



Multi-Objective Mathematical Model for Optimizing the Collection and Recycling of Urban Waste under Conditions of Uncertainty (The Subject Of Study: Karaj City)

Mohsen Bijanpoor¹, Reza Ehtsham Rasi (Ph.D.)^{2*}, Davood Karakhani (Ph.D.)³

(Received:2023.05.02 - Accepted:2023.09.09)

Abstract

In this research, using the double-objective mixed integer linear programming method, an optimal supply chain network for the collection and recycling of urban waste has been presented in terms of source separation and the uncertainty of per capita waste generation by citizens. Due to the uncertainty in the parameters of the problem, the two-stage stochastic programming method has been used to model the problem. The objective functions include an economic function to minimize investment costs and a social objective function to maximize the amount of recycling. In order to accurately solve the problem on a large scale, the Lagrange release method has been used. To validate and confirm the effectiveness of the model presented in this research, the model was implemented on a case study in the city of Karaj. According to the obtained results, to increase the amount of recycling in the waste supply chain network, more infrastructural and operational investments are needed. By increasing recycling, the harmful environmental and destructive effects of burying and burning waste will be reduced. The Lagrange release solution method can be used as a suitable method to reduce problem-solving time. In this research, it was observed that the Lagrange release method can solve large-scale problems with appropriate accuracy and in less time compared to the commercial CPLEX solver.

Key Words: two-stage stochastic programming, Lagrange's release method, linear programming, supply chain, waste management

1 . Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran m

2. Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran,

*. Corresponding author: ehteshamrasi@qiau.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran m

1. Introduction

In Iran, 50,000 tons of waste are produced daily, of which only about 10% are recycled. In the city of Tehran, approximately 2% of daily urban waste production is separated at the source. The operation of collecting and disposing urban waste is very expensive due to the high investment costs for the waste collection and transportation fleet and the need to spend significant operational costs. Therefore, even small and partial reductions in the operating costs of waste management lead to large savings in the cost of municipalities. On average, between 60 and 80 percent of urban solid waste management costs are related to waste collection and transportation costs. While in the world, on average, 70% of the produced waste is recycled, optimistically, this figure reaches about 20% in Iran, and this means that in the country, about 16 million tons of waste are buried in the ground without being recycled. One of the important reasons for the low waste recycling in Iran is the lack of separation from the source of all types of waste produced in the country. The purpose of this research is to reduce the costs of urban waste management through separation at the source of waste and creating special hubs for each type of separated waste.

2- Literature review

Among all municipal solid waste management strategies, waste recycling has received more attention than other options due to its impact on economic growth in addition to protecting the environment and human health. Given the need for investment in collection and disposal facilities along with high operating costs, conducting waste collection, recycling, or disposal operations is very costly. Therefore, a slight improvement in this process causes a significant reduction in the costs of municipalities (Babaei et al., 2017). The meaning of solid waste management is a set of coherent and systematic programs and laws related to the control of production, collection, transportation, separation, recycling and burial of waste based on the principles of public health, economy and conservation of biological resources (Akbarpour Shirazi et al., 2015). According to the conducted research, urban solid waste management can be considered as a supply chain network design

problem (Mohammadi et al., 2019). This network includes facilities such as waste collection stations, transfer stations and recycling and disposal facilities. In the process of household waste collection, waste collected from local collection stations is first sent to transfer facilities where it is unloaded from municipal collection trucks and loaded into larger trucks to be transported to landfills in bulk (Habibi et al., 2017). In order to design an efficient and suitable supply chain network for urban waste collection, mathematical programming models can be used to improve the performance of this network by optimizing the location of facility locations and their allocations, and therefore, making them valuable tools for improving overall supply chain efficiency (Habibi et al., 2017). Since the parameters and information required for designing the waste supply chain network are not always certain, designing the supply chain in a deterministic way decreases its practical efficiency. Therefore, considering uncertainty in designing the model is inevitable (Rahimi & Qadavati, 2017). The findings from previous research indicate that, in the majority of studies, the issue of waste separation at the source and the establishment of hub centers for each type of the separated waste have not been taken into consideration; therefore, in the present study, both of the above mentioned issues have been taken into consideration in designing the model.

3- Methodology

Building on the points mentioned, this research is an attempt to design a multi-level supply chain network for urban waste collection and recycling, focusing on source segregation and uncertainty in citizens' per capita waste generation. This supply chain network includes urban points (segregated waste collection tanks) as waste collection centers, transfer centers or hubs for separated waste, recycling centers, as well as burial centers and waste incinerators. The flow of materials in this supply chain is considered in such a way that the waste is separated at the source by the citizens and placed in the tanks specific to each type of waste. Then, these wastes are transported by collection trucks to the hub or waste transfer centers specific to each type of waste, and then, transported by larger trucks to recycling centers and disposal centers (including burying

or burning waste centers). In order to design the network, a mixed integer programming problem is designed, which includes two economic and social objectives. The first objective function seeks to minimize initial investment and operating costs, while the second objective function, that is, the social objective function, focuses on maximizing urban waste recycling. In order to take into account, the uncertainty in the citizens' per capita waste generation, a two-stage random programming method has been used. In order to linearize the above two objective functions, the epsilon constraint method is used. Also, using a case study in the city of Karaj, the efficiency of the designed model has been investigated. The solution method used to solve the presented model in large dimensions is the Lagrange release method, which is classified in the group of exact problem-solving methods.

4- Results

In the present study, with the aim of addressing the existing research gap, an integer linear programming mathematical model was developed for designing the waste collection and recycling network, focusing on source separation and the establishment of hubs for each type of separated waste.

In this research, in addition to the concept of recycling, the concept of separation hub was also considered in the design of the supply chain. In order to validate the model, a case study was conducted in Karaj and its results were presented. Collecting suitable data to solve the problem was one of the problems of designing the model due to the high amount of required data and the difficulty of accessing some statistics. According to the obtained results, in order to increase the amount of recycling in the waste supply chain network, more infrastructural and operational investments are needed. By increasing recycling, the environmental and destructive effects of burying and burning waste will be reduced. The Lagrange release method can be used as a suitable solution method to reduce problem solving time in problems with high values. In this research, it was observed that the Lagrange release method can solve problems with high values with appropriate accuracy and in less time

compared to the CPLEX solver. Therefore, it can be said that the innovations of this research include the development of the waste collection and recycling supply chain model under uncertainty, considering the separation hubs, using the Lagrange release method to solve the model and the case study of Karaj city.

5- Discussion

The purpose of this study was to design a multi-objective mathematical model to manage municipal and hospital waste. Hence, after reviewing the related literature, the gap in the existing studies was determined. In the studies conducted in the relevant articles, it was found that the specialized hub for each type of waste was not included, and only in a few articles, the concept of recycling was considered in the design of the supply chain. Also, to the researchers' best knowledge, no article was found in which exact solution methods were used to reduce the difficulty of solving the problem. Considering the collection and recycling supply chain network presented in this research and also based on the literature review, issues such as routing the movement of waste collection and transportation trucks in the mentioned network, production and storage planning for recycling centers, using heuristic and meta-heuristic solution methods to solve the model which are combined with other exact mathematical solution methods such as Lagrange release, considering environmental objective functions such as pollution reduction in the waste transportation and recycling process and considering the uncertainty in the capacity of facilities can be considered as the subject of future research.



10.71737/JPM.2025.304.3529



مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه سازی جمع آوری و بازیافت پسماندهای شهری در شرایط عدم قطعیت (مورد مطالعه: شهر کرج)

محسن بیژن پور^۱، رضا احتشام رایی^{۲*}، داوود قراخانی^۳
(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲ - پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸)

چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه، یک شبکه بهینه زنجیره تأمین جمع آوری و بازیافت پسماندهای شهری با لحاظ تفکیک از مبدأ و نیز عدم قطعیت در سرانه تولید پسماند شهروندان ارائه گردیده است. با توجه به وجود عدم قطعیت در پارامترهای مسئله از روش برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای برای مدل سازی مسئله استفاده شده است. توابع هدف شامل یک تابع اقتصادی برای حداقل سازی هزینه های سرمایه گذاری و یک تابع هدف اجتماعی برای حداکثر سازی مقدار بازیافت می باشد. به منظور حل دقیق مسئله در ابعاد بزرگ از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است. برای صحت سنجی و تأیید کارایی مدل ارائه شده در این تحقیق، مدل روی یک مطالعه موردی در شهر کرج پیاده سازی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، برای افزایش میزان بازیافت در شبکه زنجیره تأمین پسماند، نیاز به سرمایه گذاری های زیرساختی و عملیاتی بیشتر می باشد. با افزایش بازیافت، آثار زیان بار زیست محیطی و تخریبی دفن و سوزاندن پسماندها کاهش خواهد یافت. روش حل آزادسازی لاگرانژ، می تواند به عنوان یک روش حل مناسب برای کاهش زمان حل مسائل مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، مشاهده شد که روش آزادسازی لاگرانژ در مقایسه با حل کننده تجاری سیپلکس می تواند مسائل در مقیاس بزرگ را با دقت مناسب و در زمانی کمتر حل کند.

واژه های کلیدی:

برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای، روش آزاد سازی لاگرانژ، برنامه ریزی خطی، زنجیره تأمین، مدیریت پسماند

۱ - دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران mnbijanpoor@yahoo.com
 ۲ - استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران (نویسنده مسؤول)، ehteshamrasi@qiau.ac.ir
 ۳ - استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران davoodgharakhany@yahoo.com

مقدمه

در ایران روزانه ۵۰ هزار تن پسماند تولید می شود و این در حالیست که فقط حدود ۱۰ درصد آنها بازیافت می شوند. در شهر تهران، میزان تفکیک از مبدأ پسماند های شهری در حدود ۲ درصد پسماندهای تولیدی روزانه است. عملیات جمع آوری و دفع پسماندها، به دلیل صرف هزینه های سرمایه گذاری گزاف برای ناوگان جمع آوری و حمل پسماند و نیز لزوم صرف هزینه های چشم گیر عملیاتی، مانند هزینه های سوخت، نگهداری و تعمیرات، بسیار پر هزینه است. بنابراین حتی کاهش های اندک در هزینه های عملیاتی جمع آوری و دفع پسماندها، منجر به صرفه جویی های بزرگ در هزینه های شهرداری ها می شود.

به طور میانگین بین ۶۰ تا ۸۰ درصد هزینه های مدیریت پسماندهای جامد شهری مربوط به هزینه های جمع آوری و حمل و نقل پسماند ها است. (تی آلمیرال و همکاران ۲۰۱۳)^۱ براساس تازه ترین آمارهای اعلام شده، در جهان سالانه حدود ۲ میلیارد تن پسماند صنعتی و شهری تولید می شود که ارزش بازار آن از مرحله جمع آوری تا بازیافت، به حدود ۵۰۰ میلیارد دلار می رسد. ارزش افزوده حاصل از بازیافت پسماند در جهان به اندازه ای است که حدود ۱۵ درصد تولید ناخالص داخلی برخی کشورهای صنعتی را تشکیل می دهد. (هاریسون سی و همکاران ۲۰۱۰)^۲ در حالی که در جهان به طور متوسط ۷۰ درصد پسماندهای تولید شده بازیافت می شود، به صورت خوشبینانه این رقم در ایران به حدود ۲۰ درصد می رسد و این به آن معناست که در کشور سالانه حدود ۱۶ میلیون تن پسماند، در خاک دفن می شود. در فرآیند دفع پسماند ها در کشور، تنها ۲ درصد از پسماند ها با رعایت اصول بهداشتی دفن می شوند. طبق آمارهای جهانی، در استرالیا با توجه به شرایط زمین ۷۰ درصد پسماند ها دفن و ۳۰ درصد پس ماندها بازیافت می شود. در کشور ژاپن تنها ۳ درصد پسماند ها دفن می شود در حالیکه ۱۷ درصد آنها بازیافت مواد و ۷۴ درصد پس ماندها در مسیر بازیافت انرژی قرار می گیرند. سرعت فزاینده رشد جمعیت و توسعه مستمر شهرها در ایران و گسترش فعالیت های صنعتی، تجاری و خدماتی منجر به تولید مقادیر زیادی پسماند جامد در شهرهای ایران شده است (اکبرپور شیرازی و همکاران، ۱۳۹۵).^۳ بنابراین مدیریت پسماندهای جامد یکی از دغدغه های مهم حوزه سلامت و زیست محیطی برای دولت و مسئولان شهری است؛ زیرا در صورت

1- T.,Almirall,E

2 - Harrison, C

3 -Akbarpour Shirazi

عدم مدیریت صحیح، پسماندهای تولید شده می‌توانند آب‌های سطحی و زیرزمینی، خاک و هوا را در مقیاس وسیع و با سرعت بسیار زیاد آلوده کنند (حبیبی و همکاران، ۲۰۱۷)^۱

پسماندهای شهری عمدتاً از پسماندهای روزمره تشکیل شده‌است. مدیریت این پسماندها به دلیل رشد سریع جمعیت و عدم سرمایه‌گذاری مناسب توسط دولت‌ها یا مقامات مسئول، برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه به چالشی دائمی تبدیل شده‌است (عرفان بابایی و دیگران ۱۳۹۷)^۲. مدیریت کنترل‌نشده یا نامناسب این پسماندها می‌تواند منجر به مشکلات جدی از جمله آسیب به سلامت انسان، آسیب به اکوسیستم‌ها، از دست دادن تنوع زیستی و آلودگی‌های آب، خاک و هوا شود. مدیریت پسماند شامل گزینه‌های مختلفی برای مدیریت پسماند جامد است که شامل موارد به حداقل رساندن تولید پسماند، بازیافت و دفع بهداشتی می‌باشد (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹)^۳.

در میان تمام استراتژی‌های مدیریت پسماندهای جامد شهری، بازیافت پسماند به دلیل تأثیر آن بر رشد اقتصادی، علاوه بر حفاظت از محیط‌زیست و سلامت انسان، بیشتر از سایر گزینه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌است. با توجه به نیاز به سرمایه‌گذاری در تأسیسات جمع‌آوری و دفع و همچنین هزینه‌های عملیاتی بالا، انجام عملیات جمع‌آوری و بازیافت یا دفع بسیار پرهزینه است. بنابراین اندکی بهبود در این فرآیند باعث کاهش چشم‌گیر در هزینه‌های شهرداری‌ها می‌شود (عرفان بابایی و دیگران ۱۳۹۷).

چالش رو به رشد مدیریت پسماند جامد شهری در شهرهای بزرگ مستلزم توسعه ابزارهای پشتیبانی تصمیم‌گیری علمی برای کمک به مقامات در مدیریت و برنامه‌ریزی مسائل شهری است (آصفی و همکاران، ۲۰۱۹) منظور از مدیریت پسماند جامد مجموعه‌ای از برنامه‌ها و قوانین منسجم و سیستماتیک مربوط به کنترل تولید، جمع‌آوری، حمل و نقل، تفکیک، بازیافت و دفن پسماندها بر اساس اصول بهداشت عمومی، اقتصاد و حفظ منابع زیستی می‌باشد (اکبرپور شیرازی و همکاران، ۱۳۹۵).

طبق تحقیقات انجام شده، مدیریت پسماند جامد شهری را می‌توان به عنوان یک مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفت (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹). این شبکه شامل تأسیساتی مانند ایستگاه‌های جمع‌آوری پسماند، ایستگاه‌های انتقال و تأسیسات بازیافت و دفع است. در فرآیند جمع‌آوری پسماندهای خانگی، پسماندهای جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های جمع‌آوری محلی، ابتدا به تأسیسات انتقال فرستاده می‌شوند؛ جایی که از کامیون‌های جمع‌آوری شهری تخلیه و در کامیون‌های بزرگ‌تر بارگیری می‌شوند تا به صورت انبوه به محل‌های دفن پسماند منتقل شوند (حبیبی و

1 - Habibi

2- Babaei , E

3 -Mohammadi

همکاران، ۲۰۱۷). تصمیمات مهمی که برای افزایش راندمان کلی سیستم در این شبکه اتخاذ می‌شود، شامل شناسایی مکان‌های بهینه برای تأسیسات مختلف پسماند و تعیین جریان مواد از طریق آنها می‌شود (پوریانی و همکاران، ۲۰۱۹)^۱. به منظور طراحی شبکه زنجیره‌تأمین کارا و مناسب برای فرآیند جمع‌آوری پسماندهای شهری، مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی قادر به بهبود عملکرد این زنجیره‌تأمین با بهینه‌سازی مکان تأسیسات و تخصیص تأسیسات به یکدیگر هستند و لذا از این نظرمفید هستند (حبیبی و همکاران، ۲۰۱۷). چون پارامترها و اطلاعات مورد نیاز در هنگام طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پسماند، به طور قطعی در دسترس نمی‌باشند، لذا طراحی یک زنجیره-تأمین به شکل قطعی، کارایی آن را در واقعیت کاهش می‌دهد، بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت در طراحی مدل اجتناب ناپذیر است (رحیمی و قضاواتی، ۱۳۹۷)^۲.

به توجه به موارد ذکر شده، این تحقیق مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین چند سطحی جمع-آوری و بازیافت پسماندهای شهری را با لحاظ تفکیک در مبدأ و عدم قطعیت در سرانه تولید پسماند توسط شهروندان را ارائه می‌دهد؛ این زنجیره‌تأمین شامل نقاط شهری (مخازن جمع‌آوری زباله تفکیکی) به‌عنوان مراکز جمع‌آوری پسماند، مراکز انتقال یا هاب مختص پسماندهای تفکیک شده، مراکز بازیافت و نیز مراکز دفن و پسماند سوزها است. جریان مواد در این زنجیره‌تأمین به این صورت در نظر گرفته شده است که پسماندها در مبدأ توسط شهروندان تفکیک و در مخازن مختص هر نوع پسماند قرار می‌گیرند. سپس این پسماندها توسط کامیون‌های جمع‌آوری به مراکز هاب یا انتقال پسماند مختص هر پسماند منتقل می‌شوند و بعد از آن توسط کامیون‌های بزرگ‌تر به مراکز بازیافت و مراکز دفع (شامل دفن یا سوزاندن پسماندها) منتقل می‌شوند. به منظور طراحی شبکه فوق، یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط طراحی می‌شود، که شامل دو هدف اقتصادی و اجتماعی می‌باشد؛ اولین تابع هدف این مسئله در پی حداقل کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و نیز هزینه‌های عملیاتی است و دومین تابع هدف یعنی تابع هدف اجتماعی به دنبال حداکثر کردن میزان بازیافت پسماندهای شهری می‌باشد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در میزان تولید سرانه پسماند توسط شهروندان، از روش برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده شده است. به منظور خطی‌سازی دو تابع هدف فوق روش اپسیلون محدودیت به کار گرفته می‌شود. همچنین با استفاده از مطالعه موردی در شهر کرج کارایی مدل طراحی شده بررسی خواهد شد. روش حل مورد استفاده برای حل مدل ارائه شده در ابعاد بزرگ، روش آزادسازی لاگرانژ است که در گروه روش‌های دقیق

1 -Pouriani .

2 -Rahimi and Ghezavati,

حل مسئله طبقه بندی می‌شود. در ادامه مقاله ادبیات نظری مرتبط با موضوع تحقیق بررسی خواهد شد.

با توجه به اهمیت مسئله مدیریت پسماند جامد از جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، در دهه‌های اخیر مطالعات بسیاری برای تعیین ساختار شبکه زنجیره تأمین جمع‌آوری پسماند صورت گرفته‌است. (ارکوت و همکاران، ۲۰۰۸)^۱ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه را برای حل مسئله مکان‌یابی و تخصیص ظرفیت برای تأسیسات زنجیره تأمین پسماند در مقیاس‌های منطقه‌ای و استانی با توجه به معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی توسعه دادند. (کوتینیو-رودریگز و همکاران، ۲۰۱۲)^۲ یک مدل دو هدفه را توسعه دادند. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح که هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نارضایتی ناشی از آن را به طور همزمان در بین ساکنان محلی به حداقل می‌رساند، تعداد تأسیسات مورد نیاز، ظرفیت و محل استقرار آن‌ها و سهم هر یک از تأسیسات در تأمین تقاضا در این مدل مشخص می‌شود. (سانتیبانز-آگیلار و همکاران، ۲۰۱۳)^۳ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای برنامه‌ریزی بهینه یک زنجیره تأمین مرتبط با سیستم‌های مدیریت پسماندهای شهری با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی پیشنهاد کردند. (حریجانی و همکاران، ۱۳۹۶)^۴ نیز با اتخاذ تصمیمات همزمان در خصوص مکان مراکز پردازش پسماند، تخصیص ظرفیت به مراکز و مسیریابی در شبکه حمل و نقل پسماند، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای به حداکثر رساندن سود شبکه بازیافت و دفع در تهران توسعه داده‌اند. در مقاله (حبیبی و همکاران، ۲۰۱۷)^۵ یک مدل بهینه‌سازی استوار چندهدفه را برای انتخاب محل و تخصیص ظرفیت تمام تأسیسات بازیافت و دفع در یک سیستم مدیریت پسماند جامد ارائه شده است؛ این مدل به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا مکان تأسیسات بازیافت و دفع، تخصیص تأسیسات به یکدیگر، نوع فن‌آوری پردازش و حمل پسماند، ظرفیت هر تأسیسات و تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز برای حمل و نقل پسماند بین تأسیسات را بهینه‌سازی کنند. در این تحقیق هزینه‌های سرمایه‌گذاری، حمل و نقل و دفن مواد زائد به شکل غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. (محمد و همکاران، ۲۰۱۷)^۵ به منظور کاهش انتشار کربن در مسئله خود سطح ظرفیت تأسیسات و حالت حمل و نقل پسماندها را بهینه کردند. علاوه بر این در این تحقیق جریان بهینه بین تأسیسات مختلف در زنجیره تأمین پسماند در نظر گرفته شده است تا بتوان بین هزینه کل زنجیره تأمین و

1 -Erkut

2 -Coutinho-Rodrigues

3 -Santibañez-Aguilar

4- Harijani

5 -Mohammed

انتشار کربن تحت سیاست‌های مختلف کربن تعادل ایجاد کرد. (محمد و همکاران، ۲۰۱۷) در مقاله خود بیان داشته اند، برای رسیدن به اهداف تحقیق یک مدل بهینه‌سازی را برای بررسی یک مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین پسماند چند دوره‌ای، چند محصولی و دارای ظرفیت پیشنهاد می‌کند؛ برای حل این مسئله از یک فرمولاسیون برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط استفاده می‌شود. رودریگو د آلوارنگا گومز و همکاران (۲۰۱۷) به منظور بهینه‌سازی فرآیند جمع‌آوری پسماند یک مدل برای لجستیک معکوس ارائه داده‌اند تا با حداقل رساندن تعداد کامیون‌های مورد نیاز و کل مسافت طی شده، هزینه‌ها کلی سیستم جمع‌آوری را کاهش دهند. این مقاله یک مدل ریاضی و بر اساس مسئله مسیریابی کامیون با چندین سفر برای برنامه‌ریزی لجستیک معکوس برای جمع‌آوری پسماند ارائه داده‌است، در این مقاله با توجه ترکیبایی بودن مدل مسئله از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید استفاده شده‌است.

(رحیمی و قضاواتی، ۱۳۹۷) در تحقیق خود یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای را برای طراحی و برنامه‌ریزی یک شبکه لجستیک معکوس تحت عدم قطعیت برای بازیافت پسماند ساخت و ساز ارائه داده‌اند که در آن اهداف به صورت بیشینه‌سازی سود و اثرات اجتماعی و حداقل سازی اثرات زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌است. در این مقاله مسئله طراحی شبکه با تقاضای احتمالی محصولات بازیافتی و نرخ سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده‌است.

(لوپز-سانچز و همکاران، ۲۰۱۸)^۱ حل مسئله جمع‌آوری پسماند یک شهر در جنوب اسپانیا به عنوان یک مسئله مسیریابی چندهدفه مورد بررسی قرار گرفته‌است. اهداف مسئله مورد نظر به حداقل رساندن هزینه کلی سفر است؛ یعنی کل مسافت طی شده توسط همه وسایل جمع‌آوری و همچنین زمان سفر یعنی مدت‌زمان طولانی‌ترین مسیر برای یک وسیله نقلیه در نظر گرفته شده است. در این مقاله از یک روش ابتکاری مبتنی بر جستجوی حریصانه استفاده شده‌است.

(پوریانی و همکاران، ۲۰۱۹) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط دو سطحی را توسعه داده‌اند. سطح پایین‌تر این مدل شامل مکان و هزینه‌های تأسیس ایستگاه‌های جمع‌آوری پسماند جامد است و سطح بالاتر شامل تخصیص پسماند به مراکز مختلف است. به منظور مقابله با عدم قطعیت در مقدار مواد زاید جامد جمع‌آوری شده، یک رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده کرده‌اند. مدل پیشنهادی با استفاده از یک مطالعه موردی در بابل مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹)^۲ یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای هماهنگی تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی در شبکه‌های زنجیره‌تأمین پسماند ارائه داده‌اند. مساله

1- López-Sánchez

2 -Mohammadi

بهینه‌سازی حاصل به صورت یک مساله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی گشته- است، که عملکردهای مختلفی مانند جمع‌آوری پسماند در شهرها، تفکیک پسماند در مراکز جداسازی، بازیافت پسماند در کارخانه‌ها و فروش محصولات نهایی به بازارها را پوشش می‌دهد.

(آصفی و همکاران، ۲۰۱۹)^۱ با هدف بهینه‌سازی شبکه لجستیک و سیستم حمل و نقل در مدیریت جامع پسماندهای شهری، که در آن زنجیره کامل پسماند به عنوان یک شبکه لجستیک سه سطحی فرمول‌بندی شده‌است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای فرموله کردن سیستم مدیریت جامع پسماند‌های شهری در چارچوب مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره زمانی توسعه داده شده‌است. در این تحقیق عدم قطعیت در میزان تولید پسماندهای شهری در نظر گرفته شده‌است، با توجه به این موضوع یک رویکرد بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای برای پشتیبانی موثر از سیستم حمل و نقل مدیریت جامع پسماندهای شهری پیشنهاد شده‌است.

(آدلک و اولکان نی، ۲۰۲۰)^۲ با تمرکز بر روی حل مسئله مکان‌یابی تأسیسات جمع‌آوری پسماند در یک منطقه مسکونی شهری و مسئله مربوط به تخصیص مشتریان (نقاط تولید پسماند) و تخصیص کامیون‌های جمع‌آوری به این مکان‌ها می‌باشد. این مسئله به عنوان مسئله پوشش مجموعه‌ها، که یک نوع مسئله مکان‌یابی تأسیسات کلاسیک می‌باشد فرمول‌بندی شده‌است. مدل پیشنهادی در این مطالعه، تعداد مکان‌های جمع‌آوری پسماند مورد نیاز برای یک منطقه مسکونی شهری را برآورد می‌کند.

(قنادپور و زندیه، ۱۳۹۹)^۳ به بررسی مساله مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند سلامت برای مراکز پزشکی کوچک در ایران می‌پردازند که مقادیر کمی پسماند تولید می‌کنند. در این تحقیق، یک مدل مسیریابی پایدار محور برای جمع‌آوری پسماند طراحی شده‌است به طوری که هزینه‌های حمل و نقل پسماند کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انتظار می‌رود نگرانی‌ها در مورد مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی ارزشمند و آلودگی‌های مرتبط کاهش یابد و خطرات شیوع بیماری و عواقب ضروری برای جامعه کاهش یابد. از یک الگوریتم تکاملی خود تطبیقی برای حل این مدل بهره گرفته شده‌است.

چنکسی یانگ و جیانگ گو چن (۲۰۲۰) یک مدل بهینه‌سازی را برای طراحی یک شبکه لجستیک معکوس پسماندهای ساخت و ساز و تخریب ساختمانی منطقه‌ای پیشنهاد کرده‌اند؛ به این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیک معکوس

1 - Asefi

2 - Adeleke and Olukanni

3- Ghannadpour and Zandiyeh

پیشنهادی توسعه داده‌اند. زی یو پان و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه مختلط عدد صحیح برای به حداقل رساندن هزینه‌های دفع پسماند ساخت و ساز و تخریب و نیز برای به حداکثر رساندن سود شرکت‌های بازیافت و میزان بازیافت پسماند ساخت و ساز و تخریب ارائه داده‌اند؛ در این مقاله میزان پسماندهای ساختمانی تولید شده را دارای عدم قطعیت در نظر گرفته‌اند تا با نوسانات آبی میزان عرضه پسماند مقابله کنند. با توجه به این موضوع، به منظور مدل‌سازی مسئله خود از روش بهینه‌سازی استوار استفاده کرده‌اند.

جدول ۱ - خلاصه تحقیقات پیشین و شیوه حل مدل در آنها

Table 1 - Summary of previous researches and the method of solving the model in

مقاله	زنجیره تأمین		تابع هدف			روش حل یا الگوریتم حل		عدم قطعیت
	بازیافت	جمع‌آوری	اقتصادی	اجتماعی	محیط زیستی	حل با ساماندهی تجاری	الگوریتم دقیق	
سانتیانز گیلار و همکاران (۲۰۱۲)	-	*	*	-	-	*	-	-
حریجانی و همکاران (۱۳۹۶)	*	*	*	-	-	*	-	-
حیبی و همکاران (۲۰۱۷)	*	*	*	*	*	*	-	*
محمد و همکاران (۲۰۱۷)	-	*	*	*	-	*	-	*
گومز و همکاران (۲۰۱۷)	-	*	*	-	-	*	*	-
رحیمی و قضاوتی (۱۳۹۷)	*	-	*	*	*	*	-	*
لوپز-سانچز و همکاران (۲۰۱۸)	-	*	*	-	-	*	-	*
پوریانی و همکاران (۲۰۱۹)	-	*	*	-	-	*	-	*
محمدی و همکاران (۲۰۱۹)	*	*	*	-	-	*	-	*
أصفی و همکاران (۲۰۱۹)	-	*	*	-	-	*	-	*
چنکسی یانگ و جیانگ گو چن (۲۰۲۰)	-	*	*	-	-	*	-	*
زی یوپان و همکاران (۲۰۲۰)	-	*	*	*	*	*	-	-
مقاله حاضر	*	*	*	*	*	*	*	*

them

با توجه به مطالعات انجام شده، هنوز برخی از مسائل وجود دارد که در ادبیات حوزه مدیریت پسماندهای شهری مورد بررسی قرار نگرفته‌است. در مدل‌های ریاضی ارائه شده برای زنجیره تأمین پسماندهای شهری، به مسئله تفکیک از مبدأ با لحاظ ایجاد مراکز هاب اختصاصی هر نوع پسماند، توجه چندانی نشده است و لذا تحقیقی که نقاط انتقال یا مراکز هاب در زنجیره تأمین مذکور را به

صورت تفکیکی و مختص هر نوع پسماند در نظر گرفته باشند یافت نشد. همچنین در طراحی زنجیره تأمین، مفهوم بازیافت در تعداد کمی از مقالات لحاظ شده بود. همچنین مقاله‌ای مشاهده نشد که از روش‌های دقیق برای کاهش دشواری حل مسئله استفاده شده باشد. بنابراین در این مقاله از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مسئله استفاده شد. در کنار موارد مذکور، با توجه به مرور ادبیات و مطالعاتی که انجام گرفته است، پژوهشی مشاهده نشده است که از روش دقیق آزادسازی لاگرانژ در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین جمع‌آوری و بازیافت پسماند شهری، استفاده کرده باشد. مزیت روش آزادسازی لاگرانژ اینست که قادر به تولید جواب‌های دقیق برای مسائل می‌باشد، این در حالی است که روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری دیگر، تضمینی به ارائه جواب بهینه ندارند و معمولاً جواب این دسته از روش‌ها، جوابی نزدیک به جواب بهینه است. بنابراین در این مقاله از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مسئله بیان شده استفاده شد. همچنین در این مقاله انواع بیشتری از پسماندها نسبت به مطالعات دیگر در نظر گرفته شده است (در این مدل هفت نوع پسماند تفکیک شده در نظر گرفته شده است که با توجه به شماره اندیس نوع پسماند (i) شامل ۱) پسماند بیمارستانی (۲) پسماند شیشه‌ای (۳) پسماند فلزی (۴) پسماند چوبی (۵) پسماند تر (۶) پسماند پلاستیکی و (۷) پسماند کاغذی و مقوا می‌باشد.

با توجه به موارد ذکر شده، این تحقیق مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین چند سطحی جمع‌آوری و بازیافت پسماندهای شهری را با لحاظ تفکیک در مبدأ و عدم قطعیت در سرانه تولید پسماند توسط شهروندان را ارائه می‌دهد؛ این زنجیره تأمین شامل نقاط شهری (مخازن جمع‌آوری زباله تفکیکی) به عنوان مراکز جمع‌آوری پسماند، مراکز انتقال یا هاب مختص پسماندهای تفکیک شده، مراکز بازیافت و نیز مراکز دفن و پسماند سوزها است. جریان مواد در این زنجیره تأمین به این صورت در نظر گرفته شده است که پسماندها در مبدأ توسط شهروندان تفکیک و در مخازن مختص هر نوع پسماند قرار می‌گیرد. سپس این پسماندها توسط کامیون‌های جمع‌آوری به مراکز هاب یا انتقال پسماند مختص هر پسماند منتقل می‌شوند و بعد از آن توسط کامیون‌های بزرگ‌تر به مراکز بازیافت و مراکز دفع (شامل دفن یا سوزاندن پسماندها) منتقل می‌شوند.

به منظور طراحی شبکه فوق، یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط طراحی می‌شود، که شامل دو هدف اقتصادی و اجتماعی می‌باشد. اولین تابع هدف این مسئله در پی حداقل کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و نیز هزینه‌های عملیاتی است و دومین تابع هدف یعنی تابع هدف اجتماعی به دنبال حداکثر کردن میزان بازیافت پسماندهای شهری می‌باشد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در میزان تولید سرانه پسماند توسط شهروندان، از روش برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده شده است. به منظور خطی‌سازی دو تابع هدف فوق روش اپسیلون محدودیت به کار گرفته

می‌شود. همچنین با استفاده از مطالعه موردی در شهر کرج کارایی مدل طراحی شده بررسی خواهد شد. روش حل مورد استفاده برای حل مدل ارائه شده در ابعاد بزرگ، روش آزادسازی لاگرانژ است که در گروه روش‌های دقیق حل مسئله طبقه بندی می‌شود.

بنابراین تمرکز اصلی این مقاله بر روی مفروضات جدیدی در سطوح زنجیره‌تأمین پسماند شهری است؛ این مفروضات شامل در نظر گرفتن مبحث تفکیک از مبدأ پسماندها توسط شهروندان در مخازن پسماند مخصوص و در نظر گرفتن مراکز انتقال یا هاب اختصاصی هر نوع پسماند و همچنین تسهیلات حمل و نقل برای هر نوع پسماند به صورت تفکیک شده می‌باشد. همچنین در این مقاله سعی شده که زنجیره تأمین با یک نگاه یکپارچه نگریسته شود و تصمیم‌های راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی به‌طور همزمان بهینه شوند. علاوه بر این در این مقاله به منظور در نظر گرفتن نوسانات ناشی از پارامتر میزان پسماند تولید شده در هر دوره زمانی، پارامتر میزان پسماند به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است و از روش بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای برای مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده شده است. در مطالعات پیشین انجام شده، به روش‌های حل دقیق مسائل توجه نشده است.

در مدل‌های ریاضی ارائه شده برای زنجیره‌تأمین پسماندهای شهری، به مسئله تفکیک از مبدأ با لحاظ ایجاد مراکز هاب اختصاصی هر نوع پسماند، توجه چندانی نشده است و لذا تحقیقی که نقاط انتقال یا مراکز هاب در زنجیره‌تأمین مذکور را به صورت تفکیکی و مختص هر نوع پسماند در نظر گرفته باشند، یافت نشد؛ بنابراین تمرکز اصلی این مقاله بر روی مفروضات جدیدی در سطوح زنجیره‌تأمین پسماند شهری است. این مفروضات شامل در نظر گرفتن مبحث تفکیک از مبدأ پسماندها توسط شهروندان در مخازن پسماند مخصوص و در نظر گرفتن مراکز انتقال یا هاب و همچنین تأسیسات حمل و نقل برای هر نوع پسماند به صورت تفکیک شده می‌باشد. همچنین تأسیسات حمل و نقل برای هر نوع پسماند به صورت تفکیک شده در نظر گرفته می‌باشد. همچنین سعی شده که زنجیره تأمین با یک نگاه یکپارچه نگریسته شود و تصمیم‌های راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی به‌طور همزمان بهینه شوند. به طور کلی تصمیمات بلند مدت که فراتر از یک سال بر فرآیندهای پروژه مؤثرند تصمیمات استراتژیک خواهند بود؛ اقداماتی نظیر تعیین مراکز هاب و بازیافت و ظرفیت نهایی آنها، روش‌ها و سازوکارهای سیستم حمل و نقل پسماند، نوع سیستم اطلاعاتی تصمیم‌گیری یا پشتیبان تصمیم، شیوه یا اهداف استفاده از شبکه سنسورهای ویژه (اینترنت اشیا) برای افزایش بهره‌وری واحدهای جمع‌آوری و حمل‌زباله، تصمیم‌گیری در مورد میزان یا درجه تفکیک پسماندها (معمولاً ۷ نوع پسماند در شرایط متعارف

قابل تفکیک از پسماندها می‌باشند) ، تعیین پسماندهای دارای اولویت برای تفکیک از می‌دا ، شیوه تقسیم بندی مناطق شهری ، شیوه جمع‌آوری زباله‌ها ، شیوه تأسیس و نیز تصمیم‌گیری در مورد تأسیس یا عدم تأسیس و تعداد هاب اختصاصی پسماند در مناطق شهری ، شیوه حمل پسماندها ، اهداف اصلی و محصولات مورد نظر در فرآیند بازیافت، شیوه تجمیع مناطق شهری برای توازن جمعیت با ظرفیت مراکزهاب، تعیین سال مورد نظر در آینده برای برآورد جمعیت آتی مناطق مسکونی شهری (مثلا برآورد جمعیت برای ۱۵ سال آینده و یا ۲۵ سال آینده) ومانند آنها از جمله تصمیمات راهبردی خواهند بود.

تصمیمات تاکتیکی تصمیماتی هستند که برای دستیابی به اهداف استراتژیک در مسيردستیابی به هدف در بازه‌های زمانی ۳ ماه تا یکسال اتخاذ می‌شوند؛ در موضوع مورد مطالعه تصمیماتی نظیر تغییر در ظرفیت کامیون‌های حمل و یا شیوه استفاده از شبکه سنسورهای ویژه (اینترنت اشیا) در مناطق مختلف با توجه به محدودیت‌های جغرافیایی هر منطقه شهری ، تغییر در ساعات جمع‌آوری پسماندها و نظایر آنها از جمله تصمیمات تاکتیکی است.

تصمیمات عملیاتی که برای بازه‌های زمانی هفتگی تا ماهانه اتخاذ می‌شوند مبتنی بر ابتکارهای اجرایی برای تسهیل‌گری تحقق اهداف تاکتیکی می‌باشند. این تصمیمات عموماً کوتاه مدت و برای اجرای فرآیندها و کارهای اجرایی روزانه و حداکثر ماهانه پروژه خواهند بود .

در مدل این تحقیق، تصمیماتی نظیر تعیین مکان‌های استقرار هاب‌ها ، تعیین تعداد مراکز هاب و نیز تعیین ظرفیت مراکز هاب از جمله تصمیمات راهبردی است. هم‌زمان اتخاذ تصمیماتی نظیر تعیین تعداد کامیون‌های حمل پسماند ها از جمله تصمیمات تاکتیکی مدل خواهد بود و سرانجام در مدل این تحقیق، تصمیم‌گیری در مورد میزان بازیافت و امحای پسماندها و نیز تصمیم‌گیری در مورد میزان حمل پسماندها بین مراکز مختلف ، از جمله تصمیمات تاکتیکی مدل خواهند بود.

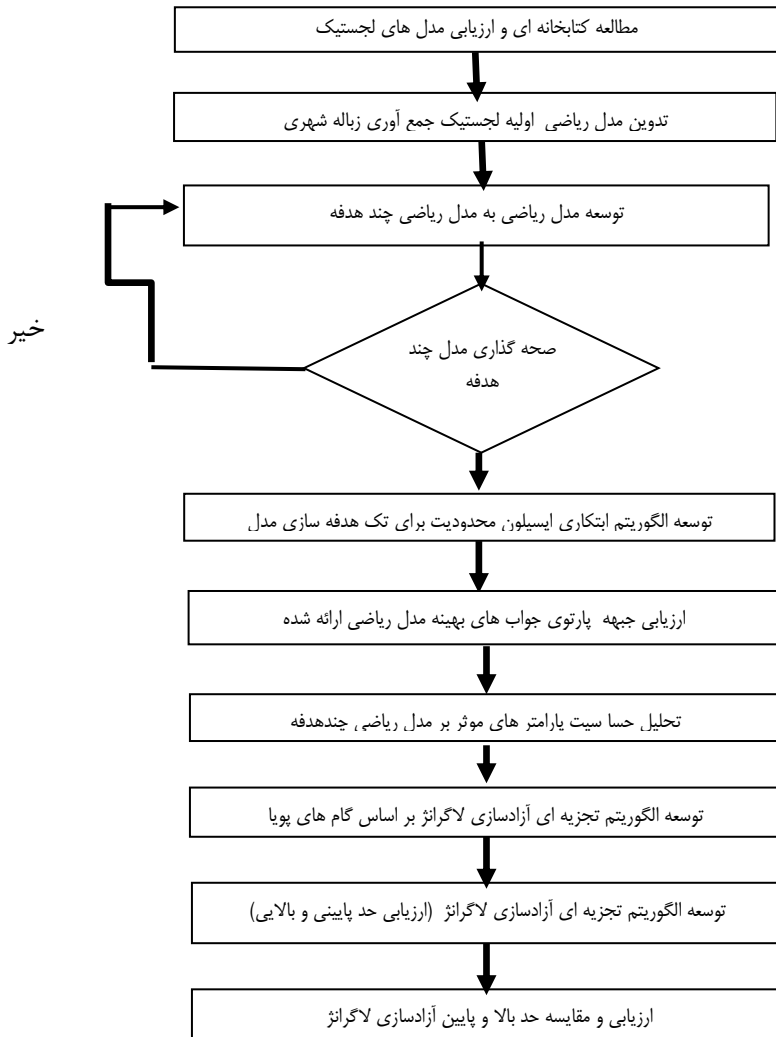
با توجه به مرور ادبیات و مطالعاتی که انجام گرفته‌است، پژوهشی مشاهده نشده‌است که از روش دقیق آزادسازی لاگرانژ در مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین جمع‌آوری و بازیافت پسماند شهری، استفاده کرده‌باشد. مزیت روش آزادسازی لاگرانژ این است که قادر به تولید جواب‌های دقیق برای مسائل می‌باشد، این در حالی است که روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری دیگر تضمینی به ارائه جواب بهینه ندارند و معمولاً جواب این دسته از روش‌ها جوابی نزدیک به جواب بهینه است. بنابراین در این مقاله از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مسئله بیان شده استفاده خواهدشد.

علاوه بر این، در این مقاله به منظور در نظر گرفتن نوسانات ناشی از پارامتر میزان پسماند تولید شده در هر دوره زمانی، پارامتر میزان پسماند به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است و از روش بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای برای مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده شده است.

در مطالعات پیشین انجام شده، به روش‌های حل دقیق مسائل توجه نشده است؛ بنابراین در مقاله از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مسئله بیان شده استفاده خواهد شد. با توجه به مرور ادبیات و مطالعاتی که انجام گرفته است، پژوهشی مشاهده نشده است که از روش دقیق آزادسازی لاگرانژ در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین جمع‌آوری و یازافت پسماند شهری استفاده کرده باشد. مزیت استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ اینست که قادر به تولید جواب‌های دقیق برای مسائل می‌باشد، این در حالی است که روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری دیگر، تضمینی به ارائه جواب بهینه ندارند و معمولاً جواب این دسته از روش‌ها، جوابی نزدیک به جواب بهینه است. بنابراین در این مقاله از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مسئله بیان شده استفاده خواهد شد.

همچنین در این مقاله انواع بیشتری از پسماندها نسبت به مطالعات دیگر در نظر گرفته شده است (در این مدل هفت نوع پسماند تفکیک شده در نظر گرفته شده است که با توجه به شماره اندیس نوع پسماند (۱) شامل (۱) پسماند بیمارستانی (۲) پسماند شیشه‌ای (۳) پسماند فلزی (۴) پسماند چوبی (۵) پسماند تر (۶) پسماند پلاستیکی و (۷) پسماند کاغذی و مقوا می‌باشد.

یکی از روش‌های بیان دیدگاه‌ها و روش‌های به‌کار گرفته شده پژوهشگر در انجام یک تحقیق، ارائه مدل پیاز پژوهش تحقق مورد نظر است. پیاز پژوهش مدل درحقیقت، لایه‌هایی است که اجزای ساختار تحقیق، فلسفه و نوع روش‌های به‌کار گرفته شده در مراحل یا فرآیندهای انجام تحقیق را نشان می‌دهد. در واقع می‌توان گفت پیاز پژوهش ضمن آنکه لایه‌های مختلف پژوهش را معرفی می‌کند، لایه‌های تأثیر پذیر از لایه‌های بالاتر را نیز معین می‌کند.



شکل ۲ : گام های پژوهش
Figure 1: research steps

هدف مدل پیشنهادی یافتن مقدار بهینه پسماند توزیع شده در میان تمام سطوح زنجیره تأمین و مقدار و نوع محصولات تولیدی توزیع شده به مشتریان نهایی، علاوه بر به حداکثر رساندن سود خالص کل شبکه زنجیره تأمین با توجه به محدودیت‌های حمل و نقل، ذخیره سازی و ظرفیت تولید تحمیل شده توسط مراکز جداسازی، کارخانه‌ها و مراکز توزیع می‌باشد.

ابزار و روش

در سال‌های اخیر مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی که عملکرد سیستم‌های مدیریت پسماند را از طریق بهینه‌سازی مکان تأسیسات و نیز تخصیص تسهیلات به یکدیگر بهبود می‌دهند توسعه یافته‌اند. در مدل‌های توسعه یافته، مدیریت پسماندهای شهری از جنبه‌های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این مقاله از دو روش آزاد سازی لاگرانژ و اسپیلون محدودیت برای حل مدل استفاده می‌شود؛ آزادسازی لاگرانژ یک روش شناخته شده برای حل مسائل بهینه سازی در مقیاس بزرگ است. در این روش از ساختار اصلی مسائل، برای به دست آوردن حد پایین مقدار بهینه تابع هدف استفاده می‌شود. در روش آزاد سازی لاگرانژ، یک یا چند محدودیت سخت به تابع هدف منتقل می‌شود. این کار در اصطلاح، آزاد کردن محدودیت‌ها نامیده می‌شود (منظور از محدودیت سخت، محدودیتی است که حل مسئله را دشوار می‌کند. محدودیت‌های سخت معمولاً دارای متغیرهای باینری یا عدد صحیح هستند).

مسئله آزاد شده، با استفاده از الگوریتم ساب‌گرادیانت حل می‌شود تا حد پایین مناسبی برای جواب بهینه مسئله به دست آید. (ال مارشال، ۲۰۰۱) یکی از روش‌های دقیق دیگر برای حل مسائل دارای چند تابع هدف و به دست آوردن جواب‌های پارتوی بهینه، استفاده از روش محدودیت اسپیلون است. در این روش یکی از توابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌کنیم و مابقی توابع هدف را محدودیت محسوب می‌کنیم. به این منظور باید برای توابع هدفی که به محدودیت‌ها منتقل شوند حدود قابل قبولی را انتخاب کرد.

این تحقیق با توجه به اهداف خود، به دنبال توسعه مدل ریاضی با توابع هدف اقتصادی و اجتماعی است. حبیبی و همکاران (۲۰۱۷) و محمدی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود مدل ریاضی برای طراحی شبکه جمع‌آوری پسماند را توسعه داده‌اند، که به عنوان مدل پایه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

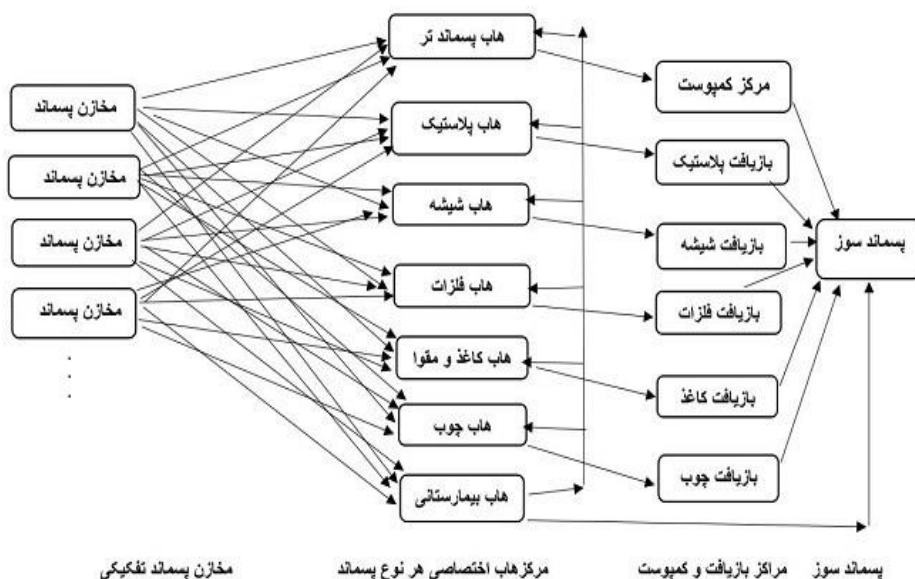
این مسئله دارای دو تابع هدف اقتصادی و اجتماعی می‌باشد که اهداف آن به ترتیب کاهش هزینه کلی سیستم و افزایش میزان بازیافت می‌باشد؛ در تابع هدف اقتصادی این مسئله سعی می‌شود

که هزینه‌های شبکه زنجیره‌تأمین ارائه شده بهینه گردد. به بیان دیگر با استفاده از این تابع هدف، هزینه خرید تسهیلات مانند سطل زباله و خودرو جمع‌آوری پسماند، هزینه تأسیس مراکز بازیافت، هزینه تأسیس مراکز انتقال، هزینه عملیاتی بازیافت و امحای پسماندها و همچنین هزینه حمل و نقل پسماندها بین سطوح زنجیره‌تأمین کمینه می‌شود. علاوه بر این با توجه به گسترش نگرانی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی در مورد دفع نامناسب پسماندهای شهری، با توسعه مراکز بازیافت می‌توان این نگرانی‌ها را کاهش داد. بنابراین این پژوهش با استفاده از یک تابع هدف در حوزه اجتماعی به دنبال کاهش دفع و امحای غیراصولی پسماندهای شهری می‌باشد. در واقع این تابع هدف میزان پسماندهای بازیافت شده را بیشینه می‌کند.

برای بیان روش مدل‌سازی مسئله، ابتدا مفروضات و سپس متغیرها، پارامترها، مدل عدد صحیح مختلط دوهدفه و در ادامه اهداف مسئله و نشانه‌گذاری‌ها ارائه می‌گردند.

- در این مدل هفت نوع پسماند تفکیک شده در نظر گرفته شده‌است که با توجه به شماره اندیس نوع پسماند (۱ شامل ۱) پسماند بیمارستانی (۲) پسماند شیشه‌ای (۳) پسماند فلزی (۴) پسماند چوبی (۵) پسماند تر (۶) پسماند پلاستیکی و (۷) پسماند کاغذی و مقوا می‌باشد.
- در این مسئله مدل‌سازی تأسیسات جمع‌آوری، مراکز انتقال (هاب تفکیکی)، مراکز دفن و پسماندسوزی و مراکز بازیافت در نظر گرفته شده‌است. جریان مواد تنها می‌تواند بین دو سطح متوالی از لایه‌های شبکه مورد نظر برقرار باشد.
- مراکز جمع‌آوری پسماند شامل مخازن پسماند در بیمارستان‌ها و نیز مراکز اسکان جمعیت شهری است.
- مقدار پسماندهای تولیدی در هر منطقه شهری و یا هر بیمارستان به صورت غیر قطعی است.
- هر منطقه شهری و بیمارستان می‌تواند با یک یا چند مرکز انتقال تخصصی هاب تفکیکی در ارتباط باشد.
- پسماند تفکیک شده از مناطق مسکونی و تجاری شهری و بیمارستان‌ها به مراکز هاب یا انتقال مخصوص هر پسماند منتقل و پس از تفکیک نهایی به منظور بازیافت یا امحا به مراکز بازیافت یا امحا منتقل می‌شوند.
- تعداد و مکان جمع‌آوری پسماندهای شهری و بیمارستان‌ها، مکان‌های کاندید مراکز هاب یا انتقال پسماند ها و نیز مراکز بازیافت و امحا مشخص است ولی ظرفیت آن‌ها را مدل بر اساس ظرفیت جمعیتی هر منطقه مسکونی یا منطقه شهرداری تعیین می‌کند.

- مسئله بصورت بالانس شده در نظر گرفته می شود؛ یعنی مجموع پسماندهای تفکیکی جمع آوری شده و ارسالی به مراکز هاب با مجموع پسماندهای تفکیک شده ارسالی از مراکز هاب یا انتقال به مراکز بازیافت و پسماندسوزی برابر است.
- پسماندهای شهری به صورت چند کالایی می باشد (شامل پسماندهای تر، پلاستیک ، شیشه ، فلزات ، کاغذ و مقوا و ...). همچنین مسئله مورد مطالعه چند دوره ای است.
- فواصل مراکز بالقوه یا کاندید هاب یا مراکز انتقال، فواصل مراکز پسماندسوزی ، فواصل مراکز بازیافت و نیز مسیرهای حمل پسماند های تفکیکی درون هر منطقه شهرداری و همچنین فواصل مراکز انتقال یا هاب های کاندید به طرف مراکز پسماندسوزی یا دفن و امحا پسماندها مشخص است.
- هزینه ثابت و عملیاتی هر کدام از مراکز هاب ، پسماند سوزی ، امحا ، کمپوست و نیز هزینه های حمل و نقل به ازای حمل یک واحد پسماند و همچنین نحوه و میزان استقرار جمعیت در هر یک از مناطق شهرداری و نیز میزان جمعیت مناطق تجمع یافته شهرداری مشخص می باشند.



شکل ۳: ارتباط لایه های مدل در شبکه مدیریت پسماندهای شهری

Figure 1: Urban waste management network model

در این پژوهش، هدف ساخت مدل عبارت است از: به حداقل رساندن هزینه‌های جمع‌آوری، تفکیک، حمل و بازیافت پسماندهای شهری به همراه به حداکثر رساندن مقادیر بازیافت محصولات از انواع پسماند شهری.

شبکه زنجیره تأمین که هدف این پژوهش به حداقل رساندن هزینه‌های آن است دارای لایه-های ذیل است:

- مخازن پسماند تفکیکی شهری و نیز مخازن پسماند بیمارستانی در هر منطقه شهرداری
 - مراکز انتقال یا مراکز هاب مستقر در هر منطقه شهرداری
 - مراکز بازیافت پسماندهای تفکیکی شهری
 - مراکز امحا (دفن یا سوزاندن) پسماند
- مسئله این پژوهش به صورت چندهدفه است؛ اولین تابع هدف مدل، مجموع هزینه‌های کلیه فعالیت‌های جمع‌آوری، حمل، بازیافت، کمپوست، سوزاندن و امحا پسماندها را حداقل می‌کند و شامل هزینه‌های ذیل است:
- هزینه ساخت و نصب مخازن پسماندهای تفکیکی برای جمع‌آوری و تفکیک همزمان پسماند در مبدأ
 - هزینه خرید کامیون‌های جمع‌آوری پسماند و نیز هزینه خرید کامیون‌های بزرگ حمل پسماند از مراکز هاب یا انتقال به مراکز بازیافت
 - هزینه ساخت و راه‌اندازی مراکز هاب یا انتقال
 - هزینه ساخت و راه‌اندازی مراکز بازیافت
 - هزینه ساخت یا خرید پسماندسوزها
 - هزینه نیروی انسانی (شامل هزینه نیروی انسانی در بخش‌های حمل و راننده‌ها، جمع‌آوری پسماندها، کارگری مراکز هاب یا انتقال، کارگری مراکز بازیافت و کارگری مراکز امحا یا کمپوست)
 - هزینه سوخت مصرفی در مسیر جمع‌آوری پسماند‌ها و نیز حمل پسماندهای تفکیکی به مراکز بازیافت پسماند‌ها به ازای هر واحد پسماند
 - هزینه‌های عملیاتی در مراکز مختلف (شامل هزینه انرژی یا سوخت مصرفی برای بازیافت، تفکیک و سوزاندن یک واحد پسماند)
- رویکرد دومین تابع هدف مدل، کاهش اثرات تخریبی ناشی از دفن و سوزاندن انواع پسماندهای شهری در محیط زیست است؛ این تابع هدف به منظور اجرای مسئولیت اجتماعی

شهروندان ، مقادیر محصولات بازیافت شده از انواع پسماندهای شهری را به حداکثر می‌رساند، تا علاوه بر ایجاد منافع اقتصادی ، از آلودگی زیست محیطی نیز جلوگیری شود.

با توجه به اینکه در شرایط واقعی ، مقادیر تولید پسماند به ازای هر فرد در زمان‌های مختلف یکسان نیست، بنابراین برای اینکه مدل نتایج مناسب و مطابق با واقعیت ارائه نماید لازم است تا نواسانات مقادیر تولید پسماند به ازای هر فرد در مدل لحاظ گردد. بنابراین با استفاده از " روش برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای " که یکی از روش‌های مرسوم مدل‌سازی در شرایط عدم قطعیت است ، موضوع عدم قطعیت میزان پسماند تولیدی هر شهروند را در مدل لحاظ می‌کنیم .

در روش برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل کردن پارامتر دارای عدم قطعیت، رخدادهای گوناگون را که ممکن است در شرایط واقعی به وقوع بپیوندد به صورت " سناریوهای گسسته " در نظر می‌گیرند. در این روش فرض بر این است که اطلاعات تاریخی کافی برای محاسبه احتمالات وقوع هر یک از سناریوها وجود دارد.

منظور از دو مرحله‌ای بودن روش برنامه‌ریزی تصادفی این است که در مرحله اول تصمیم‌گیری، متغیرهای راهبردی مسئله (تعداد مراکز هاب برای تأسیس ، تعداد کامیون های متوسط و بزرگ مورد نیاز، تعداد مراکز بازیافت و تعداد مرکز پسماندسوزی مورد نیاز) مستقل از پارامتر عدم قطعیت تعیین می‌شوند و در مرحله دوم ، باقیمانده متغیرهای مسئله (متغیر های تصمیم عملیاتی) با رویکرد امید ریاضی و با توجه به مقدار پارامتر غیرقطعی محاسبه می‌شوند. در این مسئله سرانه تولید پسماند هر شهروند ، به‌عنوان پارامتر غیرقطعی لحاظ شده است . این تحقیق با توجه به اهداف خود ، به دنبال توسعه مدل ریاضی با توابع هدف اقتصادی و اجتماعی است. حبیبی و همکاران (۲۰۱۷) و محمدی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود مدل ریاضی برای طراحی شبکه جمع‌آوری پسماند را توسعه داده‌اند، که به‌عنوان مدل پایه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌است. در ادامه علائم، متغیرهای تصمیم و نیز پارامترهای مسئله معرفی می‌شوند و سپس مدل مسئله ارائه می‌گردد.

اندیس

i	اندیس مربوط به نوع پسماند
j	اندیس مربوط به مناطق جمع‌آوری پسماند
k	اندیس مربوط به مکان کاندید هاب یا مرکز انتقال
t	اندیس مربوط به دوره های زمانی
m	اندیس مربوط به نوع کامیون حمل پسماند

s	اندیس مربوط به سناریو
پارامترها	
W_{ijts}	میزان پسماند نوع i تولید شده در ناحیه j در دوره زمانی t در سناریو S
CH_i	ظرفیت هاب‌های تفکیکی نوع i
CW_i	ظرفیت مخازن پسماند تفکیکی نوع i
CV_m	ظرفیت کامیون حمل پسماند
FCH_{ik}	هزینه ثابت تأسیس هاب تفکیکی نوع i در مکان k
VCH_{ik}	هزینه متغیر سرمایه‌گذاری تأسیس هاب تفکیکی نوع i در مکان k به ازای هر تن ظرفیت
FCW	هزینه ثابت خرید مخازن پسماند تفکیکی به ازای هر تن ظرفیت
VCR	هزینه متغیر سرمایه‌گذاری ایجاد مرکز بازیافت به ازای هر تن ظرفیت
VCL	هزینه متغیر سرمایه‌گذاری تأسیس مرکز پسماندسوزی به ازای هر تن ظرفیت
FCV_m	هزینه ثابت خرید کامیون حمل پسماند نوع m
OCH	هزینه عملیاتی در هاب‌ها
OCR	هزینه عملیاتی در مراکز بازیافت
OCL	هزینه عملیاتی در مراکز پسماندسوزی
TC	هزینه حمل و نقل (به ازای هر کیلومتر)
EC_i	هزینه کارگری برای جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پسماند نوع i
Pop_j	جمعیت ناحیه j
d_{jk}	فاصله ناحیه j تا هاب تفکیکی k
γ_i	ضریب تبدیل برای بازیافت
λ_i	ضریب تفکیک پسماند بیمارستانی
δ_i	
$\alpha 1_{ik}$	پارامتر نشانگر: در صورتی یک می‌شود که بتوان پسماند i را به هاب k ارسال کرد
$\alpha 2_{jk}$	پارامتر نشانگر: در صورتی یک می‌شود که بتوان پسماند ناحیه j را به هاب k ارسال کرد
M	عدد بزرگ

متغیرهای تصمیم

x_{ijkts}	میزان پسماند نوع i ارسال شده از ناحیه j به هاب k در دوره t در سناریو S
y_{ikts}	مقدار پسماند i ارسال شده از هاب تفکیکی k به مراکز بازیافت (برای پسماند بیمارستانی): مقدار پسماند ارسال شده از هاب تفکیکی به مرکز پسماندسوزی (در سناریو S)
$g_{ik'k'ts}$	مقدار پسماند نوع i که از هاب بیمارستانی k (بعد از تفکیک اولیه) به هاب تخصصی k' مربوط به پسماند i در سناریو S ارسال می‌شود.
y'_{ikts}	مقدار کالا بازیافتی تولید شده از پسماند نوع i در زمان t در سناریو S

L_{ikts}	مقدار پسماند نوع i که از هاب k مستقیماً به مراکز پسماندسوزی در سناریو S ارسال می‌شود.
g_{ikts}	میزان پسماند نوع i که از هاب k به مرکز بازیافت در سناریو S ارسال شده ولی قابل بازیافت نبوده‌است.
NW_i	تعداد مخزن پسماند نوع i
NV_i^m	تعداد کامیون حمل پسماند نوع m
$CapH_i^k$	ظرفیت هاب مخصوص پسماند نوع i در منطقه کاندید k
CR_i	ظرفیت مرکز بازیافت پسماند نوع i
CL	ظرفیت مرکز پسماندسوزی
Z_{ik}	متغیر صفر و یک، اگر هاب تخصصی پسماند i در ناحیه k تاسیس شود یک است در غیر این صورت صفر می‌شود.

پس از بیان علائم ریاضی، در این قسمت مدل ریاضی شرح داده خواهد شد؛ عبارت شماره یک تابع هدف اول را بیان می‌کند که شامل هزینه ساخت تأسیسات، و امید ریاضی هزینه‌های مرحله دوم به ازای سناریوهای پارامتر غیرقطعی یعنی هزینه عملیاتی و هزینه حمل و نقل می‌باشد. هر کدام از این قسمت‌ها به ترتیب در عبارت ۲ تا ۴ بیان شده‌اند.

(۱)

$$Min F1 = FC + E_s[OC_s + TrC_s]$$

(۲)

$$FC = \sum_i \sum_k (FCH_{ik} Z_{ik} + VCH_{ik} CapH_i^k) + VCL * CL$$

$$+ \sum_i VCR_i CR_i$$

$$+ \sum_i \sum_m FCV_m * NV_i^m + \sum_i FCW * NW_i$$

قسمت اول عبارت ۲ هزینه‌های ساخت مراکز هاب یا انتقال تخصصی برای پسماندهای تفکیک شده را محاسبه می‌کند. قسمت دوم و سوم این عبارت به ترتیب هزینه ساخت مراکز بازیافت و پسماندسوزی را بر حسب تعداد هر یک از مراکز محاسبه می‌کند.

دو عبارت پایانی نیز هزینه خرید مخازن پسماند تفکیکی و کامیونهای حمل بار را مشخص می‌کند. هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه نیروی انسانی، هزینه تفکیک، بازیافت یا امحای پسماند در مراکز مختلف می‌باشد که در عبارت ۲ بیان شده‌اند.

عبارت ۲ در قسمت اول هزینه‌های نیروی انسانی در مرحله جمع‌آوری و تفکیک در مراکز هاب یا انتقال را محاسبه می‌کند. قسمت دوم این عبارت هزینه عملیاتی مربوط به مراکز بازیافت را محاسبه می‌کند و دو عبارت پایانی مربوط به هزینه عملیاتی در مراکز پسماندسوزی است.

(۳)

$$OC_s = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t OCH * X_{ijkts} + \sum_{i \neq 1} \sum_k \sum_t OCR * y'_{ikts} \\ + \sum_k \sum_t OCL * y_{1kts} + \sum_i \sum_k \sum_t (L_{ikts} + g'_{ikts}) * OCL$$

عبارت ۳ در قسمت هزینه، هزینه حمل و نقل و کارگری در مرحله جمع‌آوری پسماندها، انتقال از مراکز بیمارستانی به هاب‌های دیگر، انتقال از مراکز هاب به مراکز بازیافت و امحا و همچنین شامل هزینه انتقال از مراکز بازیافت به مراکز امحا می‌باشد.

$$TrC_s = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t (TC * d_{jk} + EC_i) X_{ijkts} \\ + \sum_i \sum_k \sum_{k'} \sum_t (TC * d_{kk'} + EC_i) g_{ikk'ts} \\ + \sum_i \sum_k \sum_t (TC * d_{kl} + EC_i) L_{ikts} \\ + \sum_i \sum_k \sum_t (TC * d_{il} + EC_i) g'_{ikts}$$

(۴)

$$Max F2 = \mathbb{E}_s \left[\sum_i \sum_k \sum_t y'_{ikts} \right] \quad (5)$$

در تابع هدف دوم به دنبال حداکثرسازی امیدریاضی کالا بازیافتی به ازای تمام سناریوها هستیم که برای مدل سازی این هدف از عبارت شماره ۵ استفاده می کنیم. در مورد محدودیت های مسئله در روش بهینه سازی تصادفی دومرحله ای باید به این نکته اشاره کرد، که به ازای هر سناریو، دسته محدودیت مختص همان سناریو وجود دارد.

$$s. t: \sum_j x_{ijks} \leq CapH_i^k \quad \forall i, k, t, s \quad (6)$$

$$CapH_i^k \leq CH_i Z_{ik} \quad \forall i, k, t \quad (7)$$

عبارات ۶ و ۷ تضمین می کند که در صورتی می توان پسماندهای نوع i را به یک مرکز هاب یا انتقال ارسال کرد که مرکز هاب تخصصی پسماند نوع i در محل کاندید کتاسیس شده باشد و همچنین مجموع ورودی هر هاب کاندید نباید حداکثر ظرفیت هاب کاندید را نقض کند. این نکته قابل توجه است که در هر نقطه کاندید k نمی توان هاب تخصصی مربوط به پسماند i را تأسیس کرد. به عبارت دیگر هر نقطه کاندید هاب تخصصی، ویژه پسماند نوع i مشخصی است. به منظور بیان این موضوع از پارامتر باینری کمک گرفته ایم. اگر مقدار این پارامتر یک باشد به این معنی است که در نقطه k می توان هاب تخصصی پسماند i را ایجاد کرد و اگر صفر باشد، اجازه تأسیس ندارد.

$$Z_{ik} \leq a1_{ik} \quad \forall i, k \quad (8)$$

$$x_{ijks} \leq w_{ijts} a2_{jk} \quad \forall i, j, k, t, s \quad (9)$$

با استفاده از عبارت ۸ این موضوع را به شکل ریاضی مدل کرده ایم. همچنین این نکته قابل توجه است که نمی توان پسماندهای هر ناحیه شهری را به هر نقطه کاندید مرکز هاب یا انتقال ارسال کرد. به این منظور عبارت ۹ را به مدل اضافه نمودیم تا تخصیص هر ناحیه شهری به هاب تخصصی مجاز آن ناحیه را مدل سازی کنیم. در هر مرکز هاب یا انتقال پس از تفکیک نهایی، پسماندها یا به مراکز بازیافت ارسال می شوند یا اینکه به مراکز امحا فرستاده می شوند.

$$y_{ikts} + L_{ikts} = \sum_j x_{ijkts} + \sum_k g_{ik'kts} \quad \forall i, k, t, i \neq 1, s \quad (10)$$

عبارت ۱۰ تعادل بین ورودی و خروجی در یک مرکز هاب یا انتقال تخصصی را مشخص می‌کند. ورودی‌های هر هاب شامل پسماند نوع i هستند که از ناحیه‌های شهری یا مراکز بیمارستانی جمع‌آوری شده‌اند. این عبارت برای پسماندهای بیمارستانی که با اندیس $i = 1$ مشخص نموده‌ایم، متفاوت می‌باشد که در ادامه درباره آن بحث می‌شود.

در مراکز هاب بیمارستانی پسماندهای شیشه، پلاستیک، کاغذ و... پس از تفکیک به مراکز هاب تخصصی مربوط به هر پسماند ارسال می‌شوند و مابقی پسماند غیرقابل تفکیک به مرکز پسماندسوزی ارسال می‌شوند.

λ_i درصد پسماندها نوع i موجود در پسماندهای بیمارستانی را مشخص می‌کند که $\sum_i \lambda_i = 1$ می‌باشد. همچنین λ_1 درصد پسماندهای غیرقابل تفکیک را بیان می‌کند.

$$y_{1kts} = \lambda_1 \sum_j x_{1jkts} \quad \forall k, t, s \quad (11)$$

$$\sum_k g_{ik'kts} = \lambda_i \sum_j x_{1jkts} \quad \forall i, k, t, s, i \neq 1 \quad (12)$$

$$g_{ik'kts} \leq M * Z_{ik'} \quad \forall i, k, k', s, t, \neq 1 \quad (13)$$

عبارت ۱۱ میزان پسماندهایی را که به مرکز امحا ارسال می‌شوند مشخص می‌کند و عبارت ۱۲ میزان پسماند نوع i را که به هاب تخصصی آن پسماند ارسال می‌شود تعیین می‌کند که این ارسال به شرطی انجام می‌شود که هاب تخصصی مربوط به پسماند i تأسیس شده باشد. این نکته در عبارت ۱۳ مشخص شده‌است.

$$\sum_k y'_{ikts} \leq CR_i \quad \forall i, t, s \quad (14)$$

$$y'_{ikts} = \gamma_i y_{ikts} \quad \forall i, k, t, s, i \neq 1 \quad (15)$$

حداکثر میزان پسماند تفکیک شده باید کمتر از ظرفیت مرکز بازیافت باشد. این موضوع با استفاده از رابطه ۱۴ تضمین می‌شود. به بیان دیگر این محدودیت تعیین کننده ظرفیت بازیافت هر مرکز بازیافت می‌باشد. همچنین میزان بازیافت هر پسماند توسط رابطه ۱۵ به دست می‌آید، که در آن γ_i ضریب بازیافت مربوط به هر پسماند می‌باشد. همانطور که بیان شد، پسماندهای بیمارستانی مستقیم به مراکز بازیافت ارسال نمی‌شوند، بلکه پس از تفکیک به مراکز هاب تخصصی پسماند یا مراکز زباله سوزی ارسال می‌شوند. بنابراین رابطه ۱۵ برای این نوع پسماند برقرار نمی‌باشد. با توجه به این نکته در این محدودیت اندیس مربوط به نوع پسماند نباید برابر با ۱ باشد ($i \neq 1$)، که نشانگر پسماند بیمارستانی است.

$$y_{ikts} - y'_{ikts} = g'_{ikts} \quad \forall i, k, t, s, i \neq 1 \quad (16)$$

$$\sum_k x_{ijkts} = w_{ijts} \quad \forall i, j, t, s \quad (17)$$

پس از اجرای عملیات بازیافت، پسماندهای غیرقابل بازیافت از مراکز بازیافت جمع‌آوری می‌شوند و به مراکز امحا ارسال می‌شوند، این میزان در محدودیت ۱۶ محاسبه شده‌است. با توجه به زنجیره تأمین مسئله که مربوط به پسماندهای شهری و بیمارستانی است، این نکته بدیهی است که تمام پسماند تولیدی باید جمع‌آوری شود که در عبارت ۱۷ تضمین می‌شود.

$$\sum_k z_{ik} \leq 1 \quad \forall i \leq 4 \quad (18)$$

با توجه به حجم تولید پسماندهای بیمارستانی و نیز حجم تولید پسماندهای شیشه، فلز و چوب که اندیس آنها به ترتیب یک، ۲، ۳ و ۴ می‌باشد، حداکثر تعداد هاب تخصصی مورد نیاز برای آنها برابر یک است که در محدودیت ۱۸ این موضوع در نظر گرفته شده‌است، لذا این محدودیت تنها برای اندیس‌های i از ۱ تا ۴ برقرار می‌باشد.

$$\sum_j \sum_k x_{ijkts} \leq CW_i NW_i \quad \forall i, t, s \quad (19)$$

$$\sum_j \sum_k x_{ijkts} + \sum_k g'_{ikts} \leq CV_1 * NV_i^1 \quad \forall t, i, s \quad (20)$$

$$\sum_k (y_{ikts} + L_{ikts}) + \sum_k \sum_k g_{ikk'ts} \leq CV_2 * NV_i^2 \quad \forall t, i, s \quad (21)$$

$$\sum_k y_{ikts} + \sum_i \sum_k g'_{ikts} + \sum_i \sum_k L_{ikts} \leq CL \quad \forall t, s \quad (22)$$

عبارت‌های ۱۹ تا ۲۲ برای محاسبه تعداد مخازن پسماند تفکیکی، کامیون حمل پسماند و ظرفیت مراکز پسماند سوزی استفاده شده‌اند. عبارت ۱۹ برای محاسبه تعداد مخزن پسماند تفکیکی استفاده شده است. عبارت ۲۰ برای محاسبه تعداد کامیون‌های جمع‌آوری و حمل پسماند به هاب‌ها استفاده می‌شود و عبارت ۲۱ برای حمل پسماند بین هاب تا مراکز بازیافت و امحا استفاده می‌شود. این عبارات تضمین می‌کند که کامیون کافی و لازم برای حمل تمام پسماندها تأمین شود. عبارت ۲۲ تضمین می‌کند که ظرفیت مراکز امحا پسماند ها، پاسخ‌گوی تمام حجم پسماندهای تولیدی غیرقابل تفکیک می‌باشد.

یکی از روش‌های دقیق برای مقابله کردن با مسائل دارای چند تابع هدف و به دست آوردن جواب‌های پارتوی بهینه استفاده از روش محدودیت اپسیلون است؛ در این روش به این صورت عمل می‌کنیم که یک تابع هدف را به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌کنیم و مابقی توابع هدف را به محدودیت‌ها انتقال می‌دهیم. به این منظور باید برای توابع هدفی که به محدودیت‌ها منتقل شوند حدود قابل قبولی را انتخاب کرد. نمایش کلی مدل‌سازی به روش اپسیلون محدودیت برای یک مسئله چندهدفه با توابع هدف کمینه‌سازی به صورت رابطه ۲۳ می‌باشد. (ماوروتاس، ۲۰۰۹)

(۲۳)

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(x) \\ & \text{subject to: } f_2(x) \leq \varepsilon_1, f_3(x) \leq \varepsilon_2, \dots, f_n(x) \leq \varepsilon_n, x \\ & \in \text{Feasible} \end{aligned}$$

در رابطه فوق محدودیت‌های اپسیلون برای یک مسئله بیشینه‌سازی به صورت بزرگ‌تر مساوی می‌باشد. برای به دست آوردن جواب‌های پارتو مختلف باید سمت راست این محدودیت‌ها یعنی ε را تغییر داد.

برای تبدیل مسئله این تحقیق به مسئله‌ای تک‌هدفه، تابع هدف مربوط به حداکثرسازی مقدار محصولات بازیافتی را به محدودیت‌ها انتقال می‌دهیم. این محدودیت به صورت رابطه ۲۴ بیان شده

است. با این توضیحات تابع هدف اول مسئله که مربوط به کمینه سازی هزینه‌ها می‌باشد به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود.

$$\sum_i \sum_k \sum_t y'_{ikt} \geq \varepsilon_2 \quad (24)$$

یکی از مشکلات عمده روش اپسیلون محدودیت درحجم بالای محاسبات است؛ چرا که برای هرکدام از توابع هدف تبدیل شده به محدودیت، باید چندین مقدار مختلف از مقادیر ε امتحان شود. در روش اپسیلون، در صورتی که تابع هدف منتقل شده به محدودیت دارای بازه‌ای پیوسته باشد، حجم محاسبات بسیار افزایش خواهد یافت. یکی از مرسوم‌ترین رویکردهای اجرای روش اپسیلون محدودیت این است که ابتدا بیشینه و کمینه تمامی توابع هدف را بدون در نظر گرفتن سایر توابع هدف و در فضای شدنی مسئله به دست می‌آورند. سپس به کمک مقادیر به دست آمده از مرحله قبل، بازه تغییر هر یک از توابع هدف را بدست می‌آورند. اگر مقادیر بیشینه و کمینه توابع هدف را به ترتیب با f_p^{min} و f_p^{max} بنامیم، آنگاه بازه تغییر هر یک از آن‌ها به صورت عبارت ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$r_p = f_p^{max} - f_p^{min} \quad (25)$$

پس از محاسبه بازه تغییر برای هر تابع هدف، بازه تغییر آن یعنی r_p به q_p بازه تقسیم می‌شود. سپس برای ε_p در رابطه زیر می‌توان به تعداد $q_p + 1$ مقدار مختلف که از فرمول ۲۶ محاسبه می‌شوند، به دست آورد.

(۲۶)

$$\varepsilon_p^k = f_p^{max} - \frac{r_p}{q_p} \times F \quad F = 0, 1, \dots, q_p$$

در رابطه فوق F شماره نقطه جدید مربوط به ε_p را نشان می‌دهد. به کمک روش اپسیلون محدودیت مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فوق را می‌توان به $\prod_{p=2}^n q_p + 1$ تعداد زیرمسئله بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل کرد. هر زیر مسئله دارای فضای جواب شدنی است. با توجه به اینکه

توسط نامساوی‌های مرتبط با توابع هدف f_2, \dots, f_p محدودتر نیز خواهد شد. هر زیر مسئله منجر به یک جواب پارتو برای مسئله بهینه‌سازی چندهدفه موردنظر می‌شود. همچنین ممکن است به ازای برخی از \mathcal{E} ها برخی از زیر مسائل فضای غیرشدنی ایجاد کنند. (ماوروتاس، ۲۰۰۹). نهایتاً پس از به دست آمدن جبهه پارتوی بهینه، تصمیم‌گیرنده می‌تواند با نظر خود مناسب‌ترین جواب را انتخاب کند.

روش حل مدل

آزادسازی لاگرانژ یک روش شناخته‌شده برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی در مقیاس بزرگ است. در این روش از ساختار اصلی مسائل، برای به دست آوردن حد پایین مقدار بهینه تابع هدف استفاده می‌شود. در روش آزادسازی لاگرانژ، یک یا چند محدودیت سخت به تابع هدف منتقل می‌شود (این کار در اصطلاح، آزاد کردن محدودیت‌ها نامیده می‌شود). سپس مسئله آزاد شده، با استفاده از الگوریتم ساب‌گرادیانت حل می‌شود تا حد پایین مناسبی برای جواب بهینه مسئله به دست آید. (ال مارشال، ۲۰۰۱). منظور از محدودیت‌های سخت، محدودیتی است که حل مسئله را دشوار می‌کند. محدودیت‌های سخت، معمولاً دارای متغیرهای باینری یا عدد صحیح هستند. در این پژوهش، محدودیت شماره ۱۳ با توجه به وجود متغیرهای عدد صحیح در آن، به تابع هدف انتقال یافته‌است و مطابق مراحل روش آزادسازی لاگرانژ، در ضریب لاگرانژ نیز ضرب شده است. بنابراین تابع هدف مسئله که در عبارت ۴۹ بیان شده‌است به صورت ذیل درمی‌آید:

$$\begin{aligned} \text{Min } F1 = & FC + \mathbb{E}_s[OC_s + TrC_s] \\ & + \mathbb{E}_s[u_{ikk'ts}(g_{ikk'ts} - M * Z_{ik}')] \end{aligned} \quad (27)$$

در عبارت شماره ۲۷ $u_{ikk'ts}$ ضریب لاگرانژ نام دارد که در صورت نقض شدن محدودیت منتقل شده به تابع هدف، این ضریب عدد خواهد گرفت. ذکر این نکته مهم است که محدودیت منتقل شده به تابع هدف دیگر نباید جزء محدودیت‌های مسئله قرار گیرد. حل این مدل با استفاده از الگوریتم ساب‌گرادیانت انجام می‌شود.

مطالعه موردی، تحلیل یافته‌ها و نتایج

در این قسمت یک مطالعه موردی در شهر کرج برای پیاده‌سازی مدل توسعه داده‌شده است. با توجه به وضعیت فعلی شهر کرج در زمینه تولید پسماند و با هدف برنامه‌ریزی برای جمع‌آوری و بازیافت آن‌ها، میزان پسماند تولیدی این شهر، به‌عنوان پارامتر "میزان پسماند تولیدی" انتخاب

گردید . گستردگی مناطق شهری باعث شده است تا شهر کرج به ۱۰ منطقه شهرداری تقسیم گردد. جمع آوری پسماندهای تفکیک شده از این مناطق صورت می گیرد . در نهایت در این مطالعه موردی ، یک طراحی بهینه برای سیستم جمع آوری و بازیافت پسماند شهر کرج ارائه گردیده است.



شکل ۴ : مناطق شهرداری در شهر کرج
Figure 2: Municipal areas in Karaj city

روزانه به طور متوسط ۱۰۰۰ تن پسماند در شهر کرج تولید می شود. با توجه به جمعیت حدود ۱ میلیون و ۶۰۰ هزار نفری این شهر بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ ، می توان گفت که سرانه تولید پسماند برای هر شخص ۷۰۰ گرم پسماند در روز است. چون در این پژوهش ، پارامتر " تولید سرانه " پسماند دارای عدم قطعیت است ، بنابراین از روش بهینه سازی تصادفی دومرحله ای برای مدل سازی استفاده گردیده است و لذا لازم است مقدار این پارامتر در هر یک از سناریوهای در نظر گرفته شده مشخص باشد. در این مقاله ۳ سناریو برای " سرانه تولید پسماند " در نظر گرفته شده است که شامل " مقدار کم " ، " مقدار متوسط " و " مقدار زیاد " می باشد. مقدار تولید پسماند

جدول ۲ - درصد تولید اجزای پسماندهای خانگی

Table 1 - The percentage of production of household waste components

درصد وزنی در پسماند تهران Weight percentage in Tehran waste	میانگین درصد وزنی در کشور Average weight percentage in the country	ترکیب فیزیکی پسماند Type of waste
74.56	72.04%	پسماند تر (آلی) wet waste
6.25%	7.77%	پلاستیک Plastic
5.04%	6.43%	کاغذ مقوا Paper
3.29%	2.86%	منسوجات

2.48%	2.52%	Textiles فازات
2.03%	2.03%	Metal شیشه
1.11%	1.14%	Glass لاستیک
1.82%	1.1%	rubber چوب
3.42%	4.11%	Wood دیگر مواد
		Other materials

سرانه در هر یک از سناریوها به ترتیب معادل ۶۰۰ ، ۷۵۰ و ۹۵۰ گرم در روز لحاظ شده است . احتمال وقوع تمامی سناریوها یکسان در نظر گرفته شده است. در مدل با هدف حداقل سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و حمل و نقل ، تعداد مخازن پسماند تفکیکی، تعداد کامیون های جمع‌آوری و حمل پسماند، تعداد و مکان هاب‌های تفکیکی پسماند یا مراکز انتقال پسماند و نیز ظرفیت مراکز بازیافت تعیین می‌شوند همچنین در این مدل هفت نوع پسماند تفکیک شده در نظر گرفته شده‌است که با توجه به شماره اندیس نوع پسماند یا ۱ شامل (۱) پسماند بیمارستانی (۲) پسماند شیشه‌ای (۳) پسماند فلزی (۴) پسماند چوبی (۵) پسماند تر (۶) پسماند پلاستیکی و (۷) پسماند کاغذی و مقوا می‌باشد. مقادیر وزنی هر یک از اجزای تشکیل دهنده پسماندهای جامد شهری در ایران در جدول ۲ درج شده است. (حسنوند و همکاران ۲۰۰۸)^۱

جدول ۲ نشان می‌دهد که درصد تولید پسماندهای مختلف با هم برابر نیست و مقدار تولید برخی از پسماندها بیشتر از دیگر پسماندها است. به‌عنوان مثال پسماند تر با بیش از ۷۲ درصد سرانه تولید ، بیشترین سهم را در تولید پسماند ایران به خود اختصاص داده است . به منظور محاسبه سرانه تولید هر نوع پسماند (تولید پسماند به ازای هر نفر در هر روز) می‌توان از مقادیر درصد تولید هر نوع از پسماندها در جدول ذیل بهره برد . برای این منظور ، سرانه تولید پسماند به ازای هر نفر در روز ، در میزان درصد تولید هر نوع از پسماند ها در روز ضرب می‌شود و به این ترتیب مقدار تولید هر نوع پسماند در روز محاسبه می‌شود .

با توجه به داده‌ها و اطلاعات موجود ، میزان تولید پسماندهای بیمارستانی در ۱۲ بیمارستان شهر کرج برابر با ۶ تن در روز است . پسماندهای بیمارستانی ترکیبی از هفت نوع پسماند دیگر و پسماند-های خاص بیمارستانی مانند پسماندهای عفونی است . شش تن پسماند بیمارستانی تولیدی روزانه

شهر کرج، به طور میانگین شامل ۲۰ درصد پسماندهای خاص بیمارستانی است و باقی مانده پسماند بیمارستانی، ترکیبی از هفت نوع پسماند دیگر می‌باشد. فرآیند تفکیک برای پسماندهای بیمارستانی متفاوت است. در هاب‌های بیمارستانی، پسماندها شامل ۲۰ درصد پسماندهای بیمارستانی و عفونی است که قابلیت بازیافت ندارند و به علت عفونی بودن، بایستی بلافاصله پس از تفکیک، مستقیماً به مراکز امحا ارسال شوند و به روش‌های استاندارد سوزانده یا دفن شوند. در مراکز هاب بیمارستانی، به‌طور میانگین ۸۰ درصد از پسماندها شامل پسماندهای نوع ۲ تا ۷ هستند. این پسماند-ها پس از تفکیک در هاب‌های بیمارستانی، به هاب تخصصی مربوط به هر پسماند ارسال می‌شوند. پسماندهایی که به مرکز بازیافت ارسال می‌شوند، با توجه به نوع پسماند و همچنین تکنولوژی بازیافت، به طور صددرصد قابل بازیافت نیستند. بنابراین پس از اجرای فرآیند بازیافت هر نوع پسماند، با توجه به درصد بازیافت پذیری هر نوع پسماند، مقداری پسماند غیرقابل بازیافت باقی می‌ماند که به منظور سوزاندن یا دفن به مراکز امحا ارسال می‌گردند.

تعداد کاندید هاب‌های تفکیکی، بر اساس جمعیت هر منطقه شهرداری و همچنین مقدار تولید هر نوع پسماند تعیین می‌شود. با توجه به این نکته، برای تعداد و مکان های کاندید هاب‌های تفکیکی محدودیتهایی وجود دارد. پسماندهای بیمارستانی، شیشه، فلز و چوب با توجه به درصد سرانه تولید کمتری که نسبت به سه پسماند دیگر دارند، هر کدام سه نقطه کاندید برای تأسیس هاب دارند، که مدل تنها یک نقطه از این سه نقطه را به‌عنوان هاب تخصصی انتخاب می‌کند. به عبارت دیگر برای این ۵ نوع پسماند فقط پنج نقطه به‌عنوان هاب تفکیکی در جواب نهایی مشخص خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه حجم پسماندهای تولیدی برای پسماندهای تر (پسماند نوع ۵)، پسماند کاغذی (پسماند نوع ۶) و پسماند پلاستیکی (پسماند نوع ۷) بیشتر از دیگر پسماندها است، بنابراین تعداد نقاط کاندید برای تأسیس هاب تفکیکی و نیز تعداد نقاط انتخابی برای تأسیس آنها بیشتر خواهند بود. به این منظور با توجه به همسایگی مناطق شهرداری در شهر کرج و نیز جمعیت هر منطقه شهرداری، از طریق ادغام فرضی مناطق شهرداری همجوار، شهر کرج به ۴ بخش تقسیم گردید. در هر بخش ۳ نقطه کاندید برای هر یک از هاب‌های تخصصی پسماندهای نوع ۵، ۶ و ۷ مشخص گردید. به عبارت دیگر در هر بخش ۹ نقطه کاندید برای تأسیس ۳ نوع هاب تفکیکی وجود خواهد داشت. نکته مهم این است که برای این نوع پسماندها (پسماندهای تر، کاغذی و پلاستیکی) دیگر محدودیتی برای تعداد تأسیس هاب تفکیکی در نظر گرفته نشده است و با توجه به داده‌های ورودی به مدل، برای هر نوع پسماند، از یک تا سه نقطه در هر بخش به‌عنوان هاب تفکیکی هر نوع پسماند انتخاب می‌شوند. ترکیب حضور مناطق شهرداری در هر یک از ۴ بخش فرضی ایجاد شده در شهر کرج به شرح ذیل است:

- بخش ۱ شامل مناطق شهرداری ۱ و ۳ و ۱۰
- بخش ۲ شامل مناطق شهرداری ۸ و ۹
- بخش ۳ شامل مناطق شهرداری ۶ و ۷
- بخش ۴ شامل مناطق شهرداری ۳ و ۴ و ۵

ظرفیت نهایی عملیاتی هر نوع هاب تفکیکی حداکثر ۹۰۰ هزار تن در سال لحاظ شده است. نکته قابل توجه در مورد ظرفیت هر نوع هاب پسماند تفکیکی این است که ظرفیت آنها، مقدار از پیش تعیین شده‌ای ندارد و لذا مدل، ظرفیت هر مرکز هاب را، به‌عنوان یک متغیر تصمیم تعیین خواهد کرد. برای هر نوع از مراکز بازیافت و امحا تنها یک مکان کاندید لحاظ شده است. مکان تأسیس این مراکز در منطقه حلقه دره واقع در جنوب غربی کرج در نظر گرفته شده است. با توجه به این که برای هر مرکز بازیافت و امحا تنها یک نقطه کاندید معین شده است، بنابراین مدل تنها ظرفیت هر مرکز را با توجه به میزان تولید هر پسماند تعیین می‌کند. همچنین با عنایت به اینکه تعداد تأسیس مراکز بازیافت و امحا محدود به یک مرکز تخصصی برای هر نوع پسماند است، لذا محدودیتی برای ظرفیت مراکز بازیافت و امحا لحاظ نگردیده است.

برای محاسبه میزان تولید روزانه پسماند خانگی شهروندان در کرج، نیاز به دانستن جمعیت اسکان یافته در هر یک از مناطق شهرداری کرج خواهد بود. اطلاعات مورد نیاز مربوط به جمعیت اسکان یافته در هر یک از مناطق شهرداری کرج که مربوط به سرشماری ملی انجام گرفته کشور در سال ۱۳۹۵ است در اختیار می‌باشد. با توجه به رشد جمعیت و نیز مهاجر پذیر بودن شهر کرج، حل مدل در این مطالعه موردی برای جمعیت تخمین زده شده شهر کرج در سال ۱۴۲۰ انجام شد. دوره‌های زمانی به‌صورت ماهانه در نظر گرفته شده‌اند. برای محاسبه جمعیت کرج در سال ۱۴۲۰ از نرخ رشد جمعیت ۶٫۵ درصد در هر سال استفاده گردیده است. برآورد جمعیت هر منطقه شهرداری کرج در سال ۱۴۲۰ در جدول ۳ بیان شده است.

بنابر اظهار نظر استانداری استان البرز، رشد جمعیت سالانه کرج بطور میانگین حدود ۶٫۵ درصد است. با استفاده از رابطه ذیل میتوان جمعیت شهر کرج را در سال ۱۴۲۰ برآورد کرد. در رابطه ذیل بکارگیری توان ۲۵ به این دلیل بوده است که برای محاسبه جمعیت سال ۱۴۲۰ از داده‌های ۲۵ سال قبل از آن یعنی ۱۳۹۵ استفاده شده است.

$$(۲۷) \quad (۱,۰۶۵)^{۲۵} * \text{جمعیت در سال } ۱۳۹۵ = \text{جمعیت در سال } ۱۴۲۰$$

جدول ۳: جمعیت برآورد شده شهر کرج در سال ۱۴۲۰
 Table 2- Estimated population of Karaj city in 2040

منطقه شهرداری	1	2	3	4	5
Regional Municipality					
جمعیت در سال ۱۳۹۵	128,943	97,500	97,681	202,000	225,000
Population in 2015					
برآورد جمعیت سال ۱۴۲۰	622,498	470,700	471,547	975,195	1,086,232
Estimated population in 2040					
منطقه شهرداری	6	7	8	9	10
Regional Municipality					
جمعیت در سال ۱۳۹۵	245,000	195,000	140,454	175,000	87,026
Population in 2015					
برآورد جمعیت سال ۱۴۲۰	1,182,786	941,401	678,509	844,847	420,135
Estimated population in 2040					

یکی از هزینه‌هایی که در این مدل لحاظ شده است ، هزینه جمع‌آوری پسماند است که شامل هزینه حمل و نقل و نیز هزینه کارگری جمع‌آوری می‌باشد. بر اساس داده های شهرداری تهران برای سال های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ هزینه کارگری جمع‌آوری برای پسماندهای غیر بیمارستانی ۵۸۰ هزار تومان به ازای هر تن پسماند و هزینه کارگری جمع‌آوری پسماندهای بیمارستانی ۲ میلیون و ۸۰۰ هزار تومان به ازای هر تن در نظر گرفته شده‌است.

برای محاسبه هزینه سوخت در حمل و نقل ، به ازای هر کیلومتر طی مسافت تأسیسات حمل، میزان سوخت مصرفی ۲٫۸۵ لیتر گازوئیل با قیمت خرید هر لیتر برابر با ۲۵۰۰ تومان در نظر گرفته شده‌است. در مدل ، هزینه سوخت مصرفی کامیون ها با توجه به میزان طی مسیر آنها محاسبه می‌شود. نکته قابل توجه این است که هر کامیون جمع‌آوری پسماند از مخازن مناطق مسکونی ، روزانه دو سرویس ۳ تنی پسماند به مراکز هاب حمل می کند و هر کامیون حمل پسماند از مراکز هاب به مراکز بازیافت یا امحا نیز روزانه یک سرویس ۲۰ تنی ارائه می نماید . هزینه ثابت ایجاد هر یک از هاب‌های تخصصی بسته به ارزش زمین در مناطق مختلف شهرداری شهر کرج یکی از ارقام ۱۰، ۸ و یا ۷ میلیارد تومان خواهد بود که شامل هزینه‌های مربوط به خرید زمین برای تأسیس هاب در مناطق مختلف شهرداری در شهر کرج می‌باشد. همچنین در مدل ، هزینه خرید کامیون یا

کامیونت سبک با ظرفیت بار ۳ تن برای جمع‌آوری پسماند ها ، ۱ میلیارد و ۲۰۰ میلیون تومان و هزینه کامیون کشنده ارسال پسماند به مراکز بازیافت با ظرفیت بار ۲۰ تن ، ۳ میلیارد تومان لحاظ شده است . برای حل مدل با در نظر گرفتن داده‌های شهر کرج از حل کننده CPLEX و نرم‌افزار GAMS استفاده شده‌است.

این مدل برای ۱۰ منطقه شهرداری کرج به‌عنوان مراکز تولید پسماند و ۵۱ نقطه کاندید برای تأسیس هاب در درون این مناطق شهری حل شده‌است. دوره‌های زمانی برابر با یک هفته در نظر گرفته شده است و مدل بر اساس برآورد جمعیت سال ۱۴۲۰ شهر کرج حل شده‌است. به منظور حل مدل ابتدا باید مقادیر محدودیت اپسیلون مربوط به تابع هدف دوم را انجام داد. طبق روش ارائه شده در قسمت قبل ، باید پس از تعیین بیشترین و کمترین مقدار ممکن برای تابع هدف دوم، بازه بین کمترین و بیشترین مقدار را به نقاط گسسته تقسیم کرد تا بتوان اپسیلون‌های مختلف برای این تابع هدف به دست آورد. پس از حل مدل حداقل مقدار تابع هدف دوم برابر با صفر و بیشترین مقدار آن برابر ۱,۹۱۲,۰۱۰ تن محاسبه گردید . برای به دست آوردن نقاط گسسته بین دو مقدار مذکور در تابع هدف دوم ، پارامتر k برابر با ۴ قرار داده شد و مقادیر اپسیلون برای تابع هدف دوم محاسبه گردید . مقادیر مذکور بر اساس رابطه ۲۶ محاسبه و در جدول ۴ آورده شده اند.

جدول ۴- مقادیر اپسیلون تابع هدف دوم

Table 3- Epsilon values of the second objective function

k	ϵ_2^k
1	478,002
2	956,004
3	1,434,006
4	1,912,010

با استفاده از مقادیر جدول ۴ به‌عنوان محدودیت اپسیلون و حل مدل ، مقادیر پاسخ جبهه پارتو محاسبه گردیده اند . تصمیم‌گیرنده می‌تواند بهترین مقدار مد نظر خود را از بین پاسخ‌های جبهه پارتو انتخاب کند. مقادیر پاسخ جبهه پارتو در جدول ۵ نشان داده شده اند .

جدول ۵- مقادیر توابع هدف به ازای اپسیلون های متفاوت
 Table 4- Values of objective functions for different epsilons

مقدار تابع هدف دوم (تن)	مقدار تابع هدف اول (هزار میلیارد تومان)	k
The value of the second objective function (tons)	The value of the first objective function (Thousand billion tomans)	
1,848,079	16,741	1
1,848,079	16,741	2
1,848,079	16,741	3
1,912,010	16,748	4

همانگونه که در نتایج درج شده در جدول ۵ دیده می شود ، علی رغم اینکه سمت راست محدودیت اپسیلون برای مسائل ۱ تا ۳ متفاوت است ، اما مقادیر به دست آمده برای توابع هدف اول و دوم در هر سه مسئله یکسان است. دلیل این امر آن است که برای مقادیر اپسیلون صفر تا ۱،۸۴۸،۰۷۹ همواره جواب شدنی که منجر به جواب با "کمترین هزینه" در تابع هدف اول گردد یکسان و برابر است . به عبارت دیگر ، در صورتی میزان تابع هدف اول (یعنی مقدار هزینه) حداقل و بهترین جواب ممکن حاصل می شود که میزان بازیافت ما برابر با ۱،۸۴۸،۰۷۹ تن باشد . بنا براین هر مقداری برای اپسیلون بین ۰ تا ۱،۸۴۸،۰۷۹ انتخاب شود، تابع هدف هزینه همواره برابر با ۱۶،۷۴۱ هزار میلیارد تومان خواهد بود . با افزایش مقدار اپسیلون به ۱،۹۱۲،۰۱۰ مشاهده می شود که تابع هدف هزینه نیز تغییر می کند و به مقدار ۱۶،۷۴۸ هزار میلیارد تومان افزایش می یابد. در ادامه مطالعه موردی شهر کرج ، برای بررسی بیشتر تأثیر محدودیت اپسیلون ، تحلیل حساسیت مدل انجام شده است. در ادامه حل مقدار سمت راست محدودیت اپسیلون را برابر با ۱،۹۱۲،۰۱۰ در نظر می گیریم تا برنامه ریزی بر اساس حداکثر میزان ظرفیت برای بازیافت انجام شود. ابتدا به مقایسه تابع هدف و زمان حل آن با دو روش آزادسازی لاگرانژ و سیپلکس می پردازیم. برای بررسی کاربردی بودن روش آزادسازی لاگرانژ می توان دو مقایسه انجام داد. معیار اول محاسبه تفاوت میان مقدار تابع هدف در روش آزادسازی لاگرانژ با روش آزادسازی عدد صحیح است. در صورتی که این مقدار مثبت باشد، استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ توصیه می شود. در صورتی استفاده از روش لاگرانژ توجیه

پذیر است که میزان عبارت فوق بزرگتر از صفر باشد. به عبارت دیگر حد پایین بهتری برای مسئله به دست آید.

$$IG = Z_{LR} - Z_r \quad (28)$$

در عبارت بالا Z_{LR} پاسخ مسئله آزادسازی لاگرانژ است و Z_r نیز مقدار تابع هدف مسئله آزادسازی عددصحیح است. معیار دوم برای توجیه پذیری استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ، زمان مورد نیاز برای حل مسئله است. در صورتی که روش لاگرانژ بتواند مدت زمان مورد نیاز برای حل مسئله را بهبود دهد، یعنی حل مسئله با روش لاگرانژ در مدت زمان کمتری نسبت به مسئله اصلی انجام شود، آنگاه استفاده از این روش توجیه پذیر و قابل قبول خواهد بود و در غیر این صورت حل مسئله با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ توصیه نمی‌شود. نتایج سنجش دو معیار مذکور در مورد کارایی روش لاگرانژ در جدول ۶ نشان داده شده است؛ همانگونه که دیده می‌شود روش لاگرانژ از نظر معیار اول یعنی "مقدار تابع هدف اول" مناسب می‌باشد و نسبت به روش آزادسازی عددصحیح، پاسخ مسئله مقدار بیشتری را کسب کرده است؛ بنابراین روش لاگرانژ نسبت به سایر روش‌ها حد پایین بهتری را برای مسئله ارائه می‌دهد. در بررسی معیار دوم یعنی "مدت زمان مورد نیاز برای حل مسئله" نیز همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش آزادسازی لاگرانژ زمان کمتری را نسبت به روش سیپلکس برای حل مسئله صرف کرده است. پس استفاده از روش لاگرانژ، باعث کاهش زمان حل مسئله خواهد شد. علاوه بر دو معیار فوق، معیار "گپ بهینگی" برای حل مسئله با لاگرانژ کوچک و قابل چشم‌پوشی است. بنابراین بر اساس دو معیار "مقدار تابع هدف" و معیار "زمان مورد نیاز برای حل مسئله" و نیز براساس معیار سوم با عنوان "گپ بهینگی" به‌کارگیری روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل مناسب و توجیه پذیر است. در ادامه مقاله، برای بررسی نتایج حل مدل، برخی از خروجی‌های بدست‌آمده مورد بحث قرار می‌گیرند.

جدول ۶- نتایج حل با روش لاگرانژ

Table 5- Results of solving by Lagrange method

زمان حل (ثانیه) Solving time (seconds)	گپ بهینگی (درصد) Optimum gap%	تابع هدف اصلی (تومان) Main objective function(Toman)	روش حل solution method
155	0	16,748,962,977	سیپلکس (Cyplex)
120	Almost zero	16,748,831,666	آزادسازی لاگرانژ Lagrange liberation
210	.86	16,604,867,760	آزادسازی عدد صحیح Integer release

جدول ۷- تعداد مخازن تفکیکی پسماند و تعداد کامیون مورد نیاز برای جمع آوری پسماند

Table 8- The number of waste separation container and the number of trucks required for waste collection

تعداد کامیون کشنده ارسال پسماند The number of trucks hauling waste	تعداد کامیون جمع آوری Number of collection trucks	تعداد مخازن پسماند The number of waste container	ظرفیت روزانه مرکز بازیافت (تن) Daily capacity of recycling center (tone)	نوع پسماند Type of waste
1	2	73	-	پسماند بیمارستانی Hospital waste
8	33	1352	104	پسماند شیشه‌ای Glass waste
10	33	1678	175	پسماند فلزی Metal waste
5	15	733	72	پسماند چوبی Wood waste
265	880	47,949	5279	پسماند تر wet waste (organic)
33	142	5931	457	پسماند پلاستیکی Plastic waste
24	95	4280	376	پسماند کاغذی و مقوا Paper waste

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که ظرفیت مراکز بازیافت تخصصی برای پسماندهای تر، پلاستیکی و کاغذی بیشتر از ظرفیت مورد نیاز برای مراکز بازیافت دیگر پسماندهاست. در بین این سه نوع مرکز بازیافت، ظرفیت مرکز بازیافت (تولید کمپوست) مربوط به پسماندهای تر بیشتر از دیگر پسماندها است. این امر به حجم بیشتر تولید پسماند "تر" نسبت به دیگر پسماندها مربوط است زیرا پسماند "تر"، نزدیک به ۷۲ درصد از سرانه پسماند تولیدی هر فرد را تشکیل می‌دهد. در مورد تعداد کامیون‌ها به این نکته باید توجه شود که کامیون‌های جمع‌آوری پسماند ۳ تنی، روزانه ۲ سرویس ۳ تنی ارائه می‌دهند (دو شیفت کار می‌کنند) اما برای کامیون‌های کشنده، تنها یک سرویس ۲۰ تنی حمل پسماند تفکیک شده از محل‌ها به مراکز بازیافت در نظر گرفته شده است. نکته دیگر در مورد تعداد کامیون‌ها این است، که مقادیر جدول ۷ حداقل تعداد کامیون‌های مورد نیاز برای جمع‌آوری و حمل پسماند تولید شده شهر کرج در سال ۱۴۲۰ است با این توضیح که برای پیش‌بینی تعداد کامیون مورد نیاز، تعداد ۲ سرویس روزانه برای کامیون‌های جمع‌آوری پسماند و یک سرویس روزانه برای کشنده‌های حمل پسماند‌ها از مراکز‌ها به مراکز بازیافت در نظر گرفته شده است. در صورت برنامه‌ریزی برای ارائه سرویس‌های بیشتر روزانه توسط هر کامیون کشنده (مثلاً ۶ سرویس در ۲۴ ساعت کاری) تعداد کشنده‌ها مورد نیاز برآورد شده در جدول ۷ به یک ششم تقلیل خواهد یافت. با توجه به نکته بالا هرچه مقدار تولید یک نوع پسماند بیشتر باشد، به تبع آن تعداد کامیون‌ها و مخازن مخصوص مورد نیاز برای جمع‌آوری آن پسماند بیشتر خواهد بود. همچنانکه در جدول ۷ مشخص است بیشترین تعداد مخازن تفکیکی و کامیون‌ها به ترتیب مربوط به پسماندهای تر، پلاستیکی و کاغذی می‌باشند. این سه نوع پسماند بیشترین مقدار تولید پسماند را به خود اختصاص داده‌اند.

با توجه به نتایج مربوط به مکان تأسیس و نیز ظرفیت‌ها به‌ها که در جدول ۸ مشاهده می‌گردد، مکان بهینه تأسیس‌های پسماندهای بیمارستانی، شیشه‌ای و فلزی در منطقه ۶ شهرداری کرج می‌باشد. همچنین مکان بهینه تأسیس‌های مخصوص پسماندهای چوبی در منطقه هفت شهرداری شهر کرج می‌باشد.

مدل در هر یک از ۴ بخش شهر کرج که حاصل تجمیع مناطق شهرداری همجوار هستند، برای پسماند تر، پسماند پلاستیک و پسماند مقوا و کاغذ، تنها یک‌ها به تخصیص داده است. به عبارت دیگر در هر بخش می‌بایست، یک‌ها مخصوص پسماندهای تر، یک‌ها مخصوص پسماندهای مقوایی-کاغذی و یک‌ها مخصوص پسماندهای پلاستیکی تأسیس شود. بنابراین برای هر یک از پسماندهای مذکور در هر بخش شهر کرج یک‌ها ایجاد می‌شود و لذا در مجموع برای هر یک پسماندهای فوق‌الذکر در چهار بخش شهر کرج، ۴‌ها تأسیس خواهد شد. (۴)

هاب برای پسماند تر در چهار بخش شهر کرج ، ۴ هاب برای پسماند پلاستیک در چهار بخش شهر کرج ، ۴ هاب برای پسماند کاغذ و مقوا در چهار بخش شهر کرج) . این امر به دلیل آنست که چون با تأسیس هر هاب می بایست هزینه ثابت تأسیس هاب را پرداخت ، لذا اگر تأسیس هاب برای سه نوع پسماند تر ، پلاستیکی و کاغذی - مقوایی از ۱ هاب در هر بخش شهر کرج بیشتر شود، جواب بهتری را نمی توان به دست آورد.

به عبارت دیگر کاهش هزینه های حمل و نقل و هزینه های عملیاتی که با تأسیس تعداد هاب بیشتر محقق می شود، نسبت به افزایش هزینه ثابت تأسیس هاب جدید، کمتر است . بنابراین بصره نیست تعداد بیشتری هاب تأسیس شود. با این توضیحات در مجموع برای تفکیک ۷ نوع پسماندهای سطح شهر کرج نیاز به تأسیس ۱۶ هاب تفکیکی می باشد. (تعداد ۱۲ هاب تفکیکی برای پسماندهای تر ، پلاستیکی و کاغذی در ۴ بخش شهری کرج و تعداد ۴ هاب تفکیکی برای پسماندهای شیشه ای، فلزی ، چوبی و بیمارستانی) .

جدول ۸- مکان و ظرفیت هابها

Table 6- Location and capacity of hubs

ظرفیت روزانه هاب (تن) Daily capacity of the hub (tons)	منطقه شهرداری تأسیس هاب Hub establishment municipal area	نوع هاب Hub type
8	6	هاب پسماند بیمارستانی Hospital waste hub
148	6	هاب پسماند شیشه ای Glass waste hub
184	6	هاب پسماند فلزی Metal waste hub
80	7	هاب پسماند چوبی Wood waste hub
1200	1	هاب پسماند تر بخش ۱ Area 1 wet waste hub
148	10	هاب پسماند پلاستیک بخش ۱ Hub of plastic waste area 1
107	10	هاب پسماند کاغذ بخش ۱ Hub paper waste section 1
1108	8	هاب پسماند تر بخش ۲ Area 2 wet waste hub
137	8	هاب پسماند پلاستیک بخش ۲ Hub of plastic waste area 2
98	9	هاب پسماند کاغذ بخش ۲ Hub paper waste section 2

1221	6	هاب پسماند تر بخش ۳ Area 3 wet waste hub
151	6	هاب پسماند پلاستیک بخش ۳ Hub of plastic waste area 3
109	6	هاب پسماند کاغذ بخش ۳ Hub paper waste section 3
1743	4	هاب پسماند تر بخش ۴ Area 4 wet waste hub
215	4	هاب پسماند پلاستیک بخش ۴ Hub of plastic waste area 4
155	4	هاب پسماند کاغذ بخش ۴ Hub paper waste section 4

در ادامه، نتایج مدل را بدون لحاظ هزینه ثابت تأسیس هاب تحلیل می‌کنیم. مدل در این حالت، هاب‌های مربوط به پسماندهای نوع ۱ تا ۵ را در همان نقاط قبلی تأسیس می‌کند ولی هاب‌های ۳ نوع پسماند تر، پلاستیکی و کاغذی را در تمام نقاط کاندید ایجاد می‌نماید. به عبارت دیگر، اگر در مدل هزینه تأسیس هاب در نظر گرفته نشود، مدل در هر بخش از بخش‌های چهار گانه شهر کرج و در تمامی نقاط کاندید، هاب تأسیس خواهد کرد.

همانگونه که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، در شرایط عدم لحاظ هزینه تأسیس مراکز هاب، دلیل تأسیس هاب در تمامی نقاط کاندید توسط مدل این است که هزینه‌های حمل نقل در حالت تأسیس هاب در تمامی نقاط کاندید، نسبت به هزینه‌های حمل و نقل حالت پیشین کمتر شده‌است.

جدول ۹- تحلیل حساسیت حذف هزینه ثابت تأسیس هاب

Table 9-Sensitivity analysis of the fixed cost target for the establishment of the hub

هزینه ثابت هاب Hub fixed cost	تعداد هاب Number of hubs	هزینه سرمایه‌گذاری (تومان) Investment cost (Tomans)	هزینه عملیاتی (تومان) Operating cost (Tomans)	هزینه حمل و نقل (تومان) Transportation cost (Tomans)
دارد Has it	16	11,303,202,752	2,157,509,232	3,288,250,993
ندارد Does not have	40	11,164,202,752	2,157,509,232	3,267,423,684

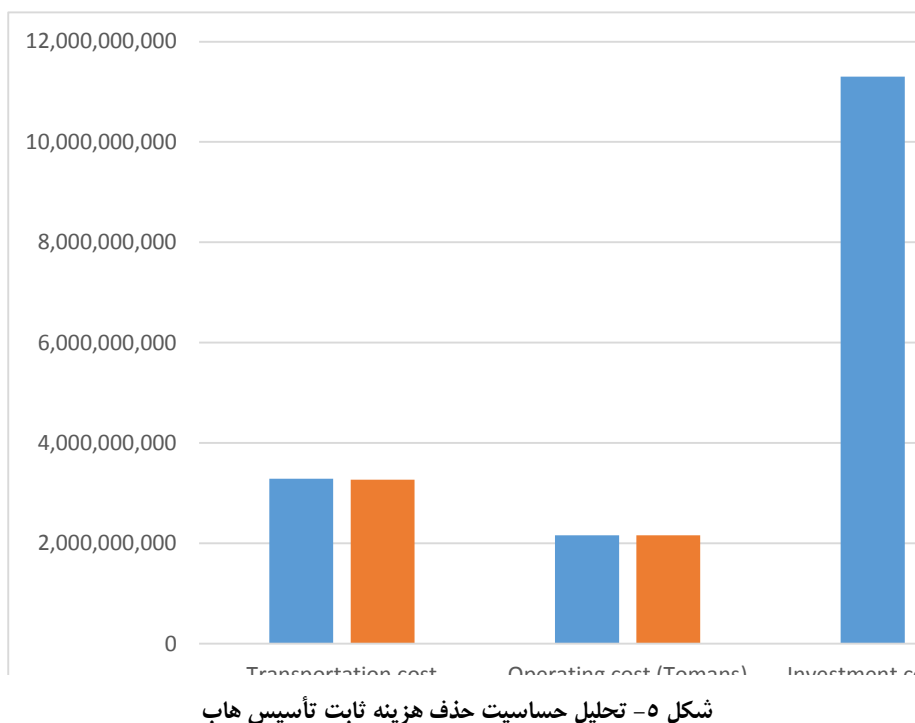


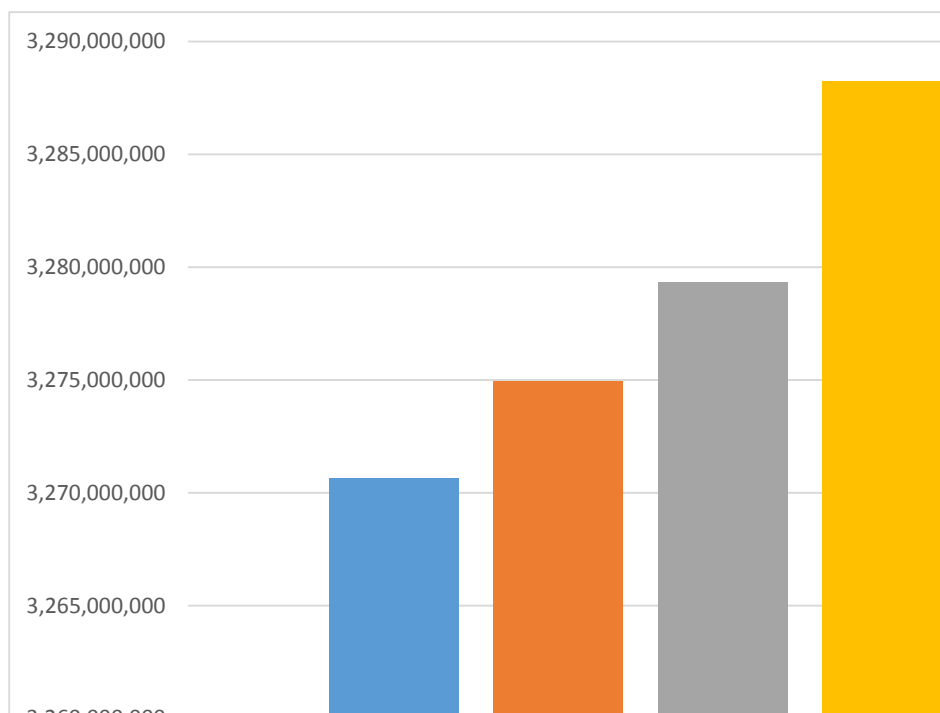
Figure 4- Sensitivity analysis of removing the fixed cost of establishing the hub

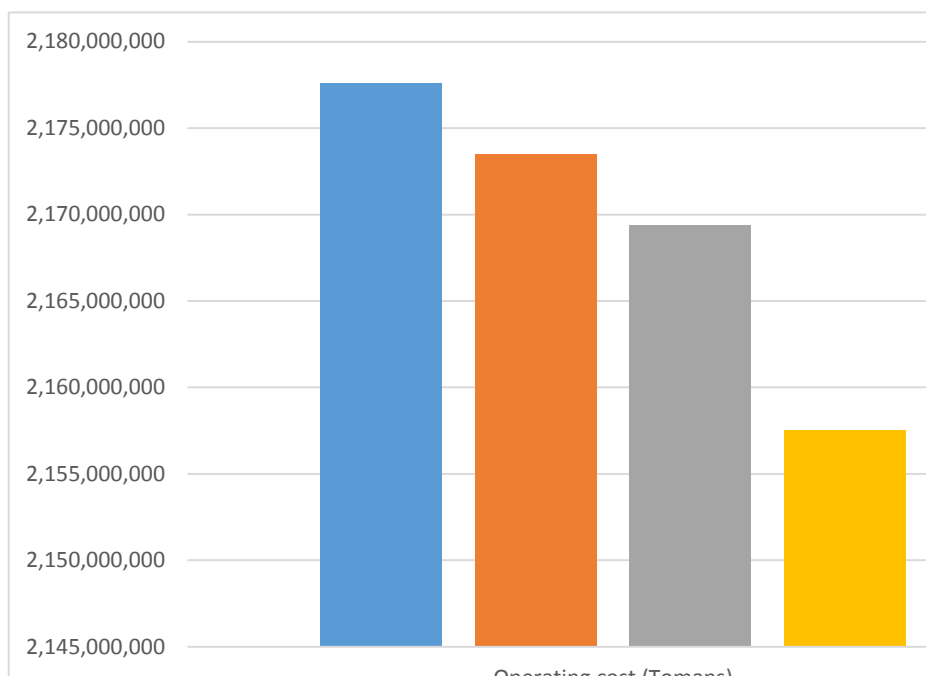
بر اساس نتایج جدول ۱۰ با افزایش مقدار سمت راست محدودیت اپسیلون ، مقادیر تابع هدف اصلی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر ، با افزایش مقدار تولید کالای بازیافتی ، هزینه‌های مسئله دچار افزایش می‌شود . دلیل افزایش هزینه های مسئله در این حالت آنست که افزایش میزان بازیافت باعث افزایش هزینه حمل و نقل می‌گردد .این افزایش در هزینه ها در حالی روی می‌دهد که هزینه‌های عملیاتی مسئله کاهش پیدا کرده‌اند، اما مقدار کاهش هزینه های عملیاتی مسئله کمتر از میزان افزایش هزینه‌های حمل و نقل مسئله بوده است. بنابراین ، هزینه کلی مسئله افزایش پیدا کرده است. با توجه به این نتایج و نتایج جدول ۴-۵ هر چه مقادیر سمت راست محدودیت اپسیلون افزایش یابد، مقادیر تابع هدف هزینه با روندی افزایشی بدتر خواهد شد.

جدول ۱۰- نتایج تحلیل حساسیت محدودیت اپسیلون

Table 10- Results of sensitivity analysis of epsilon limit

مقدار محدودیت اپسیلون Epsilon limit value	تابع هدف (تومان) Objective function (Toman)	هزینه عملیاتی (تومان) Operating cost (tomans)	هزینه حمل و نقل (تومان) Transportation cost (,Tomans)
1,848,079	16,741,037,456	2,177,594,624	3,270,646,268
1,864,061	16,741,250,567	2,173,479,340	3,274,974,664
1,880,044	16,741,495,999	2,169,363,912	3,279,335,524
1,912,010	16,748,962,977	2,157,509,232	3,288,250,993





شکل ۶- نتایج تحلیل حساسیت محدودیت اپسیلون

Figure 5- Results of sensitivity analysis of epsilon limit

نتیجه گیری

هدف این مطالعه طراحی مدل ریاضی چندهدفه به منظور مدیریت پسماندهای شهری و بیمارستانی است. با توجه به مطالعاتی که صورت گرفته است، ارتقا و توسعه مدیریت پسماندهای شهری و بیمارستانی یکی از ارکان اساسی خدمات شهری و نیز از ابزارهای مهم حفاظت محیط زیست است. بنابراین در این پژوهش پس از بررسی‌های انجام یافته و مطالعه ادبیات موضوع، خلأ موجود مطالعاتی مشخص گردید. در مطالعات انجام شده در مقالات ذیربط مشخص گردید که هاب تخصصی تفکیکی برای هر نوع پسماند در مقالات مذکور لحاظ نشده است و فقط در تعداد کمی از مقالات، مفهوم بازیافت نیز در طراحی زنجیره تأمین در نظر گرفته شده بود. همچنین تا حدی که مطالعه صورت گرفت، مقاله ای مشاهده نشد که در آن از روش‌های دقیق حل برای کاهش سختی حل مسئله استفاده شده باشد. بنابراین با هدف پوشش خلأ تحقیقاتی موجود، یک مدل ریاضی

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای طراحی شبکه جمع‌آوری و بازیافت پسماند با لحاظ تفکیک از مبدأ و نیز لحاظ تأسیس هاب برای هر نوع از پسماندهای تفکیک شده ارائه گردید.

در این پژوهش علاوه بر مفهوم بازیافت، مفهوم هاب تفکیکی نیز در طراحی زنجیره تأمین در نظر گرفته شد. بمنظور صحت‌سنجی مدل، یک مطالعه موردی در شهر کرج انجام گرفت و نتایج آن نیز ارائه گردید. جمع‌آوری داده‌های مناسب برای حل مسئله با توجه به میزان بالای داده‌های مورد نیاز و سختی دسترسی به برخی از آمار یکی از مشکلات حل مدل بود.

با توجه به نتایج به دست آمده، برای افزایش میزان بازیافت در شبکه زنجیره‌تأمین پسماند، نیاز به سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی و عملیاتی بیشتر می‌باشد. با افزایش بازیافت، آثار زیست محیطی و تخریبی دفن و سوزاندن پسماندها کاهش خواهد یافت. روش حل آزادسازی لاگرانژ، می‌تواند به‌عنوان یک روش حل مناسب برای کاهش زمان حل مسائل با مقادیر بالا مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، مشاهده شد که روش آزادسازی لاگرانژ در مقایسه با حل کننده سیپلکس می‌تواند مسائل با مقادیر بالا را با دقت مناسب و در زمانی کمتر حل کند. بنابراین می‌توان گفت نوآوری‌های این تحقیق شامل توسعه مدل زنجیره تأمین جمع‌آوری و بازیافت پسماند تحت عدم قطعیت، در نظر گرفتن هاب‌های تفکیکی، استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل و مطالعه موردی شهر کرج است. همچنین با در نظر گرفتن شبکه زنجیره‌تأمین جمع‌آوری و بازیافت ارائه شده در این تحقیق و نیز با توجه به مطالعه ادبیات موضوع، برای پژوهش‌های آینده، موضوعاتی مانند مسیریابی حرکت کامیون‌های جمع‌آوری و حمل پسماند در شبکه مذکور، برنامه‌ریزی تولید و انبار برای مراکز بازیافت، استفاده از روش‌های حل ابتکاری و فرا ابتکاری برای حل مدل که با روش‌های حل دقیق ریاضی دیگر مانند آزادسازی لاگرانژ ترکیب شده باشند، در نظر گرفتن توابع هدف محیط‌زیستی مانند کاهش آلودگی در فرآیند حمل و بازیافت پسماند و لحاظ عدم قطعیت در ظرفیت تسهیلات را می‌توان پیشنهاد نمود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافع ندارند.

References

- Adeleke, O. J. & Olukanni, D. O. 2020. Facility location problems: models, techniques, and applications in waste management. *Recycling*, 5(2), 10. **doi:10.3390/recycling5020010**
- Akbarpour Shirazi, M., Samieifard, R., Abduli, M. A. & Omidvar, B. 2016. Mathematical modeling in municipal solid waste management: case study of Tehran, *J Environ Health Sci Eng. ;* 15(3), 447-477. DOI: 10.1186/s40201-016-0250-2
- Asefi, H., Shahparvari, S. & Chhetri, P. 2019. Integrated Municipal Solid Waste Management under uncertainty: A tri-echelon city logistics and transportation context. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101606. **doi:10.1016/j.scs.2019.101606**
- Babaei , E., Iraj T., & Mirmehdi, S. 2017. The location-routing problem of the multi-round fuzzy arc considering the multiple journeys of the intermediate discharge platforms: urban waste management. 15th International Industrial Engineering Conference, 1-12. **https://civilica.com/doc/839534 (In persian)**
- Bakıcı,T.,Almirall,E.,Wareham,J.,2013.A smart city in initiative: The case of Barcelona .*Journal of the Knowledge Economy*4(2),135–148. Candanedo, **doi:10.1007/s13132-012-0084-9**
- S.,Nieves,E.H.,González,S.R.,Martín,M.T.S.,Briones,A.G.,2018.Machine learning predictive model for industry 4.0.In:Proceedings of the International Conference On Knowledge Management in Organizations,pp.501–510. Cham:Springer , **doi:10.1007/978-3-319-95204-8_42**
- Coutinho-Rodrigues, J., Tralhão, L. & Alçada-Almeida, L. 2012. A bi-objective modeling approach applied to an urban semi-desirable facility location problem. *European journal of operational research*, 223(1), 203-213. **doi:10.1016/j.ejor.2012.05.037**
- 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(3), 1402-1421. **doi:10.1016/j.ejor.2006.09.021**
- Ghannadpour, S. F. & Zandiyeh, F. 2020. An adapted multi-objective genetic algorithm for solving the cash in transit vehicle routing problem with vulnerability estimation for risk quantification. *Engineering applications of artificial intelligence*, 96, 103964. **doi:10.1016/j.engappai.2020.103964**
- 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. **DOI:10.1016/j.jclepro.2017.08.063**
- Harijani, A. M., Mansour, S., Karimi, B. & Lee, C.-G. 2017. Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste– A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 151, 96-108. **doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.030**
- Harrison, C., Eckman, B., Hamilton, R., Hartswick, P., Kalagnanam, J., Paraszczak, J., Williams, P., 2010. Foundations for smarter cities. *IBM J. Res. Dev.* 54(4), 1-16. **doi:10.1147/JRD.2010.2048257**
- Hasanvand , MS. , Nabizadeh , R. , Heydari , M. (2008) , Analysis of municipal solid waste in Iran , *Journal of health and environment* ,1(1), 9-18 , **URL: <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-182-en.html> (In Persian)**
- Lemaréchal, C. (2001). Lagrangian Relaxation. In: Jünger, M., Naddef, D. (eds) *Computational Combinatorial Optimization. Lecture Notes in Computer Science*, vol 2241. Springer, Berlin, Heidelberg. 112-156. **doi:10.1007/3-540-45586-8_4**
- López-Sánchez, A., Hernández-Díaz, A. G., Gortázar, F. & Hinojosa, M. A. 2018. A Multiobjective GRASP–VND algorithm to solve the waste collection problem. *International Transactions in Operational Research*, 25(2), 545-567. **doi:10.1111/itor.12452**
- Mathematical modeling in municipal solid waste management: case study of Tehran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 14, 1-12. **doi:10.1186/s40201-016-0250-2**
- Mavrotas, George. Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 2009, 213.2: 455-465. **doi:10.1016/j.amc.2009.03.037**
- Mohammadi, M., Jämsä-jounela, S.-L. & Harjunkoski, I. 2019. Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network. *Computers & Chemical Engineering*, 123, 155-169. **doi:10.1016/j.compchemeng.2018.12.022**
- Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A. & Syed, M. N. 2017. Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 146-172. **doi:10.1016/j.trd.2016.10.033**
- Pouriani, S., Asadi-GangraJ, E. & Paydar, M. M. 2019. A robust bi-level optimization modelling approach for municipal solid waste management; a real case study of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 240(4), 118125. **doi:10.1016/j.jclepro.2019.118125**
- Rahimi, M. & Ghezavati, V. 2018. Sustainable multi-period reverse logistics network design and planning under uncertainty utilizing conditional

- value at risk (CVaR) for recycling construction and demolition waste. Journal of cleaner production, 172, 1567-1581. doi: **10.1016/j.jclepro.2017.10.240**
- Retrieved from Mashregnews : www.mashregnews.ir/947927 " How much waste is produced in Iran? " , 2020 , In Persian
- Retrieved from EghtesadOnline: <https://www.eghtesadonline.com/n/1nVc> " Garbage turnover in Iran " , 2019, In Persian
- Santibañez-Aguilar, J. E., Ponce-Ortega, J. M., González-Campos, J. B., Serna-González, M. & EL-Halwagi, M. M. 2013. Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste. Waste anagement, 33, 2607-2622. doi:**10.1016/j.wasman.2013.08.010**.