vehicle rental, and transportation—and minimizing greenhouse gas emissions generated during collection and transportation operations. This approach enables a shift from traditional fixed-schedule collection to a demand-responsive system, significantly improving operational efficiency. To validate the mathematical model, small-scale problem instances were solved using GAMS software and compared against exact solutions. For larger and more complex instances, an improved version of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) was developed and its performance was benchmarked against the Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm. The results demonstrate that the enhanced NSGA-II outperforms MOPSO in terms of solution accuracy, proximity to the true Pareto front, and computational time. Furthermore, sensitivity analysis reveals that the capacities of collection centers and vehicles are the most influential parameters affecting both total cost and environmental emissions. A real-world case study conducted across 22 districts of Tehran confirms the practical applicability of the proposed model. The implementation of IoT-based fill-level alerts reduces unnecessary inspection trips by 32%, leading to 15.7% savings in fuel consumption and a 12.4% reduction in greenhouse gas emissions compared to conventional collection systems. These findings highlight the pivotal role of IoT in enabling dynamic and sustainable e-waste management.

Keywords: Vehicle Routing Problem, NSGAII, Time Constraint, Electronic Equipment Waste, Heterogeneous Vehicles, Location, Internet of Things

۱. مقدمه

فناوری اینترنت اشیا نیز در سال‌های اخیر نقش بسزایی در بهبود کارایی سیستم‌های جمع‌آوری ضایعات ایفا کرده است. به کارگیری حسگرهای هوشمند بر روی ظروف ضایعات، امکان ارسال هشدار خودکار در زمان پر شدن ظرفیت آن‌ها را فراهم می‌سازد. این داده‌های بلادرنگ می‌توانند ورودی سیستم‌های بهینه‌سازی برای تعیین مسیر و زمان جمع‌آوری باشند و از اعزام‌های غیرضروری وسایل نقلیه جلوگیری کنند. ترکیب فناوری اینترنت اشیا با مدل‌های بهینه‌سازی مکان‌یابی - مسیریابی، منجر به افزایش دقت تصمیم‌گیری، کاهش هزینه‌ها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. به کارگیری حسگرهای هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا بر روی سطوح ضایعات، مکانیزمی تحول‌آفرین در مدیریت لجستیک معکوس ایجاد می‌کند. برخلاف سیستم‌های سنتی که بر اساس برنامه‌های ثابت یا تخمین‌های دوره‌ای عمل می‌کنند، این فناوری امکان مدیریت پسماند بر مبنای تقاضای واقعی را فراهم می‌سازد. از مزایای کلیدی این ادغام می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: پیشگیری از سرریز ضایعات و مشکلات بهداشتی ناشی از آن با واکنش به‌موقع، حذف سفرهای بازرسی و جمع‌آوری غیرضروری به نقاطی که سطل‌هایشان خالی یا نیمه‌پر است که مستقیماً منجر به صرفه‌جویی در سوخت، کاهش استهلاک ناوگان و کاهش انتشار کربن می‌شود، و افزایش رضایت مشتریان (تولیدکنندگان ضایعات) با ارائه سرویسی سریع و مبتنی بر نیاز فوری آنهاست؛ بنابراین، اینترنت اشیا نه به‌عنوان یک افزوده جانبی، بلکه به‌عنوان هسته پویاساز و داده‌آفرین مدل بهینه‌سازی عمل می‌کند.

در پژوهش حاضر، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مکان‌یابی - مسیریابی برای جمع‌آوری ضایعات تجهیزات الکترونیکی مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا

در سال‌های اخیر، رشد شتابان مصرف تجهیزات الکترونیکی موجب افزایش بی‌سابقه تولید پسماند الکترونیک شده است؛ پسماندی که به دلیل ارزش اقتصادی بالا و مخاطرات زیست‌محیطی قابل توجه، نیازمند نظام‌های جمع‌آوری و بازیافت کارآمد است. باوجود مطالعات گسترده در زمینه لجستیک معکوس و مسیریابی وسایل نقلیه، ترکیب هم‌زمان مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی در محیط‌های پویا مبتنی بر اینترنت اشیا، همچنان با خلأهای اساسی در ادبیات مواجه است و اکثر مدل‌های موجود یا ساختار یکپارچه ندارند یا قابلیت تصمیم‌گیری لحظه‌ای بر اساس وضعیت واقعی تولید ضایعات را پشتیبانی نمی‌کنند. این شکاف، ضرورت توسعه مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه‌ای را برجسته می‌کند که بتوانند پویایی ناشی از داده‌های بلادرنگ، ملاحظات زیست‌محیطی و پیچیدگی‌های شبکه زنجیره تأمین معکوس را به‌صورت هم‌زمان مدیریت کنند.^[۱]

در این میان، یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت زنجیره تأمین معکوس ضایعات، بهینه‌سازی فرایند جمع‌آوری و مسیریابی وسایل نقلیه است. این مسئله با در نظر گرفتن محدودیت‌های متعددی از جمله ظرفیت وسایل نقلیه، محدودیت زمانی، مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری، و کاهش هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی، ماهیتی چندهدفه و پیچیده دارد. از آنجاکه این مسئله در زمره‌ی مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد، حل دقیق آن با روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی کلاسیک در ابعاد بزرگ، از نظر محاسباتی دشوار است. از این‌رو، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری چندهدفه به‌عنوان راهکاری مؤثر در حل چنین مسائلی مطرح شده است.^[۲]

طراحی شده است. در این مدل، مراکز تولید ضایعات، مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت به‌عنوان اجزای اصلی زنجیره تأمین در نظر گرفته شده‌اند. هر مرکز تولید ضایعات دارای ظروف هوشمندی است که در صورت پر شدن، پیام هشدار برای مرکز جمع‌آوری ارسال می‌کنند. اهداف اصلی مدل شامل (۱) کمینه‌سازی هزینه‌های کل سیستم شامل هزینه ثابت مراکز جمع‌آوری، اجاره و هزینه سفر وسایل نقلیه و (۲) کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل ضایعات است.

برای صحت‌گذاری مدل ریاضی، ۵ نمونه در ابعاد کوچک (با ۶ تا ۱۴ تولیدکننده) طراحی و با دو روش حل شد: حل دقیق با نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX و اجرای الگوریتم NSGA-II پیشنهادی. نتایج این مقایسه در جدول ۳ ارائه شده است. میانگین انحراف جواب‌های NSGA-II از جواب بهینه GAMS برای تابع هدف هزینه ۱.۲۴٪ و برای تابع هدف آلاینده‌گی ۱.۴۱٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم و صحت فرمول‌بندی مدل است. همچنین، برای اطمینان از درستی محدودیت‌ها، تمامی جواب‌های به‌دست‌آمده از GAMS از نظر ارضای محدودیت‌های ظرفیت، زمان و جریان بازرسی دستی شدند و صحت آنها تأیید گردید. سپس برای ابعاد بزرگ‌تر، از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده گردید که به‌توجه به ساختار مرتب‌سازی و حفظ تنوع جمعیت، قادر است جبهه پارتوی کارآمدی میان اهداف متضاد فراهم سازد. استفاده از NSGA-II در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مشابه نیز کارایی بالای خود را نشان داده است^[۲]. نتایج حاصل از اجرای مدل، مزایای متمایز به‌کارگیری اینترنت اشیا را در مقایسه با سیستم‌های سنتی جمع‌آوری پسماند نشان می‌دهد که کاهش سفرهای غیرضروری به میزان ۳۲٪

با حذف بازرسی‌های دوره‌ای و جایگزینی آن با سرویس‌دهی مبتنی بر هشدار پرشدگی، افزایش دقت در زمان‌بندی جمع‌آوری و پیشگیری از سرریز سطل‌ها، بهبود بهره‌وری ناوگان با افزایش نرخ استفاده از عملکرد ظرفیت خودروها از ۶۷٪ در حالت سنتی به ۸۹٪ در حالت هوشمند، و کاهش هزینه‌های عملیاتی به میزان ۱۵.۷٪ و انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان ۱۲.۴٪. این یافته‌ها تأیید می‌کند که اینترنت اشیا نه به‌عنوان یک افزونه، بلکه به‌عنوان هسته پویاساز سیستم جمع‌آوری ضایعات پس‌ماند الکترونیکی دهد عمل کرده و الگویی قابل‌تعمیم برای سایر شهرها و صنایع ارائه می‌دهد.

۲. پیشینه تحقیق

پژوهش‌های مختلفی در زمینه لجستیک مسیریابی وسیله نقلیه ضایعات انجام شده است، اما مطالعات مرتبط با زباله‌های الکترونیکی هنوز محدود هستند. در ادامه، به بررسی برخی از تحقیقات معتبر در این حوزه پرداخته می‌شود:

مطالعه گوناوان و همکاران (۲۰۲۳)^[۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای حل مشکل جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی پیشنهاد کردند. این مدل به‌عنوان یک مسئله مسیریابی خودرو ناهمگن با پنجره‌های زمانی متعدد فرمول‌بندی شد و با استفاده از نرم‌افزار CPLEX حل گردید. نتایج نشان داد که این مدل به‌عنوان شروعی خوب برای فرمول‌بندی و حل مسائل لجستیکی در مقیاس‌های مختلف عمل می‌کند و پیشرفت‌های عملی قابل‌توجهی در حل مشکلات عملیاتی ارائه می‌دهد.

مقاله سیشلا و همکاران (۲۰۲۴)^[۴] به بررسی اثرات پارامترهای دمای محیط بر کامیون‌های جمع‌آوری زباله الکتریکی پرداخت. در این تحقیق، از یک مدل محاسباتی مبتنی بر مسئله مسیریابی خودرو و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها استفاده شد که علاوه بر ظرفیت بار

کامیون‌ها، شرایط دمایی محیطی و تأثیر آن‌ها بر مسافت و مقدار زباله جمع‌آوری شده را در نظر می‌گرفت. نتایج نشان داد که این رویکرد می‌تواند به بهینه‌سازی استفاده از کامیون‌های الکتریکی در شرایط دمایی مختلف کمک کند. مطالعه استینوپکائو و وونگ (۲۰۱۳)^[۵] به هزینه‌های دفع زباله‌های الکترونیکی و ارسال این زباله‌ها به کشورهای در حال توسعه پرداخته است. در این مقاله، بیان شد که با وجود مقررات ملی در مورد زباله‌های خطرناک، بسیاری از زباله‌های الکترونیکی در این کشورها به عنوان زباله عمومی پردازش می‌شوند و این امر منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی و تهدید سلامت کارگران می‌شود.

مقاله سار و قدیمی (۲۰۲۳)^[۶] یک مروری بر ۱۰۹ مقاله منتشر شده در حوزه مسیریابی خودرو در لجستیک معکوس بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ ارائه کرد. این مقاله به بررسی انواع مشکلات مدل‌سازی، تکنیک‌های راه‌حل، و جنبه‌های پایداری در مسیریابی خودرو پرداخته و فرصت‌های تحقیقاتی آینده را معرفی می‌کند.

مطالعه ربانی و همکاران (۲۰۲۰)^[۷] یک مدل مسیریابی با ناوگان ناهمگن از وسایل نقلیه برای حمل زباله‌های صنعتی در صنعت خودرو پیشنهاد داد. این تحقیق با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه مختلط در صنعت خودروسازی ایران نشان داد که این مدل می‌تواند به کاهش هزینه‌های لجستیکی و انتخاب بهینه محل‌های دفع و بازیافت کمک کند.

مقاله اورلینز و گوان (۲۰۱۶)^[۸] به بررسی آگاهی کارگران غیررسمی از اثرات زیست‌محیطی زباله‌های الکترونیکی و آمادگی آن‌ها برای پذیرش مقررات دولتی پرداخت. این تحقیق نشان داد که کارگران غیررسمی به دلیل ترس از دست دادن شغل خود، از پذیرش مقررات و استانداردهای زیست‌محیطی خودداری می‌کنند.

هدف مطالعه شیه (۲۰۱۷)^[۹] طراحی سیاست‌های کارآمد برای استفاده از صندوق بازیافت در شرایط نامشخص بود.

این مطالعه نشان داد که مدل‌های چند دوره‌ای نسبت به مدل‌های تراز سالانه مزایای بیشتری دارند و می‌توانند کارایی بیشتری در مدیریت صندوق بازیافت در سناریوهای مختلف ارائه دهند.

مطالعه کوشتا و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۰] به تخمین زباله‌های الکترونیکی در سطح خرد در دهلی هند با استفاده از مدل فروش - سهام - طول عمر پرداخته است. این تحقیق نشان داد که ضایعات تلفن‌های همراه در دهلی به طور تصاعدی افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰ نرخ رشد آن‌ها کاهش یابد.

مقاله لیو و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۱] یک مدل بازی تکاملی تصادفی برای تجزیه و تحلیل تعاملات پیچیده بین دولت‌های ملی و محلی و بازیافت‌کنندگان ایجاد کرد. این تحقیق نشان داد که دولت‌ها می‌توانند با تدوین قوانین زیست‌محیطی و تشویق بازیافت‌کنندگان، رفتار آشفته سیستم را کنترل کرده و فرایند بازیافت را بهبود بخشند.

مقاله‌ای از کوشتا و همکاران (۲۰۲۴)^[۱۲]، به بررسی مسئله مکان‌یابی مرکز جمع‌آوری برای اکتساب زباله‌های الکترونیکی از خانوارها پرداخته است. مدل پیشنهادی یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط دو هدفه است که در آن جمع‌آوری زباله به حداکثر رسیده و هزینه جمع‌آوری به حداقل می‌رسد. این مدل مکان مراکز جمع‌آوری، تخصیص گره‌های مشتری، انگیزه‌های ارائه‌شده و زباله‌های الکترونیکی جمع‌آوری‌شده را با استفاده از روش‌های برداشت و رهاکردن تعیین می‌کند. برای حل مسئله چند هدفی، از روش محدودیت اپسیلون استفاده شده و تحلیل حساسیت برای ارزیابی اهمیت نسبی پارامترها در خروجی مدل انجام شده است. این مطالعه مفاهیم نظری و عملی ارزشمندی را ارائه می‌دهد.

اسلام و هدی (۲۰۱۸)^[۱۳] ۱۵۷ مقاله منتشر شده در بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ را انتخاب و با استفاده از روش تحلیل محتوا مورد بررسی قرار دادند. این روش شامل چهار مرحله

جمع‌آوری مطالب، تجزیه و تحلیل توصیفی، انتخاب دسته‌ها و ارزیابی مواد بوده است. در این مطالعه، چهار نوع پژوهش اصلی در زمینه لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته زباله‌های الکترونیکی شناسایی و بررسی شدند. این چهار نوع شامل طراحی و برنامه‌ریزی توزیع معکوس، تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد، چارچوب مفهومی و مطالعات کیفی می‌باشد. این بررسی، شکاف‌های پژوهشی موجود را شناسایی کرده و فرصت‌های تحقیقاتی آینده را پیشنهاد می‌دهد.

نواکوفسکی و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۴] از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای حل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره‌های زمانی برای ناوگان ناهمگون وسایل نقلیه جمع‌آوری زباله استفاده کردند. در این تحقیق، یک مدل و الگوریتم تولیدی برای سیستم آنلاین ارائه شد که امکان ارتباط جامع برای درخواست‌های جمع‌آوری، ثبت داده‌ها و حل مشکل مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره‌های زمانی (VRPTW) را فراهم می‌سازد. نتایج نشان داد که بهترین الگوریتم برای تسهیل جمع‌آوری سیار زباله‌های الکترونیکی، بازپخت شبیه‌سازی شده بوده است و بدترین الگوریتم جستجوی ممنوع بود.

پور حجازی و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۵] یک طرح جمع‌آوری یکپارچه را ارائه کردند که هم‌زمان خواسته‌های تلفنی و خانه به در را در نظر می‌گیرد. این مدل مسیریابی با ظرفیت اصلی و پنجره زمانی را برای جمع‌آوری ضایعات تجهیزات الکترونیکی و الکتریکی مورد مطالعه قرارداد. نتایج نشان داد که بهبود عملکرد با توجه به تصمیمات عملیاتی خاص مانند ظرفیت و زمان قابل توجه بوده است.

مقاله شی و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۶] به بررسی مسئله مکان‌یابی تسهیلات چند دوره‌ای در مرحله گسترش بازار پرداخته است. برای ارزیابی مبادله بین کارایی هزینه و پوشش خدمات، یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح ۱-۰ چند دوره‌ای برای این مسئله پیشنهاد شد. نتایج نشان داد

که استفاده از فراابتکاری مبتنی بر جستجوی محلی، کارآمدترین روش برای جستجوی راه‌حل‌های پارتو برای این مسئله بوده است. مقاله کوتا (۲۰۲۰)^[۱۷] به بررسی تجارت زباله با تمرکز بر موضوعات برابری، انصاف و عدالت توزیعی پرداخته و دو مورد تجزیه و تحلیل شده است: تجارت تجهیزات الکترونیکی و الکتریکی دور ریخته شده بین اتحادیه اروپا و آفریقا، و تجارت مواد پلاستیکی بین بریتانیا و چین. این مطالعه نشان داد که صادرات تجهیزات الکترونیکی دور ریخته شده و مواد پلاستیکی قابل بازیافت بارهای زیست‌محیطی کشورهای جنوب جهانی را تشدید کرده و در عین حال خطرات زیست‌محیطی جدیدی را صادر می‌کند.

نبی و همکاران (۱۳۹۹)^[۱۸] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای مکان‌یابی هم‌زمان تسهیلات دفع پسماند شامل مراکز بازیافت، پوسال، زباله‌سوز و دفن بهداشتی با در نظر گرفتن ایستگاه‌های انتقال در شهر تهران توسعه دادند که در آن علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌ها، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز هدف‌گذاری شده است. نوآوری مطالعه ایشان، لحاظ کردن چرخه بازگشت محصولات بازیافتی به نواحی فروش و همچنین در نظر گرفتن محدودیت تعداد و ظرفیت برای هر یک از تسهیلات دفع و ایستگاه‌های انتقال بود که مسئله را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌ساخت. نتایج مطالعه موردی ایشان بر روی ۹ منطقه از شهر تهران نشان داد که استقرار ترکیبی از تسهیلات دفع در مکان‌های کاندیدای منتخب می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌های حمل و نقل، اثرات زیست‌محیطی نامطلوب ناشی از انتقال زباله‌های مناطق شمالی به مجتمع پردازش آزاد کوه را به طور چشمگیری کاهش دهد.

مظلوم کلیمانی و ذگردی (۱۴۰۲)^[۱۹] در مطالعه‌ای باهدف امکان‌سنجی احداث نیروگاه زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی در استان گیلان، یک مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه

با رویکرد کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی برای تخصیص پسماند به سه روش دپوی غیربهداشتی، کمپوست و زباله‌سوز توسعه دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که باوجود سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً بالا برای احداث نیروگاه زباله‌سوز، این گزینه به دلیل کاهش شدید پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از شیرابه و گازهای گلخانه‌ای و نیز درآمدزایی ناشی از فروش برق تجدیدپذیر، به‌صرفه‌ترین روش مدیریت پسماند در این استان محسوب می‌شود. تحلیل مقایسه‌ای دو سناریوی احداث و عدم احداث نیروگاه در این پژوهش حاکی از صرفه‌جویی روزانه بالغ بر ۴۸۵/۲ میلیون دلار در مجموع شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی با تخصیص کل ۶۰۰ تن پسماند روزانه به تأسیسات زباله‌سوز بود که اهمیت جایگزینی فناوری‌های پیشرفته استحصال انرژی را در کلان‌شهرها برجسته می‌سازد.

در پژوهشی مرتبط با طراحی شبکه لجستیک معکوس پسماند الکترونیک، نی و همکاران (۲۰۲۶)^[۲۰] به مسئله (شکاف مایل آخر) در شبکه بازیافت رسمی چین پرداخته‌اند. این مطالعه با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه مقاوم، به انتخاب مکان بهینه مراکز جمع‌آوری و فراوری اجتماع‌محور (CTCs) باهدف حداکثرسازی نرخ جمع‌آوری و سود شبکه سه‌سطری (جوامع، مراکز جمع‌آوری، بازیافت‌کنندگان مجاز) اقدام نموده است. ویژگی متمایز این پژوهش، لحاظ رقابت بین شبکه رسمی و کانال‌های غیرمجاز از طریق تابع تک‌های بر اساس فاصله جغرافیایی و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای حد پایین فاصله جمع‌آوری و نرخ استفاده مجدد است. نتایج مطالعه موردی در منطقه صنعتی سوژو (دلتای رود یانگ‌تسه) با استفاده از حل‌کننده گروپی نشان داد که انتخاب هشت مرکز جمع‌آوری می‌تواند به نرخ جمع‌آوری ۶۱.۶ درصد و سود ۰.۱۵ میلیون یوان منجر شود. این مطالعه از منظر توجه به رقابت کانال‌های رسمی

و غیررسمی و طراحی شبکه جمع‌آوری با رویکرد مقاوم، مکمل مناسبی برای پژوهش حاضر محسوب می‌شود. با بررسی ادبیات موجود، اگرچه مطالعات ارزشمندی در حوزه‌های مجزای مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی پسماند الکترونیکی انجام شده، اما شکاف پژوهشی محسوسی مشاهده می‌شود: عدم وجود یک مدل یکپارچه و پویا که سه تصمیم کلیدی مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری، تخصیص پسماند و مسیریابی ناوگان ناهمگن را به طور هم‌زمان و با اتکا بر داده‌های بلادرنگ محیطی بهینه کند. اغلب مدل‌ها یا ایستا هستند، یا بر یکی از این جنبه‌ها متمرکز شده‌اند، و نقش فناوری اینترنت اشیا عمده‌تاً به‌عنوان یک مفهوم پشتیبان و نه به‌عنوان محرک اصلی بلادرنگ مدل بهینه‌سازی مطرح شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در پر کردن هر سه شکاف به طور هم‌زمان است. مدل پیشنهادی با یکپارچه‌سازی مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری، تخصیص پسماند و مسیریابی ناوگان ناهمگن در چارچوبی دوهدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلاینده‌گی) طراحی شده است. ویژگی متمایزکننده مدل، به‌کارگیری مکانیزم سرویس‌دهی پویا بر اساس هشدار پرشدگی است که برای اولین بار در قالب یک مدل ریاضی فرمول‌بندی می‌شود. در این مکانیزم، برخلاف سیستم‌های سنتی با برنامه ثابت، سرویس‌دهی صرفاً در پاسخ به هشدار سطوح‌های هوشمند مبتنی بر IoT انجام شده و از این طریق، سفرهای غیرضروری حذف و هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

جدول ۱- مرور ادبیات

Solution method	Objective function	Internet of Things	Electronic waste	Routing	Allocation	Location	Author /Article/ Year
Meta-heuristics	Cost		*		*		Shih et al, Policy analysis on recycling fund management for E-waste in Taiwan under uncertainty(2017)
-	-		*	*			Islam et al, Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review(2018)
artificial intelligence algorithms	Time		*	*			Nowakowski et al, Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms(2018)
Accurate method	Cost		*		*		Cotta et al, What goes around, comes around? Access and allocation problems in Global North–South waste trade(2020)
heuristics	Cost and time		*	*	*		Rabbani et al, Incorporating location routing model and decision making techniques in industrial waste management: Application in the automotive industry(2020)
MOPSO	Cost and carbon dioxide		*		*	*	Shi et al, A bi-objective multi-period facility location problem for household e-waste collection(2020)
heuristics	Cost		*	*			Koshta et al, Estimation of E-waste at micro level for reverse logistics: A case of Delhi(2021)
game analysis	Cost		*		*		Liu et al, Stochastic evolutionary game analysis of e-waste recycling in environmental regulation from the perspective of dual governance system(2021)
heuristics	Cost		*	*			Pourhejazy et al, Integrated E-waste transportation using capacitated general routing problem with time-window(2021)
Epsilon-Constraint Method	Cost and greenhouse gas emissions				*	*	Nabi et al, A bi-objective mathematical model for location-allocation of municipal solid waste (Case study: Tehran) (2021)
heuristics	Cost		*	*			Gunawan et al, The heterogeneous vehicle routing problem with multiple time windows for the e-waste collection problem(2023)
game analysis	Cost and environment				*	*	Mazloom Kalimani and Zegordi, Economic and environmental optimization model of waste disposal methods in Gilan province(2023)
	Energy		*	*			Cieřla et al, The Impact of Variable Ambient Temperatures on the Energy Efficiency and Performance of Electric Vehicles during Waste Collection. Energies(2024)
Meta-heuristics	Cost and time		*		*	*	Koshta et al, A location-allocation model for E-waste acquisition from households(2024)
Robust optimization, Gurobi	Collection rate & Profit		*		*	*	Ni et al, Addressing the 'last mile' deficiency: A bi-objective model for e-waste reverse logistics network design (2026)
NSGA II, MOPSO	Cost and carbon dioxide	*	*	*	*	*	This article

۳. مدل ریاضی

• تعریف مسئله

در این پژوهش، یک زنجیره تأمین برای جمع‌آوری ضایعات قطعات الکترونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد که در سطح اول آن، مراکز تولید ضایعات تجهیزات الکترونیک قرار دارند. این مراکز می‌توانند شامل کارگاه‌ها و مراکز تعمیرات الکترونیکی و فروشگاه‌ها باشند. هر مرکز تولید ضایعات، ظروف هوشمندی مجهز به اینترنت اشیا دارد که به‌محض پر شدن تا ظرفیت مشخصی، هشدارهایی به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌کند. نوع و مقدار ضایعات تولیدی هر مرکز، میزان ظرفیت اشغال‌شده توسط سطل‌ها را تعیین می‌کند. برای انتقال ضایعات قطعات الکترونیک از مراکز تولید به مراکز جمع‌آوری، از ناوگان حمل‌ونقل با ظرفیت، سرعت و هزینه‌های متفاوت استفاده می‌شود. مسیریابی برای وسایل نقلیه این ناوگان به‌منظور بهینه‌سازی سرویس‌دهی انجام می‌گردد. پس از جمع‌آوری ضایعات در مراکز کاندید جمع‌آوری، آن‌ها به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند. نکته مهم این است که هر دوره سرویس‌دهی تنها به مکان‌هایی انجام می‌شود که سطل‌های هوشمند آن‌ها پیام هشدار ارسال کرده‌اند، این پیام زمانی صادر می‌شود که ظرفیت ظروف هوشمند پر شده باشد.

همچنین، هر مرکز کاندید جمع‌آوری و مراکز بازیافت دارای ظرفیت‌های مشخصی است. مسئله موردنظر شامل محدودیت زمانی است. در محدودیت زمانی سخت، امکان تأخیر در ارسال ضایعات وجود ندارد و باید به‌موقع به مرکز جمع‌آوری منتقل شوند. با توجه به شرایط مسئله، انتقال ضایعات از مراکز تولید ضایعات به مراکز جمع‌آوری توسط ناوگان حمل‌ونقل سبک‌تر و انتقال از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت با ناوگان حمل‌ونقل سنگین‌تر صورت خواهد گرفت. مسئله موردنظر شامل دو تابع هدف است. در تابع هدف اول، به کمینه‌سازی هزینه‌های سیستم می‌پردازد که این هزینه‌ها شامل هزینه اجاره وسایل نقلیه، هزینه ارسال و هزینه‌های ثابت مراکز جمع‌آوری است. تابع هدف بعدی،

به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با عملیات انتقال ضایعات می‌پردازد.

• مفروضات مدل

در فرمول‌بندی مدل ریاضی، مفروضات مشخصی در نظر گرفته شده است. این مدل از منظر یک اپراتور مرکزی مدیریت پسماند شهری، مانند یک شرکت زیرمجموعه شهرداری، تدوین شده و هدف اصلی آن بهینه‌سازی عملیات جمع‌آوری پسماند است.

در این مدل فرض شده است که تمامی داده‌ها قطعی و از پیش مشخص هستند؛ به‌گونه‌ای که پارامترهایی نظیر میزان تقاضای ضایعات و زمان‌های سفر در هر دوره زمانی مقدار ثابت و معین دارند. این فرض به‌منظور پایه‌ریزی و توسعه مدل پایه در نظر گرفته شده است.

مبنای انجام عملیات جمع‌آوری، دریافت هشدار بلادرنگ از سطل‌های هوشمند مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا (IoT) است؛ به این معنا که سرویس‌دهی صرفاً در پاسخ به اعلام پر شدن سطل‌ها انجام می‌شود.

اهداف مدل بر کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی اپراتور و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای متمرکز است. در این چارچوب، درآمدهای حاصل از فروش مواد بازیافتی که به بخش دیگری تعلق دارد، در تابع هدف مدل لحاظ نشده است.

ناوگان حمل‌ونقل در این مدل ناهمگن در نظر گرفته شده و شامل دودسته وسیله نقلیه است؛ دسته نخست برای جمع‌آوری اولیه پسماند و دسته دوم برای حمل به مراکز بازیافت که هر یک دارای ظرفیت، سرعت و هزینه عملیاتی متفاوت هستند.

در نهایت، افق زمانی مدل به‌صورت دوره‌های مجزا تعریف شده که هر دوره زمانی (t) معادل یک روز کاری فرض شده است. همچنین اثرات پویای ترافیک در ساعات مختلف روز بر زمان سفر وسایل نقلیه در این نسخه از مدل منظور نشده است.

• مجموعه‌ها

C : مجموعه مراکز تولیدکننده ضایعات تجهیزات

الکترونیک

D : مجموعه مراکز کاندید جمع‌آوری که باید مکان‌یابی

شود

W : تمام گره‌های سطح اول شامل مجموعه مراکز

کاندید جمع‌آوری مراکز تولیدکننده ضایعات تجهیزات

الکترونیک

S : مراکز بازیافت

T : مجموعه دوره‌های زمانی

P : انواع ضایعات

k : مجموعه وسایل نقلیه برای جمع‌آوری از مراکز تولید

ضایعات تجهیزات الکترونیک

k' : مجموعه وسایل نقلیه برای ارسال از مراکز کاندید

جمع‌آوری به مراکز بازیافت

• پارامترها

M : عدد بزرگ دلخواه

Fix_d : هزینه ثابت مراکز کاندید جمع‌آوری d

$cost_k$: هزینه اجاره وسیله نقلیه k

tr_{dsk} : هزینه سفر وسیله نقلیه k از مراکز کاندید

جمع‌آوری d به مراکز بازیافت s

ct_{ijk} : هزینه جابه‌جایی توسط وسیله نقلیه k از گره i

به گره j

A_{ijk} : پارامتر صفر و یک؛ اگر وسیله نقلیه k مجاز باشد

از گره i به گره j سفر کند برابر با یک و در غیر این صورت

صفر خواهد بود.

dx_{ij} : فاصله گره i به گره j

cp_j : ظرفیت ظرف هوشمند موجود در مکان مشتری j

q_p : وزن یک واحد از ضایعات p

cap_k : ظرفیت وسیله نقلیه k

cpd_d : ظرفیت مراکز کاندید جمع‌آوری d

d_{jtp} : میزان ضایعات p تولیدی توسط مکان j در دوره

زمانی t

q_{ijk} : میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید شده برای

انتقال وسیله نقلیه k از گره i به گره j

q'_{dsk} : میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید شده برای

انتقال وسیله نقلیه k از مرکز جمع‌آوری d به مرکز بازیافت

s

• متغیرهای تصمیم‌گیری

X_{ijk} : متغیر صفر و یک؛ اگر وسیله نقلیه k متعلق به

مرکز جمع‌آوری d در دوره t از گره i به گره j سفر کند برابر

با یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود.

Y_{dstk} : متغیر صفر و یک؛ اگر وسیله نقلیه k از مراکز

کاندید جمع‌آوری d بار به مرکز بازیافت s در دوره زمانی t

سفر کند برابر با یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود.

ND_{dtk} : تعداد وسایل نقلیه k برای ارسال ضایعات از

مرکز جمع‌آوری d در دوره زمانی t به مراکز بازیافت

تخصیص داده شده

hst_{jt} : میزان زمان رعایت نشده برای سرویس‌دهی به

مکان تولید ضایعات در دوره زمانی t در محدودیت زمانی

نرم

F_d : متغیر صفر و یک؛ اگر از مراکز کاندید جمع‌آوری d

استفاده شده باشد برابر با یک و در غیر این صورت صفر

خواهد بود. در این محدودیت مکان مراکز کاندید جمع‌آوری

مکان‌یابی می‌شود.

de_{jt} : وزن ضایعات موجود در سطل هوشمند توسط

مرکز جمع‌آوری j در دوره t

LO_{kat} : میزان بار انتقال داده شده توسط وسیله نقلیه k

متعلق به مرکز جمع‌آوری d در دوره t

dc_{dt} : مقدار ضایعات ارسال شده به مرکز جمع‌آوری d

در دوره زمانی t

Et_{jt} : مدت زمانی که طول می‌کشد تا ضایعات مکان j

در دوره زمانی t به مرکز جمع‌آوری ارسال شود

$$\min z_1 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} Y_{dstk} \times q_{dsk'} + \sum_{j \in w} \sum_{i \in w} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} x_{ijkdt} \times q_{ijk} \quad 1^*$$

$$\min z_2 = \sum_{d \in D} F_d \times Fix_d + \sum_{j \in c} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} X_{djtk} \times cost_k + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} Y_{dstk} \times dc_{dt} \times tr_{dsk} + \sum_{j \in w} \sum_{i \in w} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} x_{ijkdt} \times ct_{ijk} \quad 2^*$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in w} \sum_{d \in D} x_{ijkdt} = B_{jt} \quad \forall j \in c, t \in T \quad 1$$

$$B_{jt} \times M \geq de_{jt} - cp_j \quad \forall j \in c, t \in T \quad 2$$

$$de_{jt} \geq \sum_{p \in P} d_{jtp} \times q_p \quad \forall j \in c, t \in T \quad 3$$

$$de_{jt} \geq de_{j(t-1)} + \sum_{p \in P} d_{jtp} - MB_{jt} \quad \forall j \in c, t \in T \quad 4$$

$$\sum_{i \in w} x_{ijkdt} = \sum_{i \in w} x_{jikdt} \quad \forall j \in c, t \in T, k \in K, d \in D \quad 5$$

$$\sum_{j \in c} x_{djtkd} = \sum_{j \in c} x_{jdktd} \quad \forall t \in T, k \in K, d \in D \quad 6$$

$$LO_{kdt} = \sum_{j \in c} \sum_{i \in w} x_{ijkdt} \times de_{jt} \quad \forall t \in T, k \in K, d \in D \quad 7$$

$$LO_{kdt} \leq cap_k \quad \forall t \in T, k \in K, d \in D \quad 8$$

$$dc_{dt} = \sum_{k \in K} LO_{kdt} \quad \forall t \in T, d \in D \quad 9$$

$$dc_{dt} \leq cap_d \quad \forall t \in T, d \in D \quad 10$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in k'} Y_{dstk} = 1 \quad \forall t \in T, d \in D \quad 11$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in k'} Y_{dstk} \times dc_{dt} \leq cps_s \quad \forall t \in T, s \in S \quad 12$$

$$Et_{jt} \geq Et_{it} + st_{it} + \frac{dx_{ij}}{v_k} - M(1 - x_{jikdt}) \quad \forall t \in T, k \in K, d \in D, i \in w, j \in c \quad 13$$

$$Et_{jt} \leq timea \quad \forall t \in T, j \in c \quad 14$$

$$ND_{dtk} \geq Y_{dstk} \times dc_{dt} \quad \forall t \in T, k \in k', s \in S, d \in D \quad 15$$

$$F_d \times M \geq x_{djtkd} \quad \forall t \in T, k \in K, d \in D, j \in c \quad 16$$

$$B_{jt}, X_{ijkt}, Y_{dstk}, F_d \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in w, d \in D, s \in S, k \in K \cup K', t \in T \quad 17$$

$$de_{jt}, LO_{kdt}, dc_{dt}, Et_{jt}, ND_{dtk} \geq 0 \quad \forall j \in c, d \in D, k \in K \cup K', t \in T \quad 18$$

• تابع هدف

در تابع هدف 1* مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای کمینه می‌شود.

در تابع هدف 2* هزینه‌های سیستم به ترتیب شامل هزینه ثابت استفاده از مراکز جمع‌آوری، هزینه اجاره وسیله نقلیه، هزینه سفر برای ارسال از مراکز تولید ضایعات تجهیزات الکترونیک به مراکز جمع‌آوری، هزینه ارسال از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازیافت کمینه می‌شود.

دو تابع هدف تعریف شده، ذاتاً در حالت تعارض با یکدیگر قرار دارند. کمینه‌سازی هزینه ممکن است منجر به انتخاب مسیرهای کوتاه‌تر اما پرتراфик یا استفاده از خودروهای ارزان‌تر ولی الاینده‌تر شود. در مقابل، کمینه‌سازی آلاینده‌گی اغلب مستلزم انتخاب مسیرهای روان‌تر یا استفاده از خودروهای گران‌تر با راندمان بالاست که هزینه را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، یک جواب بهینه منفرد که هم‌زمان هر دو تابع را کمینه کند، معمولاً وجود ندارد و مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو به دست می‌آید.

• محدودیت‌ها

محدودیت 1: در صورتی که محفظه ظروف ضایعات تجهیزات الکترونیک پر شده باشد، حتماً یک وسیله نقلیه برای سرویس‌دهی به آن مکان تولید ضایعات تجهیزات الکترونیک برای تخلیه ظروف ضایعات هوشمند تخصیص داده می‌شود.

محدودیت 2: این محدودیت تعیین می‌کند که کدام ظروف ضایعات هوشمند پر شده و نیازمند سرویس‌دهی در آن دوره زمانی است.

محدودیت 3 و 4: وزن ضایعات موجود در ظرف‌های هوشمند را تعیین می‌کند.

محدودیت 5: هر وسیله نقلیه که برای سرویس‌دهی وارد یک مکان می‌شود، همان وسیله نقلیه از آن مکان خارج می‌گردد.

محدودیت 6: در هر دوره زمانی هر وسیله نقلیه‌ای که از یک مرکز جمع‌آوری خارج شود، همان وسیله نقلیه به همان مرکز جمع‌آوری وارد می‌شود.

محدودیت 7: حداکثر مقدار بار موجود بر روی وسیله نقلیه در طول مسیر را تعیین می‌کند.

محدودیت 8: رعایت محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه را تعیین می‌کند.

محدودیت 9: مقدار ضایعاتی که بر هر مرکز جمع‌آوری ارسال می‌شود را محاسبه می‌کند.

محدودیت 10: اطمینان می‌دهد که ظرفیت هر مرکز جمع‌آوری رعایت شده است.

محدودیت 11: هر مرکز جمع‌آوری به یک مرکز بازیافت تخصیص داده می‌شود.

محدودیت 12: رعایت ظرفیت ضایعات ارسال شده به هر مرکز بازیافت را محاسبه می‌کند.

محدودیت 13: زمان تحویل ضایعات هر مکان تولید ضایعات را به مراکز جمع‌آوری محاسبه می‌کند.

محدودیت 14: اطمینان می‌دهد که محدودیت زمانی سخت رعایت شده است.

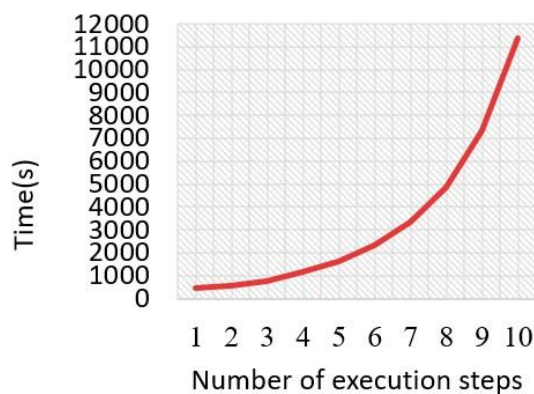
محدودیت 15: تعداد وسایل نقلیه برای ارسال ضایعات از مراکز جمع‌آوری به پالایشگاه‌های زیستی را تعیین می‌کند.

محدودیت 16: مشخص می‌کند که از کدام مرکز جمع‌آوری استفاده شده است.

محدودیت 17 و 18: نوع متغیرهای تصمیم‌گیری را تعیین می‌کند.

۴. نتایج عددی

در این قسمت، ابتدا پیچیدگی مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای این منظور، چندین مثال تصادفی از مسئله ارائه شده و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل می‌شود. ابعاد مسئله در جدول شماره (۳) بیان شده است. همان‌طور که در نمودار شماره (۱) قابل مشاهده است، با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل با نرم‌افزار گمز به صورت تصاعدی



نمودار ۱- بررسی افزایش شدید زمان حل مسئله با نرم‌افزار گمز در قسمت بعدی ابتدا به‌منظور بررسی الگوریتم NSGAII ارائه شده، چندین مثال عددی ایجاد و مثال‌های ارائه شده به‌وسیله نرم‌افزار گمز و الگوریتم NSGAII حل می‌شود. نتایج نشان‌دهنده انحراف کم جواب‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار و الگوریتم NSGAII بوده و نشان می‌دهد، جواب‌های به‌دست‌آمده برای هر دو تابع هدف بسیار نزدیک به جواب دقیق و بهینه می‌باشد.

- بررسی کارایی الگوریتم در ابعاد کوچک
- جدول ۳- بررسی کارایی الگوریتم NSGA II در ابعاد کوچک

Example number	Waste generating centers	Collection centers	Biorefinery centers	Answer: Gams	Best answer NSGAII	Deviation	Answer: Gams	Best answer NSGAII	Deviation
1	۶	۳	۲	180/2	180/7	0/28%	38/2	38/3	0/26%
2	۸	۴	۲	198/7	200/5	0/91%	46/7	47/1	0/86%
3	۱۰	۵	۳	236/4	240/6	1/78%	68/7	69/5	1/16%
4	۱۲	۶	۳	310/1	316	1/90%	96/4	97/9	1/56%
5	۱۴	۷	۴	410/3	419/5	2/24%	102/3	104/7	2/35%

در مرحله بعد، مقایسه زمان حل مثال‌های مطرح شده با نرم‌افزار گمز و الگوریتم در نمودار (۲) انجام شده است که نشان‌دهنده زمان حل بسیار پایین‌تر الگوریتم نسبت به جواب گمز می‌باشد.

افزایش‌یافته و از یک حد مشخص به‌تدریج مسئله به طور غیرقابل حل می‌گردد.

در این بخش شرح مطالعه موردی و داده‌ها، داده‌های این مطالعه موردی بر اساس برآوردهای واقع‌نما برای شهر تهران تهیه شد. مقادیر تقاضای ضایعات مناطق ۲۲ گانه بر اساس سرانه تولید و توزیع جمعیت نسبی‌سازی شده‌اند. فاصله‌ها بر اساس مختصات مراکز مناطق محاسبه گردید. ظرفیت خودروها (۱۰۰۰ کیلوگرم) و مراکز جمع‌آوری (۱۸۰۰-۲۵۰۰ کیلوگرم) مطابق با استانداردهای عملیاتی تعیین شد. پنج مرکز کاندید از میان مناطقی با دسترسی مناسب به شبکه حمل‌ونقل اصلی انتخاب شدند. صحت‌گذاری مدل ریاضی و الگوریتم برای اطمینان از صحت فرمول‌بندی مدل، نمونه‌های کوچک (جدول ۲) ابتدا با حل‌کننده دقیق GAMS حل شدند تا جواب بهینه معیار به دست آید. سپس همان نمونه‌ها با الگوریتم NSGA-II حل گردید. نتایج مقایسه‌ای (جدول ۳) نشان می‌دهد میانگین انحراف جواب الگوریتم از جواب بهینه GAMS برای هر دو تابع هدف کمتر از ۲٪ است که صحت مدل ریاضی و قابلیت اطمینان الگوریتم پیشنهادی را تأیید می‌کند.

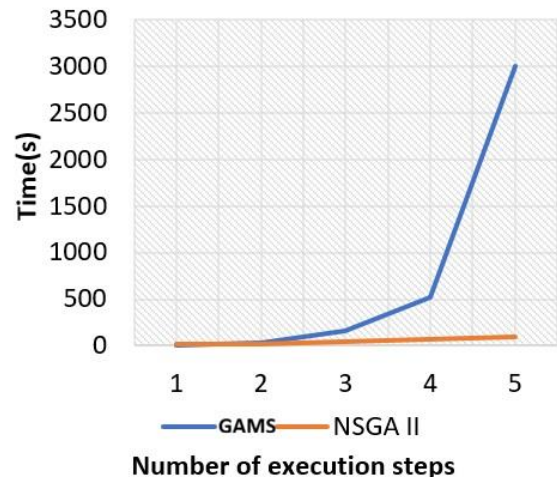
جدول ۲- ابعاد مسئله ارائه شده

Example number	Number of sets		
	Biorefinery centers	Collection centers	Waste generating centers
1	۲	۲	۶
2	۲	۳	۷
3	۳	۴	۸
4	۳	۵	۹
5	۴	۶	۱۰
6	۴	۷	۱۱
7	۵	۸	۱۳
8	۵	۸	۱۵
9	۶	۹	۱۸
۱۰	۶	۱۰	۲۰

جدول ۵- بررسی کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ در تابع هدف هزینه

Statistic	1	2	3	4	5
Run 1	438.2	563.1	639.7	789.6	891.3
Run 2	438.2	564.1	640.3	789.6	893.2
Run 3	439.4	563.1	643.2	790.5	894.1
Run 4	438.2	562.9	639.7	792.3	891.3
Run 5	439.5	563.1	639.7	789.6	887.6
Run 6	438.2	567.5	640.9	789.9	891.3
Run 7	440.2	563.1	642.3	792.3	889.5
Run 8	438.2	564.5	643.4	787.4	891.3
Best	438.2	562.9	639.7	787.4	887.6
Worst	440.2	567.5	643.4	792.3	894.1
Mean	438.76	563.93	641.15	790.15	891.2
Dev (B-W)	0.46	0.82	0.58	0.62	0.73
Dev (W-Mean)	0.13	0.18	0.23	0.35	0.41
Variance	0.657	2.416	2.526	2.557	4.043

در قسمت بعدی، یک مطالعه موردی بر روی جمع‌آوری ضایعات در مناطق مختلف تهران بررسی می‌شود. برای هر یک از ۲۲ منطقه تهران، یک مرکز تولید ضایعات تعریف شده است. به این ترتیب، هر یک از این مناطق به عنوان یک نقطه تولید ضایعات در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، پنج منطقه به عنوان مکان‌های کاندید برای ایجاد مراکز جمع‌آوری ضایعات در نظر گرفته شده است و مراکز جمع‌آوری از میان این مناطق انتخاب و مشخص خواهند شد. علاوه بر این، یک مرکز بازیافت نیز برای فرایند بازیافت ضایعات تعریف شده است. برای حل مسئله مذکور از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شده است تا به بهینه‌سازی اهداف مختلف، نظیر هزینه‌های جمع‌آوری، فاصله‌ها و زمان‌های موردنیاز پرداخته شود. نتایج به‌دست‌آمده در طول پنج دوره زمانی مختلف که در ادامه به تفصیل بیان می‌شوند، به تجزیه و تحلیل وضعیت بهینه جمع‌آوری ضایعات در مناطق مختلف تهران می‌پردازد. این روش و تحلیل می‌تواند در بهبود عملکرد سیستم‌های مدیریت پسماند شهری و کاهش هزینه‌ها و زمان‌های اجرایی در جمع‌آوری ضایعات، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی



نمودار ۲- مقایسه زمان حل با الگوریتم NSGA II

در قسمت بعدی، به منظور بررسی کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ، چند مثال عددی در ابعاد بزرگ ایجاد شده و به وسیله الگوریتم NSGA II حل می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده از اجراهای مختلف در جدول شماره (۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، واریانس‌ها دارای مقادیر پایینی بوده و انحراف بین جواب‌ها مقادیر بسیار کمی است؛ بنابراین می‌توان گفت که الگوریتم در ابعاد بزرگ نیز به یک جواب خاص همگرا می‌باشد.

جدول ۴- بررسی کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ در تابع هدف انتشار گازهای گلخانه‌ای

Statistic	1	2	3	4	5
Run 1	151.2	165.3	184.3	196.7	211.3
Run 2	151.2	165.3	184.3	196.7	212.3
Run 3	151.6	166.7	186.2	199.8	211.3
Run 4	151.2	165.5	184.7	199.3	213.6
Run 5	151.8	165.3	184.3	196.7	211.3
Run 6	151.5	165.7	185.2	196.9	213.4
Run 7	151.7	165.9	185.4	196.7	213.5
Run 8	151.2	165.3	184.3	197	211.5
Best	151.2	165.3	184.3	196.7	211.3
Worst	151.8	166.7	186.2	199.8	213.6
Mean	151.43	165.6	184.84	197.48	212.2
Dev (B-W)	0.4	0.85	1.03	1.58	1.09
Dev (W-Mean)	0.15	0.2	0.29	0.39	0.46
Variance	0.065	0.239	0.497	1.671	1.139

مانند تهران، نقش مؤثری داشته باشد. از بین مراکز کاندید برای مسئله، سه منطقه به عنوان مراکز جمع‌آوری انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، تقاضا در دوره‌های زمانی مختلف متفاوت است. مقادیر تقاضا در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۶- مسیرهای تقاضا و خدمات‌رسانی مراکز جمع‌آوری پسماند در مناطق ۲۲ گانه تهران

Region	Service request in each period		
	1	2	3
1	150	160	145
2	200	210	195
3	120	125	115
4	300	310	290
5	180	190	175
6	220	230	215
7	140	145	135
8	250	260	240
9	310	320	300
10	170	175	160
11	130	135	120
12	190	200	185
13	260	270	250
14	240	250	230
15	200	210	195
16	150	160	145
17	180	190	175
18	230	240	220
19	210	220	200
20	270	280	260
21	190	200	185
22	320	330	310

داده‌های این مطالعه موردی بر اساس اطلاعات رسمی و برآوردهای کارشناسی جمع‌آوری شده است. برای برآورد تقاضای پسماند الکترونیک، از گزارش سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران (۱۴۰۱) با عنوان بررسی وضعیت تولید پسماند الکترونیک در مناطق ۲۲ گانه به عنوان منبع اصلی استفاده شده است. بر اساس این گزارش، سرانه تولید پسماند الکترونیک در تهران ۲.۸ کیلوگرم به ازای هر نفر در سال تعیین شده است. اطلاعات جمعیتی مناطق نیز از مرکز آمار ایران (سرشماری ۱۳۹۵) استخراج گردیده و تقاضای

هر منطقه از حاصل ضرب جمعیت منطقه در سرانه تولید تقسیم بر ۳۶۵ (برای تبدیل به تقاضای روزانه) محاسبه شده است. باتوجه به تفاوت مناطق از نظر فعالیت‌های تجاری و اداری، ضرایب تعدیل زیر اعمال شده است: مناطق مرکزی (۱۲-۶) با ضریب ۱.۳، مناطق شمالی (۵-۱) با ضریب ۱.۱ و مناطق جنوبی (۲۲-۱۳) با ضریب ۰.۹.

برای محاسبه فواصل بین مناطق، از سامانه اطلاعات مکانی شهر تهران (<https://www.google.com/maps>) استفاده شده است. روش محاسبه فواصل بر اساس فاصله اقلیدسی بین مختصات جغرافیایی مراکز مناطق (طول و عرض جغرافیایی) انجام شده و مختصات مراکز مناطق از پایگاه داده‌های باز سازمان فناوری اطلاعات شهرداری تهران استخراج گردیده است.

در خصوص ظرفیت‌ها و هزینه‌ها، ظرفیت خودروها بر اساس استاندارد ISO 24111:2022 برای خودروهای جمع‌آوری پسماند تعیین شده است. هزینه اجاره خودرو از نرخ‌نامه اتحادیه حمل‌ونقل پسماند کشور (۱۴۰۲) و هزینه سوخت بر اساس قیمت مصوب گازوئیل با نرخ آزاد (۱۵۰۰ تومان/لیتر) در نظر گرفته شده است. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز بر اساس ضرایب انتشار IPCC (گزارش ۲۰۱۹) محاسبه گردیده است.

برای انتخاب مراکز کاندید جمع‌آوری، پنج منطقه با ویژگی‌های زیر به عنوان کاندید انتخاب شدند: دسترسی به حداقل دو بزرگراه اصلی، فاصله کمتر از ۵ کیلومتر از مرکز منطقه، وجود فضای مناسب با حداقل ۵۰۰ مترمربع مساحت و عدم مجاورت با مناطق مسکونی پرتراکم با حداقل ۳۰۰ متر فاصله. بر اساس این معیارها، مناطق ۲، ۵، ۸، ۱۳ و ۱۸ به عنوان مراکز کاندید جمع‌آوری انتخاب شدند. برای سنجش مزیت استفاده از ناوگان ناهمگن، یک سناریوی فرضی با ناوگان همگن (همه خودروها با ظرفیت ۹۰۰ کیلوگرم) اجرا شد. در این سناریو، هزینه کل حدود ۱۵٪ و آلاینده‌گی حدود ۱۰٪ نسبت به حالت ناهمگن افزایش یافت. این نتیجه به وضوح برتری استراتژی استفاده از ترکیب بهینه خودروهای بزرگ و کوچک را برای تطابق با الگوی تقاضای پراکنده تأیید می‌کند.

جدول ۷- مراکز جمع‌آوری احداث شده

Status	Candidate collection center number
Built	1
-	2
Built	3
Built	4
-	5

نتیجه‌گیری مدیریتی اصلی این است که با اولویت‌بندی صحیح مناطق و انتخاب مناسب مراکز جمع‌آوری، علاوه بر کاهش زمان خدمات‌رسانی، هزینه‌ها نیز به طور چشمگیری کاهش می‌یابند. این امر موجب افزایش کارایی و کاهش فشار بر منابع انسانی و مالی شده و در نهایت، عملکرد سیستم جمع‌آوری پسماند را بهبود داده و به شهری پاک‌تر و پایدارتر کمک می‌کند.

برای دستیابی به این اهداف، توصیه می‌شود فرایندهای جمع‌آوری پسماند به صورت مستمر ارزیابی و به‌روزرسانی شوند تا در برابر تغییرات مربوط به تقاضا، ترافیک و سایر شرایط محیطی، انعطاف‌پذیری و کارایی خود را حفظ کنند.

جواب‌های به‌دست‌آمده برای دوره زمانی مختلف به

شرح زیر می‌باشد:

جدول ۸- حل مسئله و سرویس‌دهی

Service route	Vehicle type	Time period	Candidate Collection Center
3-8-4-1	2	1	1
8-4-1	2	2	1
3-4-1	2	3	1
12-11-6-13	2	1	1
14-12-7-13	2	2	1
15-12-11	1	3	1
16-17-10-18	2	1	3
20-15-16-19	2	2	3
18-16-12-11-10	3	3	3
5-22-21-9	2	1	4
21-9-6-2	2	2	4
6-9-22-5	2	3	4



تصویر ۱- مسیر جمع‌آوری در یک دوره

جدول ارائه‌شده نشان می‌دهد که محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه در تمامی مسیرهای خدمات‌رسانی و در هر بازه زمانی رعایت شده است. هر خودرو مورد استفاده در سیستم جمع‌آوری پسماند دارای ظرفیت ۱۰۰۰ کیلوگرم است. ستون «بار قابل حمل خودرو» در جدول نشان می‌دهد که مجموع بار حمل‌شده توسط هر خودرو در مسیر مربوطه همواره کمتر یا برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بوده و هیچ خودرویی از ظرفیت مجاز خود فراتر نرفته است.

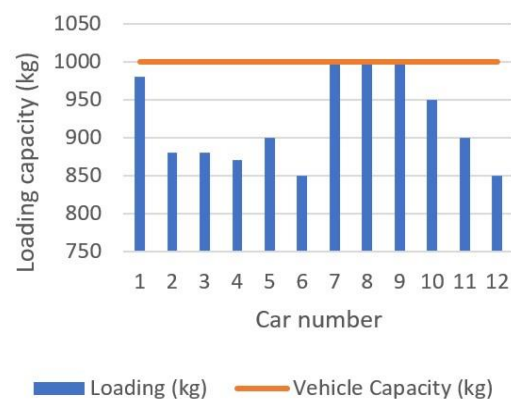
این تحلیل تأیید می‌کند که سیستم طراحی‌شده از نظر عملیاتی قابل اجرا بوده و با محدودیت‌های عملیاتی مطابقت دارد. با رعایت محدودیت ظرفیت خودرو، راهکار ارائه‌شده باعث استفاده‌ی بهینه از منابع شده و از بارگیری بیش از

مسئله‌ی جمع‌آوری پسماند در مناطق مختلف تهران نشان می‌دهد که انتخاب دقیق مراکز جمع‌آوری و بهینه‌سازی مسیرهای خدمات‌رسانی از مهم‌ترین عوامل در کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی نظام مدیریت پسماند شهری هستند. با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و تحلیل داده‌های هر منطقه، می‌توان تصمیم‌های مدیریتی بهتری در انتخاب مراکز جمع‌آوری و تخصیص کارآمدتر منابع اتخاذ کرد.

حد که می‌تواند منجر به مشکلات لجستیکی یا افزایش هزینه‌ها شود، جلوگیری می‌کند.

جدول ۹- بررسی محدودیت‌های بارگیری خودرو

Implementation period	Service route	Loading (kg)	Machine volume (KG)
1	3-8-4-1	980	1000
2	8/4/2001	880	1000
3	3/4/2001	880	1000
1	12-11-6-13	870	1000
2	14-12-7-13	900	1000
3	15-12-11	850	1000
1	16-17-10-18	1000	1000
2	20-15-16-19	1000	1000
3	18-16-12-11-10	1000	1000
1	5-22-21-9	950	1000
2	21-9-6-2	900	1000
3	6-9-22-5	850	1000



نمودار ۳- بررسی محدودیت‌های بارگیری خودرو

در این بخش، ظرفیت مراکز جمع‌آوری پسماند در بازه‌های زمانی مختلف مورد تحلیل قرار گرفته تا اطمینان حاصل شود که بار تخصیص‌یافته به هر مرکز از ظرفیت محدود آن تجاوز نمی‌کند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ظرفیت هر مرکز جمع‌آوری در دوره‌های مختلف به طور مؤثر رعایت شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که بارهای تخصیص‌یافته به هر مرکز جمع‌آوری به‌خوبی مدیریت شده و در تمام دوره‌ها محدودیت‌های ظرفیت مراکز جمع‌آوری پسماند رعایت شده است. این امر موجب کاهش فشار عملیاتی بر هر مرکز

و بهینه‌سازی فرایند جمع‌آوری پسماند در شهر تهران می‌شود.

از خروجی‌های مدل جداول ۸ و ۹ شاخص‌های بهره‌وری استخراج شد. میانگین نرخ استفاده از ظرفیت خودروها در کلیه سفرها حدود ۸۹٪ محاسبه گردید که نشان‌دهنده تخصیص بهینه بار و جلوگیری از سفرهای نیمه‌خامی است. کل مسافت پیموده شده ناوگان در سه دوره ۵۲۰ کیلومتر و تعداد کل سفرها ۱۲ مورد بود. این شاخص‌ها کارایی عملیاتی سیستم پیشنهادی را کمی‌سازی می‌کنند.

جدول ۱۰- توزیع بار زباله و انطباق با ظرفیت در مراکز

جمع‌آوری

Center	First period (kg)	Second period (kg)	Third period (kg)	Collection Center Capacity (kg)
Center 1	1700	1705	1625	2500
Center 3	1400	1485	1370	2200
Center 4	1510	1570	1470	1800

در بسیاری از سیستم‌های خدماتی، رعایت محدودیت‌های زمانی در ارائه خدمات به مشتریان اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تأخیر در ارائه خدمات می‌تواند موجب نارضایتی مشتری و کاهش کارایی سیستم شود. در این مطالعه، هدف بررسی زمان شروع ارائه خدمات به مشتریان در دوره‌های مختلف و مقایسه آن با زمان مجاز تعیین‌شده است.

باتوجه‌به اینکه تمام زمان‌های آغاز ارائه خدمت در مناطق مختلف کمتر از مقدار مجاز ۴۰۰ هستند، می‌توان نتیجه گرفت که تمامی خدمات در بازه زمانی مجاز ارائه شده‌اند و هیچ‌گونه تأخیری مشاهده نشده است. این موضوع نشان‌دهنده پایبندی کامل به محدودیت‌های زمانی در ارائه خدمات به مشتریان است.

در این تحلیل، زمان‌های شروع خدمت در دوره‌های مختلف برای هر منطقه بررسی شد. با مقایسه این زمان‌ها با مقدار مجاز ۴۰۰، مشخص گردید که تمامی زمان‌های شروع خدمت زیر این حد قرار دارند. این امر نشان می‌دهد

که خدمات برای همه مشتریان در زمان برنامه‌ریزی شده و بدون تأخیر ارائه شده‌اند.

بنابراین، هیچ نقضی در محدودیت‌های زمانی مشاهده نشد و همه خدمات در بازه زمانی مجاز تکمیل شده‌اند. این نتیجه را می‌توان نشانه‌ای از کارایی و مدیریت بهینه زمان در سیستم خدماتی دانست.

جدول ۱۱- مقایسه زمان شروع سرویس (دقیقه) با زمان

مجاز (دقیقه)

Region	First period service start time	Secod period service start time	Third period service start time	Allowed service time
1	50	50	50	400
2		354		400
3	0	0	268	400
4	102	102	102	400
5	44		352	400
6	236	276	97	400
7		275		400
8	195	195		400
9	280	157	132	400
10	214		311	400
11		157	280	400
12	89	163	198	400
13	301	365		400
14		79		400
15		165	110	400
16	59	225	125	400
17	121			400
18	310		68	400
19		312		400
20		55		400
21		189	98	400
22	110		286	400

در این راستا، نتایج به‌دست آمده از هر دو الگوریتم برای مجموعه‌ای از نمونه‌ها تحلیل و مقایسه شده‌اند. جدول زیر نتایج این مقایسه را بر حسب معیارهای مذکور (تابع هدف هزینه، تابع هدف زمان، انحراف نسبی، و زمان حل) نشان می‌دهد. این بررسی تمرکز ویژه‌ای بر مزایا و معایب هر الگوریتم در حوزه‌های مختلف دارد. بر اساس داده‌ها و نمودارهای ارائه‌شده، مشاهده می‌شود که الگوریتم

NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به MOPSO از نظر کیفیت پاسخ‌ها دارد، به‌گونه‌ای که انحراف آن از مقادیر بهینه در هر دو تابع هدف (هزینه و کاهش آلایندگی) کمتر است. به طور مشخص، مقدار انحراف در NSGA-II به‌صورت یکنواخت پایین‌تر از MOPSO بوده که نشان‌دهنده‌ی همگرایی دقیق‌تر این الگوریتم به سمت جواب بهینه‌ی پارتو است.

از نظر زمان محاسباتی نیز، مدت‌زمان لازم برای حل مسئله در NSGA-II کمتر از MOPSO گزارش شده است که نشان‌دهنده‌ی کارایی بالاتر NSGA-II در اجرای فرایند بهینه‌سازی است. هرچند هر دو الگوریتم نتایج قابل‌قبولی ارائه داده‌اند، اما توانایی NSGA-II در ایجاد توازن بهتر بین اهداف مختلف و سرعت بالاتر در محاسبات، آن را به گزینه‌ی برتر برای حل این نوع مسائل بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌کند.

در نتیجه، بر اساس این مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم NSGA-II از نظر کیفیت جواب‌ها و کارایی محاسباتی برتری محسوس نسبت به MOPSO دارد؛ بنابراین، استفاده از NSGA-II برای حل مسائل چندهدفه‌ای از این نوع، به‌ویژه در شرایطی که دستیابی به تعادل میان چند هدف و زمان اجرای پایین اهمیت دارد، توصیه می‌شود.

۵. مقایسه نتایج الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO

در این بخش، نتایج حاصل از دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی متفاوت، یعنی NSGA-II و MOPSO، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. هدف از این مقایسه، ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها در حل مسائل چندهدفه با در نظر گرفتن معیارهایی نظیر مقدار تابع هدف زمان، مقدار تابع هدف هزینه، انحراف نسبی، و زمان حل مسئله است. این تحلیل به منظور بررسی دقت، کارایی و سرعت همگرایی الگوریتم‌ها در یافتن پاسخ‌های بهینه برای مسائل مختلف انجام شده است.

Statistic	Example 1	Example 2	Example 3	Example 4	Example 5
Cost (MOPSO)	182.2	243.5	457.1	544.5	607.6
Cost (NSGA-II)	180.7	240.6	453.6	540.3	601.1
Time (MOPSO)	39.5	71.2	113.7	141.2	164.4
Time (NSGA-II)	38.3	69.5	112.4	138.1	163.6
Number of bio-treatment centers	2	3	4	5	6
Number of collection centers	2	4	7	8	10
Number of main manufacturing centers	6	8	11	15	20

کاهش ۴/۱۲ درصدی در هزینه‌ها و کاهش ۹/۷ درصدی در میزان آلاینده‌گی را در پی داشت. باین حال، این کاهش پس از یک نقطه مشخص با شیبی کمتر ادامه یافته و نشان‌دهنده رفتار بازدهی کاهنده در سطوح ظرفیت بالاتر است. در مقابل، کاهش ظرفیت وسایل نقلیه، اثر معکوسی بر عملکرد مدل داشته و به دلیل نیاز به اعزام تعداد بیشتری از ناوگان برای جمع‌آوری حجم ثابت پسماند، هزینه کل را تا حدود ۶/۱۵ درصد افزایش داده است.

در ادامه، بررسی پارامتر هزینه حمل‌ونقل نشان داد که این مؤلفه بیشترین اثر را بر هزینه کل سیستم دارد و تغییرات آن تقریباً به‌صورت خطی بر تابع هدف هزینه تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان نمونه، افزایش ده، بیست و سی درصدی هزینه سفر، به ترتیب موجب افزایش ۸/۶، ۱/۱۲ و ۹/۱۸ درصدی هزینه کل شده است. این رفتار خطی در افزایش هزینه و رفتار نسبتاً ملایم‌تر در کاهش آن نشان می‌دهد که سیستم نسبت به افزایش هزینه‌های سفر حساس‌تر بوده و پایداری اقتصادی آن به‌شدت وابسته به این پارامتر است.

علاوه بر این، ظرفیت مراکز جمع‌آوری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی شبکه ایفا می‌کند و تغییرات آن نه‌تنها بر هزینه نهایی، بلکه بر ساختار مسیریابی و تخصیص پسماند نیز اثرگذار است. افزایش بیست درصدی ظرفیت این مراکز باعث کاهش ۱۵ درصدی هزینه و کاهش ۱۸ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای شده، درحالی‌که کاهش مشابه در ظرفیت، افزایش ۲۳ درصدی هزینه کل و افزایش ۱۷ درصدی آلاینده‌گی را به دنبال داشته است. دلیل این رفتار آن است که کاهش ظرفیت مراکز جمع‌آوری منجر به محدودیت‌های شدیدتر در پذیرش پسماند شده و ناچار، تعداد سفرها و طول مسیرهای پیمایش یافته افزایش می‌یابد.

۶. تحلیل حساسیت

به‌منظور ارزیابی پایداری مدل پیشنهادی و بررسی میزان تأثیرپذیری آن نسبت به تغییرات پارامترهای کلیدی، تحلیل حساسیتی جامع بر سه مؤلفه اصلی شامل ظرفیت وسایل نقلیه، هزینه حمل‌ونقل و ظرفیت مراکز جمع‌آوری انجام شد. پارامترهای مورد تحلیل (ظرفیت خودرو، هزینه حمل، ظرفیت مراکز) به دلیل قابلیت کنترل مدیریتی و تأثیرگذاری بالا بر اساس نتایج اولیه و ادبیات انتخاب شدند. بازه تغییرات مثبت و منفی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ برای شبیه‌سازی سناریوهای واقع‌بینانه کمبود یا توسعه منابع در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که ظرفیت ناوگان یکی از حساس‌ترین متغیرهای مدل است، به‌گونه‌ای که افزایش تدریجی ظرفیت وسایل نقلیه موجب کاهش قابل‌توجه هزینه کل و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود؛ به‌طوری که افزایش بیست درصدی ظرفیت،

در مجموع، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نسبت به پارامترهای عملیاتی اصلی از جمله ظرفیت ناوگان و مراکز جمع‌آوری حساسیت بالایی دارد و نوسانات این پارامترها می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر هزینه و پایداری زیست‌محیطی شبکه ایجاد کند؛ بنابراین، تنظیم دقیق این پارامترها و لحاظ کردن آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، برای طراحی سیستم‌های کارآمد جمع‌آوری پسماند الکترونیکی مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا ضروری است.

جدول ۱۳- تحلیل حساسیت

Parameter	Rate of change	Total cost change (%)	Change in greenhouse gas emissions (%)
Vehicle capacity	+10%	-7.1	-4.3
Vehicle capacity	+20%	-12.4	-7.9
Vehicle capacity	+30%	-14.2	-9.1
Vehicle capacity	-10%	+9.8	+6.1
Vehicle capacity	-20%	+15.6	+10.4
Vehicle capacity	-30%	+22.3	+15.2
Transportation cost	+10%	+6.8	—
Transportation cost	+20%	+12.1	—
Transportation cost	+30%	+18.9	—
Transportation cost	-10%	-4.2	—
Transportation cost	-20%	-7.6	—
Transportation cost	-30%	-10.4	—
Capacity of collection centers	+10%	-9.2	-11.4
Capacity of collection centers	+20%	-15.0	-18.0
Capacity of collection centers	+30%	-19.7	-22.4
Capacity of collection centers	-10%	+12.5	+9.7
Capacity of collection centers	-20%	+23.0	+17.0
Capacity of collection centers	-30%	+34.8	+24.6

۷. نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی مدل‌های مختلف بهینه‌سازی جمع‌آوری و مدیریت ضایعات در تهران پرداخته است. باتوجه به پیچیدگی‌های سیستم‌های لجستیک معکوس و مسیریابی خودروهای جمع‌آوری ضایعات، استفاده از

الگوریتم‌های پیشرفته مانند الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی این فرایندها ضروری به نظر می‌رسد. مدل پیشنهادی در این مطالعه با تعریف مراکز تولید ضایعات و مراکز کاندید برای جمع‌آوری، توانسته است بر چالش‌های موجود در انتخاب نقاط بهینه برای جمع‌آوری ضایعات فائق آید. این مدل همچنین با در نظر گرفتن اهداف مختلف مانند هزینه، زمان و فاصله، توانسته است راه‌حل‌های مؤثری برای بهبود عملکرد سیستم‌های جمع‌آوری و بازیافت ضایعات ارائه دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که باتوجه به ابعاد پیچیده مسئله و افزایش تعداد مناطق و مراکز جمع‌آوری، زمان حل مدل با استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی مانند گمز به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود که برای حل مسائل مشابه در مقیاس بزرگ‌تر، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته و روش‌های جدید برای مدیریت پیچیدگی‌ها و کاهش زمان‌های حل استفاده شود. در نهایت، باتوجه به ویژگی‌های خاص تهران به عنوان یک کلان‌شهر با مناطق مختلف، بهینه‌سازی جمع‌آوری ضایعات می‌تواند نقش بسزایی در بهبود فرایندهای مدیریت شهری و کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی داشته باشد. این نتایج به‌ویژه برای سیاست‌گذاران و مدیران شهری مفید خواهد بود تا تصمیمات بهتری در زمینه مدیریت پسماند و توسعه زیرساخت‌های بازیافت اتخاذ کنند.

این تحقیق، مدل بهینه‌سازی برای ۲۲ منطقه تهران به کار گرفته شده است. با این حال، تحقیقات آتی می‌توانند به بررسی مقیاس‌های بزرگ‌تر، شامل کلان‌شهرها و حتی مقیاس‌های بین‌المللی بپردازند. این مطالعه می‌تواند شامل مناطق مختلف با ویژگی‌های خاص باشد که نیاز به تخصیص منابع بهینه و مدیریت پیچیده‌تری دارند. الگوریتم ژنتیک چندهدفه در این تحقیق به کار رفته است، اما تحقیقات آینده می‌توانند به بررسی الگوریتم‌های پیشرفته‌تر، نظیر الگوریتم‌های یادگیری ماشین، الگوریتم‌های تکاملی دیگر یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی خوشه‌ای بپردازند. این الگوریتم‌ها می‌توانند به افزایش دقت و سرعت حل مدل‌های پیچیده کمک کنند.

علاوه بر بهینه‌سازی اقتصادی و فنی، در تحقیقات آتی می‌توان به تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی جمع‌آوری ضایعات پرداخته شود. این تحقیق می‌تواند به بررسی اثرات

- performance of electric vehicles during waste collection. *Energies*, 17(17), pp.4228. <https://doi.org/10.3390/en17174228>
5. Sthiannopkao, S. and Wong, M.H., 2013. Handling e-waste in developed and developing countries: Initiatives, practices, and consequences. *Science Of The Total Environment*, 463, pp.1147–1153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.088>
 6. Sar, K. and Ghadimi, P., 2023. A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations. *Computers & Industrial Engineering*, 177, pp.109011. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109011>
 7. Rabbani, M., Sadati, S.A. and Farrokhi-Asl, H., 2020. Incorporating location routing model and decision making techniques in industrial waste management: Application in the automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, 148, pp.106692. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106692>
 8. Orlins, S. and Guan, D., 2016. China's toxic informal e-waste recycling: local approaches to a global environmental problem. *Journal Of Cleaner Production*, 114, pp.71–80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.090>
 9. Shih, H.S., 2017. Policy analysis on recycling fund management for E-waste in Taiwan under uncertainty. بلندمدت بر کاهش آلودگی، بهبود کیفیت زندگی شهری و افزایش آگاهی عمومی در خصوص ضایعات و بازیافت متمرکز شود.
۸. تحقیقات آنی
- از محدودیت‌های این پژوهش، فرض قطعی بودن پارامترها است. گام منطقی آینده، توسعه یک مدل تصادفی یا مبتنی بر سناریو است تا عدم قطعیت در تقاضا، زمان سفر و حتی قابلیت اطمینان حسگرهای IoT را در بر بگیرد.
۹. منابع
1. Prajapati, D., Daultani, Y. and Pratap, S., 2022. Sustainable vehicle routing of agro-food grains in the e-commerce industry. *International Journal Of Production Research*, 60(24). <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2034192>
 2. Moazzeni, S.M.T. and Mostafayi Darmian, S., 2022. A dynamic location-arc routing optimization model for electric waste collection vehicles. *Journal Of Cleaner Production*, 364, pp.132571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132571>
 3. Gunawan, A., Nguyen, M.P.K., Vincent, F.Y. and Nguyen, D.V.A., 2023. The heterogeneous vehicle routing problem with multiple time windows for the e-waste collection problem. In: *Proceedings Of The IEEE 19th International Conference On Automation Science And Engineering*. pp.1–6. <https://doi.org/10.1109/CASE56687.2023.10260477>
 4. Cieřla, M., Nowakowski, P. and Wala, M., 2024. The impact of variable ambient temperatures on the energy efficiency and

- Transport And Environment*, 63, pp.1–22.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.007>
15. Pourhejazy, P., Zhang, D., Zhu, Q., Wei, F. and Song, S., 2021. Integrated E-waste transportation using capacitated general routing problem with time-window. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, 145, pp.102169.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102169>
 16. Shi, J., Chen, W., Zhou, Z. and Zhang, G., 2020. A bi-objective multi-period facility location problem for household e-waste collection. *International Journal Of Production Research*, 58(2), pp.526–545.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1598591>
 17. Cotta, B., 2020. What goes around, comes around? Access and allocation problems in Global North–South waste trade. *International Environmental Agreements: Politics, Law And Economics*, 20(2), pp.255–269.
<https://doi.org/10.1007/s10784-020-09479-3>
 18. Nili, M., Jabalameli, M.S. and Sabouhi, F., 2021. A bi-objective mathematical model for location-allocation of municipal solid waste (Case study: Tehran). *Sharif Journal of Industrial Engineering (SJIE)*, 36(2), pp.41–50.
<https://doi.org/10.24200/j65.2019.51068.1892>
 - Journal Of Cleaner Production*, 143, pp.345–355.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.103>
 10. Koshta, N., Patra, S. and Singh, S.P., 2021. Estimation of E-waste at micro level for reverse logistics: A case of Delhi. *Journal Of Cleaner Production*, 314, pp.128063.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128063>
 11. Liu, X., Lin, K. and Wang, L., 2021. Stochastic evolutionary game analysis of e-waste recycling in environmental regulation from the perspective of dual governance system. *Journal Of Cleaner Production*, 319, pp.128685.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128685>
 12. Koshta, N., Patra, S. and Singh, S.P., 2024. A location-allocation model for E-waste acquisition from households. *Journal Of Cleaner Production*, 440, pp.140802.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140802>
 13. Islam, M.T. and Huda, N., 2018. Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation And Recycling*, 137, pp.48–75.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>
 14. Nowakowski, P., Szwarc, K. and Boryczka, U., 2018. Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms. *Transportation Research Part D:*

19. Mazloom Kalimani, Y. and Zegordi, S.H., 2023. Economic and environmental optimization model of the amount of waste allocated to different methods of urban waste disposal in Gilan province. *Sharif Journal of Industrial Engineering (SJIE)*, 39(1), pp.113–125. <https://doi.org/10.24200/j65.2024.64872.2409>
20. Ni, Z., Chan, H.K. and Tan, Z., 2026. Addressing the last mile' deficiency: A bi-objective model for e-waste reverse logistics network design. *Resources, Conservation & Recycling*, 227, pp.108713. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108713>

مستقبل
پژوهشی