



## Multi-Objective Mathematical Model for Optimizing Urban Waste Management (Case study: Karaj City)

Mohsen Bijanpoor<sup>1</sup>, Reza Ehtsham Rasi<sup>2\*</sup>, Davood Karakhani<sup>3</sup>

- 1- Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.  
E-mail: mnbijanpoor@yahoo.com
- 2- Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.  
(Corresponding Author) E-mail: ehteshamrasi@qiau.ac.ir
- 3- Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.  
E-mail: davoodgharakhany@yahoo.com

| Article Info  | Abstract  |                        |
|---|---|------------------------|
| <b>Article type:</b><br>Research Article  | <p>In this research, an optimal supply chain network for the collection and recycling of urban waste has been presented by using the double-objective mixed integer linear programming method. In the supply chain design of this research, in addition to the concept of recycling, the concept of a dedicated hub was also considered for each type of separated waste. The objective functions include an economic function to minimize investment costs and a social objective function to maximize the amount of recycling. To solve the large-scale problem accurately, the Lagrange release method has been used. To validate and confirm the efficiency, the model was implemented on a case study in the city of Karaj. 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 in the area of forming hub centers. By increasing the amount of recycling, the harmful environmental and destructive effects caused by burying and burning mixed waste will be reduced. In this research, it was observed that the Lagrange release method is able to solve large-scale problems with appropriate accuracy and in less time compared to the commercial CPLEX solver. Therefore, the Lagrange release method can be used as an accurate solution to reduce the time of solving large-scale problems.</p> |                        |
| <b>Article history:</b><br>Received:<br>2023/04/29<br>Acceptance:<br>2024/03/03<br>Published online:<br>2024/03/18  |   |                        |
| <b>Key words:</b><br>Supply Chain,<br>Lagrange's Relaxation<br>Method,<br>Two-Stage Stochastic<br>programming,<br>Linear Programming,<br>Waste  |   |                        |
| <b>Cite this article:</b> Bijanpoor, M., Ehtsham Rasi, R., & Karakhani, D. (2024). Multi-Objective Mathematical Model for Optimizing Urban Waste Management (Case study: Karaj City). <i>Green Management</i> , 3(4), 1-25. |   |                        |
| <b>Publisher:</b> Islamic Azad University, Aliabad Katoul Branch.   |   | <b>ISSN:</b> 2821-0050 |

## مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه سازی مدیریت پسماند های شهری

( مورد مطالعه : شهر کرج )

محسن بیژن پور<sup>۱</sup>، رضا احتشام رائی<sup>۲\*</sup>، داوود قراخانی<sup>۳</sup>

- ۱- گروه مدیریت صنعتی ، واحد قزوین ، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. رایانامه : mnbijanpoor@yahoo.com  
۲- گروه مدیریت صنعتی ، واحد قزوین ، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. (نویسنده مسئول) رایانامه: ehteshamrasi@qiau.ac.ir  
۳- گروه مدیریت صنعتی ، واحد قزوین ، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. davoodgharakhany@yahoo.com

| اطلاعات مقاله  | چکیده   |
|--|---|
| نوع مقاله:<br>مقاله پژوهشی   | در این تحقیق با استفاده از روش برنامه ریزی خطی عددصحيح مختلط دوهدفه ، یک شبکه بهینه زنجیره تامین جمع آوری و بازیافت پسماندهای شهری با لحاظ تفکیک از مبدا ارائه گردیده است. در طراحی زنجیره تامین این پژوهش علاوه بر مفهوم بازیافت، مفهوم هاب اختصاصی نیز برای هر نوع از پسماند های تفکیک شده لحاظ گردید.  |
| تاریخ دریافت:<br>۱۴۰۲/۰۲/۰۹  | توابع هدف شامل یک تابع اقتصادی برای حداقل سازی هزینه های سرمایه گذاری و یک تابع هدف اجتماعی برای حداکثرسازی مقدار بازیافت می باشد. برای حل دقیق مسئله درمقیاس بزرگ از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده شده است.   |
| تاریخ پذیرش:<br>۱۴۰۲/۱۲/۱۳   | برای صحت سنجی و تایید کارایی ، 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 تامین پسماند ، نیاز به سرمایه گذاری های زیرساختی و عملیاتی بیشتر در حوزه تشکیل مراکز هاب می باشد. با افزایش مقدار بازیافت ، آثار زیان بار زیست محیطی و تخریبی ناشی از دفن و سوزاندن مخلوط پسماندها کاهش خواهد یافت. در این پژوهش ، مشاهده شد که روش آزادسازی لاگرانژ قادر است در مقایسه با حل کننده تجاری سیپلکس ، مسائل در مقیاس بزرگ را با دقتی مناسب و در زمانی کمتر حل کند. بنابراین روش آزادسازی لاگرانژ می تواند بعنوان یک راه حل دقیق ، برای کاهش زمان حل مسائل مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار گیرد . |
| کلمات کلیدی:<br>زنجیره تأمین،<br>روش آرام سازی لاگرانژ،<br>برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای،<br>برنامه ریزی خطی،<br>ضایعات   |   |
| استناد: بیژن پور، محسن؛ احتشام رائی، رضا، و قراخانی، داوود(۱۴۰۲). مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه سازی مدیریت پسماند های شهری ( مورد مطالعه : شهر کرج. مدیریت سبز، ۳(۴)، ۱-۲۵. |   |
| ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علی آباد کتول.  | شاپا الکترونیکی: ۲۸۲۱-۰۰۵۰  |

## مقدمه

در حالیکه در ایران روزانه ۵۸ هزار تن پسماند تولید می شود ، فقط حدود ۱۰ درصد آنها بازیافت می شوند. در شهر تهران ، میزان تفکیک از مبدأ پسماند های شهری در حدود ۲ درصد پسماند های تولیدی روزانه است. عملیات جمع آوری و دفع پسماندها ، بدلیل صرف هزینه های سرمایه گذاری گزاف برای ناوگان جمع آوری و حمل پسماند و نیز لزوم صرف هزینه های چشم گیر عملیاتی بسیار پر هزینه است ( هزینه هایی مانند سوخت ، نگهداری و تعمیرات). بنابراین حتی کاهش های اندک در هزینه های عملیاتی جمع آوری و دفع پسماندها ، منجر به صرفه جویی های بزرگ در هزینه شهرداری ها می شود.

بطور میانگین بین ۶۰ تا ۸۰ درصد هزینه های مدیریت پسماند های جامد شهری مربوط به هزینه های جمع آوری و حمل و نقل پسماند ها است. (تی آل میرال و همکاران ۲۰۱۳)<sup>۱</sup> 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)<sup>۲</sup> در حالی که در جهان به طور متوسط ۷۰ درصد پسماندهای تولید شده بازیافت می شود ، این رقم در ایران بصورت خوشبینانه حدود ۲۰ درصد است و لذا سالانه حدود ۱۶ میلیون تن پسماند تولیدی کشور در خاک دفن می شود . در فرآیند دفع پسماند ها در کشور نیز ، 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 پسماندها دفن می شود در حالیکه ۱۷ درصد آنها بازیافت و ۷۴ درصد هم 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).<sup>۳</sup> بنابراین مدیریت پسماندهای جامد یکی از دغدغه های مهم حوزه سلامت و زیست محیطی برای دولت و مسئولین شهری است ، زیرا در صورت عدم مدیریت صحیح ، پسماندهای تولید شده می تواند آب های سطحی و زیرزمینی ، خاک و هوا را در مقیاس وسیع و با سرعت بسیار زیاد آلوده کنند (حبیبی و همکاران ، ۲۰۱۷)<sup>۴</sup>

1-T.,Almirall,E

2 -Harrison, C

3 -Akbarpour Shirazi

4 -Habibi

## ادبیات نظری و پیشینه تحقیق

پسماندهای شهری عمدتاً از پسماندهای روزمره تشکیل شده است. مدیریت این پسماندها به دلیل رشد سریع جمعیت و عدم سرمایه گذاری مناسب توسط دولت‌ها یا مقامات مسئول، برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه به چالشی دائمی تبدیل شده است (عرفان بابایی و دیگران ۱۳۹۷).<sup>۱</sup> مدیریت نامناسب 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 شامل به حداقل رساندن تولید پسماند، بازیافت و دفع بهداشتی پسماندها می‌باشد (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹).<sup>۲</sup> از میان تمام استراتژی‌های مدیریت پسماندهای شهری "عملیات بازیافت پسماند" به دلیل تاثیر آن بر رشد اقتصادی در کنار فراهم ساختن حفاظت از محیط زیست و سلامت انسان، بیشتر از سایر گزینه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. عملیات جمع‌آوری، بازیافت یا دفع پسماندها با توجه به لزوم سرمایه‌گذاری در تاسیسات جمع‌آوری و دفع و نیز صرف هزینه‌های عملیاتی بسیار پر هزینه است. بنابراین بهبود اندکی 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 است. (اکبرپور شیرازی و همکاران، ۱۳۹۵). طبق تحقیقات انجام شده، مدیریت پسماند جامد شهری را می‌توان به عنوان یک مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین در نظر گرفت (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹). این شبکه شامل تاسیساتی مانند ایستگاه‌های جمع‌آوری پسماند، ایستگاه‌های انتقال یا هاب و تاسیسات بازیافت و دفع است. در فرآیند جمع‌آوری پسماندهای خانگی، پسماندها از ایستگاه‌های جمع‌آوری محلی ابتدا به تاسیسات انتقال فرستاده می‌شوند و در آنجا از کامیون‌های جمع‌آوری شهری تخلیه و در کامیون‌های بزرگ‌تر بارگیری می‌شوند تا به صورت انبوه به محل‌های دفن پسماند منتقل شوند (حیبی و همکاران، ۲۰۱۷). تصمیمات مهمی که برای افزایش راندمان کلی سیستم در این شبکه اتخاذ می‌شود، شامل شناسایی مکان‌های بهینه برای تاسیسات مختلف پسماند و تعیین جریان مواد از طریق آنها می‌شود (پوریانی و همکاران،

۳ (۲۰۱۹)

1- Babaei , E  
2 -Mohammadi  
3 -Pouriani

به منظور طراحی شبکه زنجیره تامین کارا و مناسب برای فرآیند جمع آوری پسماندهای شهری، مدل های برنامه ریزی ریاضی قادر به بهبود عملکرد این زنجیره تامین با بهینه سازی مکان تأسیسات و تخصیص تأسیسات به یکدیگر هستند و لذا از این نظر مفید هستند (حبیبی و همکاران، ۲۰۱۷). چون پارامترها و اطلاعات مورد نیاز در هنگام طراحی شبکه زنجیره تامین پسماند، به طور قطعی در دسترس نمی باشند، لذا طراحی یک زنجیره تامین به شکل قطعی، کارایی آن را در واقعیت کاهش می دهد، بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت در طراحی مدل اجتناب ناپذیر است (رحیمی و قضاواتی، ۱۳۹۷)<sup>۱</sup>. ارکوت و همکاران در مقاله سال ۲۰۰۸ خود<sup>۲</sup> یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه را برای حل مسئله مکانیابی و تخصیص ظرفیت برای تأسیسات زنجیره تامین پسماند در مقیاس های منطقه ای و استانی با توجه به معیارهای اقتصادی و زیست محیطی توسعه دادند.

کوتینیو-رودریگز و همکاران ۲۰۱۲<sup>۳</sup> یک مدل دو هدفه را توسعه دادند. مدل برنامه ریزی عدد صحیح که هزینه های سرمایه گذاری و ناراضی ناشی از آن را به طور همزمان در بین ساکنین محلی به حداقل می رساند، تعداد تأسیسات مورد نیاز، ظرفیت و محل استقرار آنها و سهم هر یک از تأسیسات در تامین تقاضا در این مدل مشخص می شود. سانتیبانز-آگیلار و همکاران در مقاله سال ۲۰۱۳ خود<sup>۴</sup> یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط را برای برنامه ریزی بهینه یک زنجیره تامین مرتبط با سیستم های مدیریت پسماندهای شهری با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی و زیست محیطی پیشنهاد کردند. حریجانی و همکاران در مقاله سال ۱۳۹۶<sup>۵</sup> خود 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 برنامه ریزی عدد صحیح مختلط را برای به حداکثر رساندن سود شبکه بازیافت و دفع در تهران توسعه داده اند.

حبیبی و همکاران در مقاله سال خود ۲۰۱۷<sup>۶</sup> یک مدل بهینه سازی استوار چند هدفه را برای انتخاب محل و تخصیص ظرفیت تمام تأسیسات بازیافت و دفع در یک سیستم مدیریت پسماند جامد ارائه شده است. این مدل به تصمیم گیرندگان اجازه می دهد تا مکان تأسیسات بازیافت و دفع، تخصیص تأسیسات به یکدیگر، نوع فن آوری پردازش و حمل پسماند، ظرفیت هر تأسیسات، و تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز برای حمل و نقل پسماند بین تأسیسات را بهینه سازی کنند. در این تحقیق هزینه های سرمایه گذاری، حمل و نقل و دفن مواد زائد به شکل غیر قطعی در نظر گرفته شده اند.

1 -Rahimi and Ghezavati  
2 -Erkut  
3 -Coutinho-Rodrigues  
4 -Santibañez-Aguilar  
5 -Harjani

محمد و همکاران در مقاله سال ۲۰۱۷ خود<sup>۱</sup> به منظور کاهش انتشار کربن در مسئله خود سطح ظرفیت تاسیسات و حالت حمل و نقل پسماندها را بهینه کردند. محمد و همکاران در مقاله خود بیان داشته اند، برای رسیدن به اهداف تحقیق یک مدل بهینه‌سازی را برای بررسی یک مساله طراحی شبکه زنجیره تامین پسماند چند دوره‌ای، چند محصولی و دارای ظرفیت پیشنهاد می‌کنند. برای حل این مسئله از یک فرمولاسیون برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط استفاده می‌شود.

رودریگو د آلوارنگا گومز و همکاران در مقاله سال ۲۰۱۷ خود به منظور بهینه‌سازی فرآیند جمع‌آوری پسماند یک مدل برای لجستیک معکوس ارائه داده‌اند تا با به حداقل رساندن تعداد کامیون‌ها و کل مسافت طی شده، هزینه‌ها کلی سیستم جمع‌آوری را کاهش دهند. رحیمی و قضاواتی در مقاله سال ۱۳۹۷ 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.

لوپز-سانچز و همکاران<sup>۲</sup> در مقاله سال ۲۰۱۸ خود مسئله جمع‌آوری پسماند یک شهر در جنوب اسپانیا به عنوان یک مسئله مسیریابی چندهدفه را مورد بررسی قرار داده‌اند. به حداقل رساندن هزینه کلی سفر (یعنی کل مسافت طی شده توسط همه وسایل جمع‌آوری) و نیز به حداقل رساندن زمان سفر (یعنی مدت زمان طولانی‌ترین مسیر برای یک وسیله نقلیه) به عنوان اهداف مدل در نظر گرفته شده‌است.

پوریانی و همکاران در مقاله سال ۲۰۱۹ خود یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو سطحی را توسعه داده‌اند. سطح پایین‌تر این مدل شامل مکان و هزینه‌های تاسیس 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 در مقاله سال ۲۰۱۹ خود<sup>۳</sup> یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای هماهنگی تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی در شبکه‌های زنجیره‌تامین پسماند ارائه داده‌است. مساله بهینه‌سازی حاصل به صورت یک مساله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده‌است که عملکردهای مختلفی مانند جمع‌آوری پسماند در شهرها، تفکیک پسماند در مراکز جداسازی، بازیافت

1 -Mohammed  
2- López-Sánchez  
3 -Mohammadi

پسماند در کارخانه ها و فروش محصولات نهایی به بازارها را پوشش می دهد. آدلک و اولکان نی در مقاله سال ۲۰۲۰<sup>۱</sup> خود با تمرکز بر روی حل مسئله مکان یابی تاسیسات جمع آوری پسماند در یک منطقه مسکونی شهری و مسئله مربوط به تخصیص مشتریان (نقاط تولید پسماند) و تخصیص کامیون های جمع آوری به این مکان ها می باشد. این مسئله به عنوان مسئله پوشش مجموعه ها، که یک نوع مسئله مکانیابی تاسیسات کلاسیک می باشد فرمول بندی شده است. مدل پیشنهادی در این مطالعه، تعداد مکان های جمع آوری پسماند مورد نیاز برای یک منطقه مسکونی شهری را بر آورد می کند. قنادپور و زندیه در مقاله سال ۱۳۹۹<sup>۲</sup> به بررسی مساله مسیریابی وسایل نقلیه جمع آوری پسماند سلامت برای مراکز پزشکی کوچک در ایران می پردازد که مقادیر کمی پسماند تولید می کنند. چنکسی یانگ و جیانگ گو چن<sup>۳</sup> در مقاله سال ۲۰۲۰ خود یک مدل بهینه سازی را برای طراحی یک شبکه لجستیک معکوس پسماندهای ساخت و ساز و تخریب ساختمانی منطقه ای پیشنهاد کرده اند و به این منظور یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیک معکوس پیشنهادی را توسعه دادند. زی یو پان و همکاران در مقاله سال ۲۰۲۰ خود یک مدل برنامه ریزی خطی چند هدفه مختلط عدد صحیح برای به حداقل رساندن هزینه های دفع پسماند ساخت و ساز و تخریب و نیز برای به حداکثر رساندن سود شرکت های بازیافت و میزان بازیافت پسماند ساخت و ساز و تخریب توسعه دادند. در این مقاله میزان پسماندهای ساختمانی تولید شده را دارای عدم قطعیت در نظر گرفته اند تا با نوسانات آتی میزان عرضه پسماند مقابله کنند. سید میتون علی و همکاران (۲۰۲۳)<sup>۴</sup> در مقاله سال ۲۰۲۳ خود با عنوان "یک زنجیره تامین حلقه بسته چند هدفه تحت عدم قطعیت: یک فرمول بندی مجدد آرام سازی لاگرانژی<sup>۵</sup> کارآمد با استفاده از یک الگوریتم مبتنی بر همسایگی" به موضوع طراحی زنجیره تامین برای مدیریت زباله های شهری پرداخته است.

1-Adeleke and Olukanni  
2-Ghannadpour and Zandiyeh  
3-Chenxi Yang , Jianguo Chen  
4-Syed Mithun Ali  
5-Lagrangian Relaxation

جدول ۱- خلاصه تحقیقات پیشین

| مقاله                          | زنجیره تامین |          | تابع هدف |         |            | روش حل یا الگوریتم حل |               | عدم قطعیت |
|--------------------------------|--------------|----------|----------|---------|------------|-----------------------|---------------|-----------|
|                                | باز یافت     | جمع آوری | اقتصادی  | اجتماعی | محیط زیستی | حل با سالور تجاری     | الگوریتم دقیق |           |
| سانتیاز گیلار و همکاران (۲۰۱۲) | -            | *        | *        | -       | -          | *                     | -             | -         |
| حریجانی و همکاران (۱۳۹۶)       | *            | *        | *        | -       | -          | *                     | -             | -         |
| حییبی 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)         | *            | *        | *        | -       | -          | *                     | -             | -         |
| آصفی و همکاران (۲۰۱۹)          | -            | *        | *        | -       | -          | *                     | -             | *         |
| چنکی بانگ و چیانگ گو چن (۲۰۲۰) | -            | *        | *        | -       | -          | *                     | -             | *         |
| زی یوپان و همکاران (۲۰۲۰)      | -            | *        | *        | *       | *          | *                     | -             | -         |
| سید میتون علی و همکاران (۲۰۲۳) | -            | *        | *        | *       | *          | *                     | *             | *         |
| مقاله حاضر                     | *            | *        | *        | *       | *          | *                     | *             | *         |

### مفاهیم اصلی پژوهش

"قانون مدیریت پسماندها" در اردیبهشت ۱۳۸۳ به تصویب رسیده است. این قانون شامل مفاهیمی به شرح ذیل است:

**مفهوم پسماند:** به مواد جامد، مایع و گاز (غیر از فاضلاب) گفته می شود که به طور مستقیم یا غیرمستقیم حاصل از فعالیت انسان بوده و

از نظر تولید کننده، زائد تلقی می شود. پسماندها به پنج گروه تقسیم می شوند:

**پسماندهای عادی:** به کلیه پسماندهایی گفته می شود که به صورت معمول از فعالیتهای روزمره انسانها در شهرها، روستاها و خارج از آنها

تولید می شود، از قبیل زباله های خانگی و نخاله های ساختمانی.

**پسماندهای پزشکی (بیمارستانی):** به کلیه پسماندهای عفونی و زیان آور ناشی از بیمارستانها، مراکز بهداشتی، درمانی، آزمایشگاههای

تشخیص طبی و سایر مراکز مشابه گفته می شود. سایر پسماندهای خطرناک بیمارستانی از شمول این تعریف خارج است.

**کاربرد زنجیره تامین در مدیریت پسماندها:** طبق تحقیقات انجام شده، مدیریت پسماند جامد شهری را می توان به عنوان یک مسئله طراحی

شبکه زنجیره تامین در نظر گرفت (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹).<sup>۱</sup> این شبکه شامل تاسیساتی مانند ایستگاه های جمع آوری پسماند، ایستگاه های انتقال



و تأسیسات بازیافت و دفع است. (حیبی و همکاران، ۲۰۱۷)<sup>۱</sup>. تصمیمات مهمی که برای افزایش راندمان کلی سیستم در این شبکه اتخاذ می شود، شامل شناسایی مکان های بهینه برای تأسیسات مختلف پسماند و تعیین جریان مواد از طریق آنها می شود (پوریانی و همکاران، ۲۰۱۹)<sup>۲</sup>.

چون پارامترها و اطلاعات مورد نیاز در هنگام طراحی شبکه زنجیره تامین پسماند، به طور قطعی در دسترس نمی باشند، لذا طراحی یک زنجیره تامین به شکل قطعی، کارایی آن را در واقعیت کاهش می دهد، بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت در طراحی مدل اجتناب ناپذیر است (رحیمی و قضاواتی، ۱۳۹۷)<sup>۳</sup>.

به توجه به موارد ذکر شده، این تحقیق مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین چند سطحی جمع آوری و بازیافت پسماند های شهری را با لحاظ تفکیک در مبداء و عدم قطعیت در سرانه تولید پسماند توسط شهروندان را ارائه می دهد.

**ضرائب لاگراژ:** ضرایب لاگراژ، نام روشی در بهینه سازی است که برای یافتن بیشینه و کمینه موضعی برای توابع با داشتن یک یا چند قید برابری بکار می رود. این روش به افتخار ژوزف لویی لاگراژ به این نام نام گذاری شده است. با حل موفقیت آمیز مسئله ی فروشنده ی دوره -گرد در سال ۱۹۷۰، که ابعاد آن در مقایسه با قدرت محاسباتی آن زمان بسیار بزرگ بود، آزادسازی ضرایب لاگراژ به عنوان روشی برای به دست آوردن حدود بالا (و پایین) برای مقدار تابع هدف مسائل برنامه ریزی مورد توجه قرار گرفت.

### ابزارها و روش مدل سازی

این پژوهش بدلیل عدم استفاده از تئوری آماری فاقد فرضیه می باشد. پرسش اصلی این پژوهش عبارتست از اینست که چگونه می توان یک مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه سازی مدیریت پسماند های شهری در شرایط عدم قطعیت طراحی نمود بطوریکه بتواند همزمان هزینه ها و مقدار بازیافت را به ترتیب کاهش و افزایش دهد.

بنابراین هدف اصلی پژوهش عبارتست از ارائه مدل ریاضی چندهدفه برای بهینه سازی هزینه های جمع آوری و بازیافت پسماند های شهری و نیز حداکثرسازی میزان بازیافت زباله های شهری است. اولین تابع هدف این مسئله در پی حداقل کردن هزینه های سرمایه گذاری اولیه و نیز هزینه های عملیاتی است و دومین تابع هدف یعنی تابع هدف اجتماعی به دنبال حداکثر کردن میزان بازیافت پسماند های شهری می باشد. به منظور تبدیل مدل چند هدفه از روش اِپسیلون محدودیت استفاده می شود. 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 لاگراژ است، که در

1 -Habibie

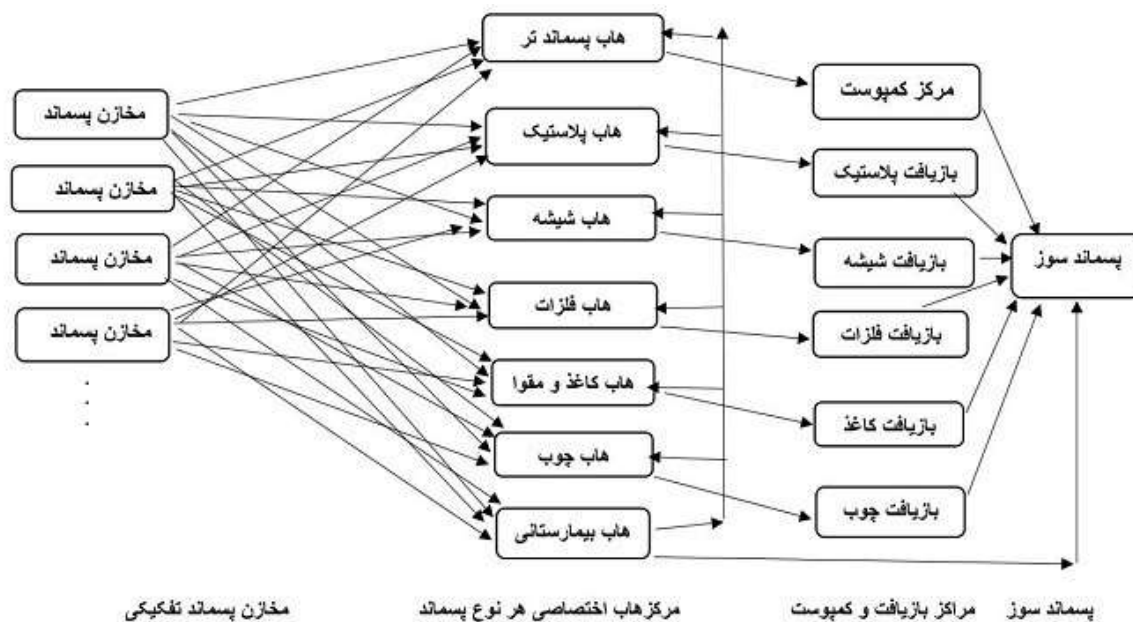
2 -Pouriani

3 -Rahimi and Ghezavati

گروه روش‌های دقیق حل مسئله طبقه بندی می‌شود. در مدل‌های ریاضی ارائه شده برای زنجیره تامین پسماندهای شهری، به مسئله تفکیک از مبدا با لحاظ ایجاد مراکز هاب اختصاصی هر نوع پسماند، توجه چندانی نشده است و لذا تحقیقی که نقاط انتقال یا مراکز هاب در زنجیره تامین مذکور را به صورت تفکیکی و مختص هر نوع پسماند در نظر گرفته باشند، یافت نشد بنابراین تمرکز اصلی این مطالعه بر روی مفروضات جدیدی در سطوح زنجیره تامین پسماند شهری است.

### مفروضات مدل :

- ۱) در این مدل هفت نوع پسماند تفکیک شده 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 لحاظ شده است.
- ۲) در این مسئله جریان مواد تنها می‌تواند بین دو سطح متوالی از لایه‌های شبکه مورد نظر برقرار باشد.
- ۳) مراکز جمع‌آوری پسماند شامل مخازن پسماند در بیمارستان‌ها و نیز مراکز اسکان جمعیت شهری است.
- ۴) مقدار پسماندهای تولیدی در هر منطقه شهری و یا هر بیمارستان بصورت غیر قطعی، چند کالایی و چند دوره ای است.
- ۵) هر منطقه شهری و بیمارستان می‌تواند با یک یا چند مرکز انتقال تخصصی هاب تفکیکی در ارتباط باشد.
- ۶) پسماند تفکیک شده به مراکز هاب منتقل و پس از تفکیک نهایی به مراکز بازیافت یا امحاء منتقل می‌شوند.
- ۷) تعداد و مکان جمع‌آوری پسماندهای شهری و بیمارستان‌ها، مکان‌های کاندید مراکز هاب یا انتقال پسماند ها و نیز مراکز بازیافت و امحاء مشخص است ولی ظرفیت آن‌ها را مدل بر اساس ظرفیت جمعیتی هر منطقه مسکونی تعیین می‌کند و مسئله بصورت بالانس شده در نظر گرفته می‌شود.
- ۸) 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 هاب به پسماندسوزی یا دفن پسماندها مشخص است.
- ۹) هزینه ثابت و عملیاتی هر کدام از مراکز هاب، پسماند سوزی، امحاء، کمپوست و نیز هزینه‌های حمل و نقل به ازای حمل یک واحد پسماند و همچنین نحوه و میزان استقرار جمعیت در هر یک از مناطق مشخص می‌باشند.



شکل ۱ - ارتباط لایه های مدل در شبکه مدیریت پسماند های شهری

۱۰) شبکه زنجیره تامینی که هدف این پژوهش ، به حداقل رساندن هزینه های آن است، دارای ۴ لایه است که شامل لایه مخازن پسماند تفکیکی شهری و بیمارستانی ، لایه مراکز انتقال یا مراکز هاب مستقر در هر منطقه شهرداری ، لایه مراکز بازیافت پسماندهای تفکیکی شهری و لایه مراکز امحاء (دفن یا سوزاندن) پسماند می باشد. مسئله این پژوهش به صورت چندهدفه است. اولین تابع هدف مدل، مجموع هزینه های کلیه فعالیت های جمع آوری، حمل ، بازیافت، ، کمپوست ، سوزاندن و امحاء پسماندها را حداقل می کند و شامل هزینه های ذیل است:

- ۱) هزینه ساخت و نصب مخازن پسماندهای تفکیکی برای جمع آوری و تفکیک همزمان پسماند در مبدا
- ۲) هزینه خرید کامیون های جمع آوری پسماند و نیز کامیون های بزرگ حمل پسماند از مراکز هاب یا انتقال به مراکز بازیافت
- ۳) هزینه ساخت و راه اندازی مراکز هاب یا انتقال
- ۴) هزینه ساخت و راه اندازی مراکز بازیافت
- ۵) هزینه ساخت یا خرید پسماندسوزها
- ۶) هزینه نیروی انسانی ( شامل هزینه نیروی انسانی در بخشهای حمل و راننده ها ، جمع آوری پسماندها، کارگری مراکز هاب یا انتقال، کارگری مراکز بازیافت و کارگری مراکز امحاء یا کمپوست

- (۷) هزینه سوخت مصرفی در مسیر جمع آوری و نیز حمل پسماندهای تفکیکی به مراکز بازیافت پسماند ها به ازای هر واحد پسماند
- (۸) هزینه های عملیاتی در مراکز مختلف (شامل هزینه انرژی یا سوخت مصرفی برای بازیافت، تفکیک و سوزاندن یک واحد پسماند)
- در این مسئله سرانه تولید پسماند هر شهروند، بعنوان پارامتر قطعی لحاظ شده است. این تحقیق با توجه به اهداف خود، بدنبال 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 جمع آوری پسماند را توسعه داده اند، که بعنوان مدل پایه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

### اندیس

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| $i$ | اندیس مربوط به نوع زباله            |
| $j$ | اندیس مربوط به مناطق جمع آوری زباله |
| $k$ | اندیس مربوط به مکان کاندید هاب      |
| $t$ | اندیس مربوط به دوره های زمانی       |
| $s$ | اندیس مربوط به سناریو               |
| $m$ | اندیس مربوط به نوع خودرو            |

### پارامترها

|            |   |
|------------|---|
| $w_{ijt}$  | میزان زباله نوع $i$ تولید شده در ناحیه $j$ در دوره زمانی $t$                      |
| $CH_i$     | ظرفیت هاب های تفکیکی نوع $i$  |
| $CW_i$     | ظرفیت سطل زباله تفکیکی نوع $i$  |
| $CV_m$     | ظرفیت خودرو حمل زباله نوع $m$   |
| $FCH_{ik}$ | هزینه ثابت تاسیس هاب تفکیکی نوع $i$ در مکان $k$                                   |
| $VCH_{ik}$ | هزینه متغیر سرمایه گذاری تاسیس هاب تفکیکی نوع $i$ در مکان $k$ به ازای هر تن ظرفیت |
| $FCW$      | هزینه ثابت خرید سطل زباله تفکیکی به ازای هر تن ظرفیت                              |

|             |  |
|-------------|--|
| $VCR_i$     | هزینه متغیر سرمایه گذاری ایجاد مرکز بازیافت زباله نوع $i$ به ازای هر تن ظرفیت      |
| $VCL$       | هزینه متغیر سرمایه گذاری تاسیس مرکز زباله سوزی به ازای هر تن ظرفیت                 |
| $FCV_m$     | هزینه ثابت خرید خودرو حمل زباله نوع $m$  |
| $OCH$       | هزینه عملیاتی در هاب ها  |
| $OCR$       | هزینه عملیاتی در مراکز بازیافت   |
| $OCL$       | هزینه عملیاتی در مراکز زباله سوزی  |
| $TC$        | هزینه حمل و نقل (به ازای هر کیلومتر)   |
| $EC_i$      | هزینه کارگری برای جمع آوری، تفکیک و بازیافت پسماند نوع $i$                         |
| $Pop_j$     | جمعیت ناحیه $j$  |
| $d_{jk}$    | فاصله ناحیه شهر $j$ تا مرکز تفکیکی $k$   |
| $d_{kk'}$   | فاصله مرکز تفکیکی $k$ تا مرکز تفکیکی $k'$  |
| $dl_i$      | فاصله مرکز بازیافت زباله نوع $i$ تا مرکز زباله سوز                                 |
| $d_{kk'}$   | فاصله مرکز تفکیکی $k$ تا مرکز تفکیکی $k'$  |
| $d_{ki}$    | فاصله مرکز تفکیکی $k$ تا مرکز بازیافت زباله نوع $i$                                |
| $dl_k$      | فاصله مرکز تفکیکی $k$ تا مرکز زباله سوز  |
| $\gamma_i$  | ضریب تبدیل برای بازیافت زباله نوع $i$  |
| $\lambda_i$ | ضریب تفکیک زباله بیمارستانی به زباله نوع $i$                                       |
| $a_{1ik}$   | پارامتر نشانگر که در صورتی یک می شود که بتوان زباله $i$ را به هاب $k$ ارسال کرد    |
| $a_{2jk}$   | پارامتر نشانگر در صورتی یک می شود که بتوان زباله ناحیه $j$ را به هاب $k$ ارسال کرد |

|             |  |
|-------------|--|
| $M$         | عدد بزرگ   |
|             | <b>متغیرهای تصمیم</b>  |
| $x_{ijkt}$  | میزان زباله نوع $i$ ارسال شده از ناحیه $j$ به هاب $k$ در دوره $t$  |
| $y_{ikt}$   | مقدار زباله $i$ ارسال شده از هاب تفکیکی $k$ به مراکز بازیافت در دوره $t$ (برای زباله بیمارستانی: مقدار زباله ارسال شده از هاب تفکیکی به مرکز زباله‌سوزی) |
| $g_{ikk't}$ | مقدار زباله نوع $i$ که از هاب بیمارستانی $k$ (بعد از تفکیک اولیه) به هاب تخصصی $k'$ مربوط به زباله $i$ ارسال می‌شود                                      |
| $y'_{ikt}$  | مقدار کالا بازیافتی تولید شده از زباله نوع $i$ در زمان $t$   |
| $L_{ikt}$   | مقدار پسماند نوع $i$ که از هاب $k$ مستقیماً به مراکز زباله‌سوزی ارسال می‌شود   |
| $g'_{ikt}$  | میزان زباله نوع $i$ که از هاب $k$ به مرکز بازیافت ارسال شده ولی قابل بازیافت نبوده-<br>است   |
| $NW_i$      | تعداد سطل زباله نوع $i$  |
| $NV_i^m$    | تعداد خودرو نوع $m$ برای حمل زباله نوع $i$   |
| $CapH_i^k$  | ظرفیت هاب مخصوص زباله نوع $i$ در منطقه کاندید $k$  |
| $CR_i$      | ظرفیت مرکز بازیافت زباله نوع $i$   |
| $CL$        | ظرفیت مرکز زباله‌سوزی  |
| $Z_{ik}$    | متغیر صفر و یک، اگر هاب تخصصی زباله $i$ در ناحیه $k$ تاسیس شود یک است در غیراینصورت صفر می‌شود.  |

$$\text{Min } F1 = FC + OC + TrC \quad (1)$$

$$\begin{aligned} FC = \sum_i \sum_k (FCH_{ik}Z_{ik} + VCH_{ik}CapH_i^k) \quad (2) \\ + VCL * CL \\ + \sum_i VCR_i CR_i \\ + \sum_i \sum_m FCV_m * NV_i^m \\ + \sum_i FCW * NW_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} OC = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t OCH * X_{ijkt} \quad (3) \\ + \sum_{i \neq 1} \sum_k \sum_t OCR * y'_{ikt} \\ + \sum_k \sum_t OCL * y_{1kt} \\ + \sum_i \sum_k \sum_t (L_{ikt} + g'_{ikt}) * OCL \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TrC = & \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t (TC * d_{jk} \\
 & + EC_i) X_{ijkt} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_{k'} \sum_t (TC * d_{kk'} \\
 & + EC_i) g_{ikk't} + \sum_i \sum_k \sum_t (TC \\
 & * dl_k + EC_i) L_{ikt} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t (TC * dl_i \\
 & + EC_i) g'_{ikt} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t (TC * d_{ki} + EC_i) y_{ikt}
 \end{aligned} \tag{۴}$$

$$Max F2 = \sum_i \sum_k \sum_t y'_{ikt} \tag{۵}$$

$$\sum_j x_{ijkt} \leq CapH_i^k \tag{۶}$$

$$CapH_i^k \leq CH_i Z_{ik} \tag{۷}$$

$$Z_{ik} \leq a1_{ik} \tag{۸}$$

$$x_{ijkt} \leq w_{ijt} a2_{jk} \tag{۹}$$

$$y_{ikt} + L_{ikt} = \sum_j x_{ijkt} + \sum_{k'} g_{ik'kt} \tag{۱۰}$$

$$y_{1kt} = \lambda_1 \sum_j x_{1jkt} \tag{۱۱}$$

$$\sum_{k'} g_{ikk't} = \lambda_i \sum_j x_{1jkt} \tag{۱۲}$$

$$g_{ikk't} \leq M * Z_{ik'} \tag{۱۳}$$

$$\sum_k y'_{ikt} \leq CR_i \tag{۱۴}$$



$$y'_{ikt} = \gamma_i y_{ikt} \quad (15)$$

$$y_{ikt} - y'_{ikt} = g'_{ikt} \quad (16)$$

$$\sum_k x_{ijkt} = w_{ijt} \quad (17)$$

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

$$\sum_j \sum_k x_{ijkt} \leq CW_i NW_i \quad (19)$$

$$\sum_j \sum_k x_{ijkt} + \sum_k g'_{ikt} \leq CV_1 * NV_i^1 \quad (20)$$

$$\sum_k (y_{ikt} + L_{ikt}) + \sum_k \sum_{k'} g_{ikk't} \leq CV_2 * NV_i^2 \quad (21)$$

$$\sum_k y_{1kt} + \sum_i \sum_k g'_{ikt} + \sum_i \sum_k L_{ikt} \leq CL \quad (22)$$

### روش لاگرانژ و اپسیلون محدودیت

در سال های اخیر مدل های برنامه ریزی ریاضی که عملکرد سیستم های مدیریت پسماند را از طریق بهینه سازی مکان تأسیسات و نیز تخصیص تسهیلات به یکدیگر ، بهبود می دهند توسعه یافته اند. در این مطالعه از روش های آزاد سازی لاگرانژ و متد اپسیلون محدودیت برای حل مدل استفاده می شود. در این روش از ساختار اصلی مسائل ، برای به دست آوردن حد پایین مقدار بهینه تابع هدف استفاده می شود. در روش آزاد سازی لاگرانژ ، یک یا چند محدودیت سخت به تابع هدف منتقل می شود. ( این کار در اصطلاح ، آزاد کردن محدودیت ها نامیده می شود) منظور از محدودیت سخت ، محدودیتی است که حل مسئله را دشوار می کند . محدودیت های سخت معمولاً دارای متغیرهای باینری یا عدد صحیح هستند.

مسئله آزاد شده، با استفاده از الگوریتم ساب گرادینت حل می شود تا حد پایین یا بالای مناسبی برای جواب بهینه مسئله بدست آید. (ال مارشال، ۲۰۰۱). نمایش کلی مدل سازی به روش اپسیلون محدودیت برای یک مسئله چندهدفه با توابع هدف کمینه سازی به صورت رابطه ۲۳ می باشد.

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(x) & \quad (23) \\ \text{subject to: } f_2(x) \leq \varepsilon_1, f_3(x) \leq \varepsilon_3, \dots, f_n(x) \leq \varepsilon_n, x \in \text{Feasible} \end{aligned}$$

در رابطه فوق محدودیت های اپسیلون برای یک مسئله بیشینه سازی به صورت بزرگ تر مساوی می باشد. برای به دست آوردن جواب های پارتو مختلف باید سمت راست این محدودیت ها یعنی  $\varepsilon$  را تغییر داد. برای تبدیل مسئله این تحقیق به مسئله ای تک هدفه تابع هدف مربوط به حداکثر سازی تعداد محصولات باز یافتی را به محدودیت ها انتقال می دهیم. این محدودیت به صورت رابطه ۲۴ می باشد. با این توضیحات تابع هدف اول مسئله که مربوط به کمینه سازی هزینه ها می باشد بعنوان تابع هدف اصلی انتخاب می شود.

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

به کمک مقادیر به دست آمده از مرحله قبل بازه تغییر هر یک از توابع هدف را بدست می آورند. اگر مقادیر بیشینه و کمینه توابع هدف را به ترتیب با  $f_p^{max}$  و  $f_p^{min}$  بنامیم، آنگاه بازه تغییر هر یک از آن ها به صورت عبارت ۲۵ محاسبه می شود:

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

پس از محاسبه بازه تغییر برای هر تابع هدف، بازه تغییر آن یعنی  $r_p$  به  $q_p$  بازه تقسیم می شود. سپس برای  $\varepsilon_p$  در رابطه زیر می توان به تعداد  $q_p + 1$  مقدار مختلف که از فرمول ۲۶ محاسبه می شوند، به دست آورد.

$$\varepsilon_p^k = f_p^{max} - \frac{r_p}{q_p} \times k \quad k = 0, 1, \dots, q_p \quad (26)$$

در رابطه فوق  $k$  شماره نقطه جدید مربوط به  $\varepsilon_p$  را نشان می دهد. به کمک روش اپسیلون محدودیت مسئله بهینه سازی چندهدفه فوق را می توان به  $q_p + 1$  تعداد زیر مسئله بهینه سازی تک هدفه تبدیل کرد. هر زیر مسئله دارای فضای جواب شدنی است با توجه به اینکه توسط نامساوی های مرتبط با توابع هدف  $f_2, \dots, f_p$  محدودتر نیز خواهد شد. هر زیر مسئله منجر به یک جواب پارتو برای مسئله بهینه سازی چندهدفه مورد نظر می شود. همچنین ممکن است به ازای برخی از  $\varepsilon$  ها برخی از زیر مسائل فضای غیر شدنی ایجاد کنند. نهایتاً

پس از به دست آمدن جبهه پارتوی بهینه تصمیم گیرنده می تواند مناسب ترین جواب از نظر خود را انتخاب کنند.

### مطالعه موردی ، تحلیل یافته ها و نتایج

با توجه به وضعیت فعلی شهر کرج میزان پسماند تولیدی این شهر ، بعنوان پارامتر " میزان پسماند تولیدی " انتخاب گردید . گستردگی مناطق شهری باعث شده است تا شهر کرج به ۱۰ منطقه شهرداری تقسیم گردد.



شکل ۲: مناطق شهرداری در شهر کرج

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.

جدول ۲ - درصد تولید اجزای پسماندهای خانگی

| ترکیب فیزیکی پسماند | میانگین درصد وزنی در کشور | درصد وزنی در پسماند تهران |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| پسماند تر (آلی)     | ٪۷۲.۰۴                    | ٪۷۴.۵۶                    |
| پلاستیک             | ٪۷.۷۷                     | ٪۶.۲۵                     |
| کاغذ مقوا           | ٪۶.۴۳                     | ٪۵.۰۴                     |
| منسوجات             | ٪۲.۸۶                     | ٪۳.۲۹                     |
| فلزات               | ٪۲.۵۲                     | ٪۲.۴۸                     |
| شیشه                | ٪۲.۰۳                     | ٪۲.۰۳                     |
| لاستیک              | ٪۱.۱۴                     | ٪۱.۱۱                     |
| چوب                 | ٪۱.۱                      | ٪۱.۸۲                     |
| دیگر مواد           | ٪۴.۱۱                     | ٪۳.۴۲                     |

برای تعداد و مکان های کاندید هاب های تفکیکی محدودیت های 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 تاسیس هاب دارند، که مدل تنها یک نقطه از این سه نقطه را بعنوان هاب تخصصی انتخاب می کند. عبارت دیگر برای این ۴ نوع پسماند فقط ۴ نقطه بعنوان 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 تاسیس هاب تفکیکی و نیز تعداد نقاط انتخابی برای تاسیس آنها بیشتر خواهند بود. به این منظور شهر کرج به ۴ بخش تقسیم و در هر بخش ۳ نقطه کاندید برای هر یک از هاب های تخصصی پسماندهای نوع ۵، ۶ و ۷ کاندید. برای این نوع پسماندها (پسماندهای تر، کاغذی و پلاستیکی) دیگر محدودیتی برای تعداد تاسیس هاب تفکیکی در نظر گرفته نشده است و با توجه به داده های ورودی به مدل، برای هر نوع پسماند، از یک تا سه نقطه در هر بخش بعنوان هاب تفکیکی هر نوع پسماند انتخاب می شوند. 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 شده ای ندارد و لذا مدل، ظرفیت هر مرکز هاب را، بعنوان یک متغیر تصمیم تعیین خواهد کرد. برای هر نوع از مراکز بازیافت و امحاء تنها یک مکان کاندید لحاظ شده است و لذا محدودیتی برای ظرفیت مراکز بازیافت و امحاء لحاظ نگردیده است. تعیین جمعیت مناطق کرج در سال ۱۴۲۰ از اطلاعات سرشماری سال ۱۳۹۵ و رابطه ۲۷ استفاده شد. هزینه کارگری جمع آوری برای پسماندهای غیر بیمارستانی بر اساس داده های شهرداری تهران برای سال های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در مدل لحاظ گردید.

$${}^{25} (1/0.65) * \text{جمعیت در سال } 1395 = \text{جمعیت در سال } 1420$$

جدول ۳- برآورد جمعیت شهرستان کرج در سال ۱۴۲۰

| منطقه شهرداری         | 1         | 2       | 3       | 4       | 5         |
|-----------------------|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| جمعیت در سال ۱۳۹۵     | ۱۲۸.۹۴۳   | ۹۷.۵۰۰  | ۹۷.۶۸۱  | ۲۰۲.۰۰۰ | ۲۲۵.۰۰۰   |
| برآورد جمعیت سال ۱۴۲۰ | ۶۲۲.۴۹۸   | ۴۷۰.۷۰۰ | ۴۷۱.۵۴۷ | ۹۷۵.۱۹۵ | ۱.۰۸۶.۲۳۲ |
| منطقه شهرداری         | ۶         | ۷       | ۸       | ۹       | ۱۰        |
| جمعیت در سال ۱۳۹۵     | ۲۴۵.۰۰۰   | ۱۹۵.۰۰۰ | ۱۴۰,۴۵۴ | ۱۷۵.۰۰۰ | ۸۷.۰۲۶    |
| برآورد جمعیت سال ۱۴۲۰ | ۱.۱۸۲.۷۸۶ | ۹۴۱.۴۰۱ | ۶۷۸.۵۰۹ | ۸۴۴.۸۴۷ | ۴۲۰.۱۳۵   |

جدول ۴- مقادیر اپسیلون تابع هدف دوم

| $k$ | $\epsilon_k^2$ |
|-----|----------------|
| ۱   | ۱,۷۵۲,۵۵۷      |
| ۲   | ۱,۷۹۳,۹۶۴      |
| ۳   | ۱,۸۳۵,۳۷۱      |
| ۴   | ۱,۹۱۸,۱۸۸      |

جدول ۵ - مقادیر توابع هدف به ازای اپسیلون های متفاوت

| شماره مسئله | مقدار تابع هدف دوم (تن) | مقدار تابع هدف اول (میلیون تومان) |
|-------------|-------------------------|-----------------------------------|
| ۱           | ۱,۷۵۲,۵۵۷               | ۲۴۱,۱۷۹                           |
| ۲           | ۱,۷۹۳,۹۶۴               | ۲۴۱,۹۱۸                           |
| ۳           | ۱,۸۳۵,۳۷۱               | ۲۴۴,۶۴۰                           |
| ۴           | ۱,۹۱۸,۱۸۸               | ۲۵۰,۱۴۰                           |

طبق جدول شماره ۵ با افزایش میزان بازیافت هزینه های سرمایه گذاری به علت نیاز به زیرساخت های بیشتر برای مراکز بازیافت افزایش یافته اند. مقادیر اپسیلون بر اساس رابطه ۲۶ محاسبه و در جدول ۴ آورده شده اند. در چهار مثال حل شده، در سه مورد اول ۲۵ هاب تفکیکی تاسیس می شود، که در جدول ۸ تعداد و مکان هر کدام به تفکیک مناطق شهر کرج نشان داده شده است. در مورد چهارم ۲۴ هاب تفکیکی ایجاد شده است که یک هاب تفکیکی برای زباله پلاستیکی می باشد. دلیل این موضوع مرتبط با تابع هدف هزینه ها است، زیرا با افزایش میزان بازیافت سرمایه گذاری در بخش بازیافت افزایش می یابد، در تمامی مسائل حل شده تعداد کل مخازن پسماند تفکیکی برای جمع - آوری برابر با ۵۱۵۶۰ شد.

جدول ۶- نتایج حل با روش لاگراژ

| روش حل            | تابع هدف اصلی (تومان) | گپ بهینگی (درصد) | زمان حل (ثانیه) |
|-------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| سیپلکس (Cplex)    | ۱۶,۷۴۸,۹۶۲,۹۷۷        | ۰                | ۱۵۵             |
| آزادسازی لاگراژ   | ۱۶,۷۴۸,۸۳۱,۶۶۶        | تقریباً صفر      | ۱۲۰             |
| آزادسازی عدد صحیح | ۱۶,۶۰۴,۸۶۷,۷۶۰        | ۰,۸۶             | ۲۱۰             |

جدول ۷- هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی و حمل و نقل

| هزینه‌ها (میلیون تومان) |              |         |           |
|-------------------------|--------------|---------|-----------|
| شماره مسئله             | سرمایه‌گذاری | عملیاتی | حمل و نقل |
| ۱                       | ۱۲۱,۱۱۵      | ۲,۸۷۶   | ۱۱۷,۱۵۳   |
| ۲                       | ۱۲۱,۱۷۹      | ۲,۸۵۵   | ۱۱۷,۲۷۲   |
| ۳                       | ۱۲۴,۴۵۶      | ۲,۸۱۷   | ۱۱۷,۳۶۸   |
| ۴                       | ۱۲۹,۷۷۹      | ۲,۷۴۲   | ۱۱۷,۶۱۸   |

از دیگر متغیرهایی که با افزایش میزان بازیافت تغییر می‌کنند، تعداد و ظرفیت مراکز بازیافت است، که روند صعودی خواهند داشت. مقایسه دو مسئله ۱ و ۴ از لحاظ میزان بازیافت و تعداد مراکز بازیافت در جدول ۹ نشان داده شده است. میزان ارسال زباله بیمارستانی از هاب بیمارستانی به دیگر هاب‌های تفکیکی، تعداد کامیون‌های انتقال زباله از هاب به مراکز بازیافت و زباله‌سوز و نیز تعداد مراکز جمع‌آوری پسماند (مخازن زباله) با تغییر میزان بازیافت تغییر نمی‌کنند.

جدول ۸- محل ایجاد مراکز هاب اختصاصی هر نوع زباله (نقاط انتقال زباله)

| نوع هاب                 | منطقه ایجاد هاب |
|-------------------------|-----------------|
| هاب زباله بیمارستانی    | ۹               |
| هاب زباله شیشه‌ای       | ۶               |
| هاب زباله فلزی          | ۶               |
| هاب زباله چوبی          | ۶               |
| هاب زباله تر بخش ۱      | ۱ و ۱۰          |
| هاب زباله پلاستیک بخش ۱ | ۱ و ۱۰          |

مدل ریاضی چند هدفه برای بهینه سازی مدیریت پسماند های شهر (مورد مطالعه : شهر کرج)

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| ۱۰ و ۱    | هاب زیاله کاغذ بخش ۱    |
| ۸         | هاب زیاله تر بخش ۲      |
| ۸         | هاب زیاله پلاستیک بخش ۲ |
| ۹         | هاب زیاله کاغذ بخش ۲    |
| ۶         | هاب زیاله تر بخش ۳      |
| ۶         | هاب زیاله پلاستیک بخش ۳ |
| ۶         | هاب زیاله کاغذ بخش ۳    |
| ۵ و ۴ و ۳ | هاب زیاله تر بخش ۴      |
| ۵ و ۴ و ۳ | هاب زیاله پلاستیک بخش ۴ |
| ۵ و ۴ و ۳ | هاب زیاله کاغذ بخش ۴    |

جدول ۹ - ظرفیت مراکز بازیافت

| نوع پسماند | ظرفیت مرکز (تن در سال) |      |      |        |          | مقوایی |
|------------|------------------------|------|------|--------|----------|--------|
|            | شیشه‌ای                | فلزی | چوبی | تر     | پلاستیکی |        |
| مسئله ۱    | ۰                      | ۴۱۸۵ | ۱۷۷۱ | ۱۳۰۸۸۴ | ۰        | ۹۲۰۵   |
| مسئله ۴    | ۲۵۴۲                   | ۴۱۸۵ | ۱۷۷۱ | ۱۳۰۸۸۴ | ۱۸۲۲۹    | ۹۲۰۵   |

جدول ۱۰ - تعداد مخازن تفکیکی پسماند و تعداد کامیون مورد نیاز برای جمع آوری پسماند

| نوع پسماند          | ظرفیت روزانه مرکز بازیافت (تن) | تعداد مخازن پسماند | تعداد کامیون جمع آوری | تعداد کامیون کشته ارسال پسماند |
|---------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------|
| پسماند بیمارستانی   | -                              | ۷۳                 | ۲                     | ۱                              |
| پسماند شیشه‌ای      | ۱۰۴                            | ۱۳۵۲               | ۳۳                    | ۸                              |
| پسماند فلزی         | ۱۷۵                            | ۱۶۷۸               | ۳۳                    | ۱۰                             |
| پسماند چوبی         | ۷۲                             | ۷۳۳                | ۱۵                    | ۵                              |
| پسماند تر           | ۵۲۷۹                           | ۴۷۹۴۹              | ۸۸۰                   | ۲۶۵                            |
| پسماند پلاستیکی     | ۴۵۷                            | ۵۹۳۱               | ۱۴۲                   | ۳۳                             |
| پسماند کاغذی و مقوا | ۳۷۶                            | ۴۲۸۰               | ۹۵                    | ۲۴                             |

## بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش علاوه بر مفهوم بازیافت، مفهوم هاب تفکیکی نیز در طراحی زنجیره تامین در نظر گرفته شد. بمنظور صحت سنجی مدل، یک مطالعه موردی در شهر کرج انجام گرفت و نتایج آن نیز ارائه گردید. در این پژوهش، مشاهده شد که روش آزادسازی لاگرانژ در مقایسه با حل کننده سیپلکس، قادر است مسائل در مقیاس های بزرگتر را با دقت مناسب و در زمانی کمتر حل کند. نوآوری های این تحقیق شامل توسعه مدل زنجیره تامین جمع آوری و بازیافت پسماند، در نظر گرفتن هاب های تفکیکی اختصاصی برای هر نوع زباله، استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل و مطالعه موردی شهر کرج است. مدل در مطالعه موردی توانست ظرفیت روزانه مورد نیاز مراکز بازیافت، تعداد کامیون های مورد نیاز برای جمع آوری پسماندهای موجود در مخازن، تعداد کامیون مورد نیاز برای ارسال زباله از مراکز هاب به مراکز بازیافت، مراکز دفن و مراکز پسماند سوزی و همچنین تعداد مخازن مورد نیاز برای جمع آوری پسماندها را با صرف حداقل هزینه تعیین نماید. روش آزادسازی لاگرانژ در مدت ۱۲۰ ثانیه، حل کننده تجاری CPLEX در مدت ۱۵۵ ثانیه و روش آزاد سازی عدد صحیح در مدت ۲۱۰ ثانیه مدل را حل کردند. علاوه بر این مقدار گپ بهینگی در دو روش حل مدل با حل کننده تجاری و روش لاگرانژ تقریباً صفر بود ولی مدت زمان حل مدل با حل کننده تجاری بیشتر از روش لاگرانژ بود. گپ بهینگی در روش آزاد سازی عدد صحیح ۸۶٪ بود. از متغیرهایی که با افزایش میزان بازیافت تغییر می کنند، تعداد و ظرفیت مراکز بازیافت است، که روند صعودی داشته اند. همچنین هزینه های حمل و نقل نیز با افزایش میزان بازیافت روند صعودی دارد. با توجه به کمتر بوده هزینه های عملیاتی بازیافت به زباله-سوزها، در روند افزایش میزان بازیافت، هزینه های عملیاتی کاهش می یابد، اما با توجه به این که این میزان نسبت به افزایش سایر هزینه ها ناچیز است، با افزایش میزان بازیافت هزینه کلی نیز افزایش می یابد. همچنین با در نظر گرفتن شبکه زنجیره تامین جمع آوری و بازیافت ارائه شده در این تحقیق و نیز با توجه به بررسی های انجام شده در ادبیات موضوع پژوهش می توان موضوعاتی نظیر مسیریابی حرکت کامیونهای جمع آوری و حمل پسماند، برنامه ریزی تولید و انبار برای مراکز بازیافت، استفاده از روش های حل ابتکاری و فرا ابتکاری که برای حل مدل با روش های حل دقیق دیگر مانند آزادسازی لاگرانژ ترکیب شده اند، در نظر گرفتن توابع هدف محیط زیستی مانند کاهش آلودگی در فرآیند حمل و بازیافت پسماند و لحاظ عدم قطعیت در میزان پسماند و ظرفیت تسهیلات را پیشنهاد نمود.



- Akbarpour Shirazi, M., Samieifard, R., Abduli, M. A. & Omidvar, B. 2016. J Environ Health Sci Eng. ; 14: 8 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 . <https://civilica.com/doc/839534> (In persian)
- Bakıcı, T., Almirall, E., Wareham, J., 2013. A smart city initiative: The case of Barcelona . Journal of the Knowledge Economy 4(2), 135–148. Candanedo, DOI: 10.1007/s13132-012-0084-9
- 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, 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, 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), 1e16.] 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. 2001, 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, 545-567. DOI:10.1111/itor.12452
- lukanni, D. O. 2020. Facility location problems: models, techniques, and applications in waste management. Recycling, 5, 10. DOI:10.3390/recycling5020010
- Mathematical modeling in municipal solid waste management: case study of Tehran. Journal of Environmental Health Science and Engineering 2016 May 14, 1-12. DOI:10.1186/s40201-016-0250-2
- Mavrotas, George. Effective implementation of the  $\epsilon$ -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-Gangra, 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, 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 EghtesadOnline: <https://www.eghtesadonline.com/n/1nVc> " Garbage turnover in Iran " , 2019, In Persian  
Retrieved from Mashreghnews : [www.mashreghnews.ir/947927](http://www.mashreghnews.ir/947927) " How much waste is produced in Iran? " , 2020 , 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.
- Syed, M. A., Amir M., F.-F., Rashik, A., & Kuan, Y. W. (2023). A multi-objective closed-loop supply chain under uncertainty: An efficient Lagrangian relaxation reformulation using a neighborhood- based algorithm . Journal of Cleaner Production, Volume 423.
- Yang, C., & Chen, J. (2020). Robust design for a multi-echelon regional construction and demolition waste reverse logistics network based on decision Maker's conservative attitude. Journal of Cleaner Production 273.