



Presenting a Multi-Objective Mathematical Model to Design a Green Reverse Logistics System Considering Energy Recovery

Mohammad Shabangiz ^a, Iman Heydari ^a, Seyed Amirhossein Hashemi Foroushani^a,
Alireza Goli ^{a*}

^a Department of Industrial Engineering and Future Studies, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: ShabAngiz M, Heydari I, Hashemi Foroushani S A, Goli A, Presenting a Multi-Objective Mathematical Model to Design a Green Reverse Logistics System Considering Energy Recovery. *Industrial Innovations*. 2024;1(4):387-408.

 <https://doi.org/10.61186/jii.1.4.387>

KEYWORDS

Reverse Logistics;
Supply Chain Network Design;
Multi-objective Planning;
Environmental Responsibility.

ABSTRACT

The paper presents a new mathematical model for the design of a general reverse logistics network. This model minimizes system operating costs and environmental impacts through multi-objective mixed integer programming. Due to the importance of reverse logistics in waste management, the goals of this mathematical model include minimizing the costs of the logistics system and reducing the emission of environmental pollutants. In the reverse logistics system, the processes of collection, restoration, recycling, energy recovery and disposal of used products operate as an independent network. This system examines the physical flow from consumers to primary suppliers and includes the process of designing, implementing, controlling and maintaining the flow of raw materials, parts, finished products, inventories and funds. In order to solve this mathematical model, the normalized weighted sum method has been applied. The results of solving the mathematical model show that by changing the weight of the objectives, the first objective function has a decreasing trend and the second objective function has an increasing trend, which confirms the conflict between the objectives of the mathematical model. The use of this model in organizations leads to better use of resources and providing better services to customers. It also creates a better public image for companies by emphasizing environmental responsibilities.

Extended Abstract

1. Purpose

Reverse logistics can help reduce the costs of collecting and processing waste materials. It can also help ensure that waste materials are effectively recycled or reused. In recent decades, much research has been conducted on the economic and environmental benefits of reuse and recycling. This research has shown that reuse and recycling can have significant benefits for companies, communities and the environment. Due to the importance of reuse and recycling, these issues have become important topics in scientific and industrial research. Future research in this area can help develop new and more efficient methods for reuse and recycling.

2. Design/methodology/approach

In this paper, a new mathematical model for designing and planning a general reverse logistics network is presented. In addition to minimizing system operating costs and environmental impacts, this model also minimizes carbon emissions related to transportation and processing of used products. Also, this model minimizes the rate of resource exploitation with

* Corresponding author.

E-mail address: goli.a@eng.ui.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.61186/jii.1.4.387>

Received: January 23, 2024; Received in revised form: February 14, 2024; Accepted: February 20, 2024.

Article type: Research Paper

©Author



the aim of reducing resource waste in landfills. In other words, this model provides a balance between two contradictory goals with the aim of optimizing economic and environmental sustainability in the reverse logistics process. This new approach not only helps to improve the economic performance of the reverse logistics system, but also takes an important step towards preserving and improving the environment.

3. Findings

In this section, the effect of changing the values of different parameters on the value of the objective function is investigated and it is shown how much each parameter affects the objective function. The parameters that are investigated in this section are: the sensitivity of the required amount of used products, the percentage of product consumed with respect to reuse in plant p, the percentage of product consumed according to the reuse in factory p in Figure 1 and finally the percentage of the product consumed according to the recycling in the factory r. It is presented in Figure 1.

In this regard, the results related to the sensitivity analysis of the required amount of use of the used products in Figure 1, the parameter of the percentage of the product consumed according to the reuse in factory p in Figure 1 and finally the percentage of the product consumed according to the recycling in the factory r. It is presented in Figure 1.

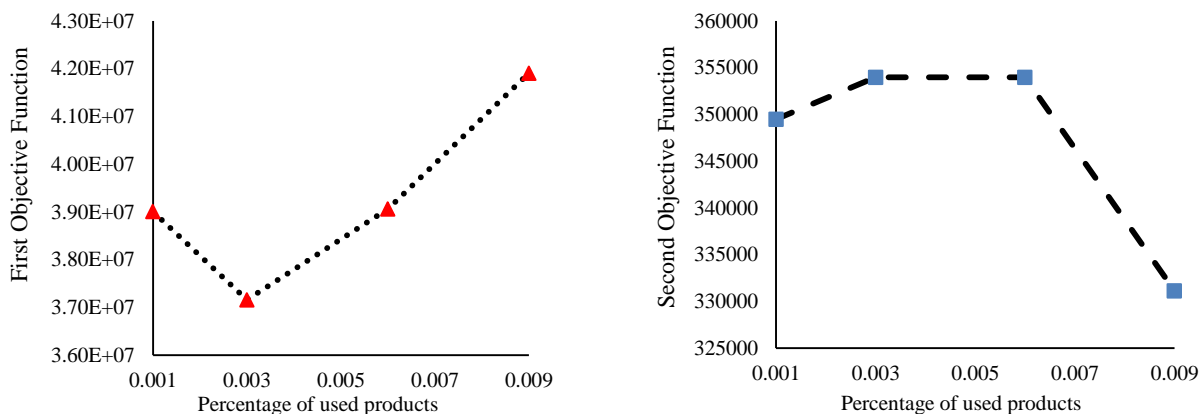


Figure 1 Sensitivity analysis of required usage of used products

4. Research limitations/implications

According to the sensitivity diagram in Figure 3, the analysis indicates that increasing the consumption rate of collection centers by a small amount does not lead to productivity costs and waste is transferred to collection centers in a smaller amount. This will reduce costs. However, as the consumption rate increases to a greater extent, it can be seen that the collection centers are not able to respond to the large volume of produced waste and are forced to build more collection centers. This leads to an increase in system cost. With the increase in the consumption rate, there is a need to transfer more waste, which results in an increase in environmental pollution from the transfer of waste. As more waste increases, system costs increase and system capacity fills up quickly. As a result, the system is no longer able to respond and sending new garbage is not possible.

5. Practical implications

Optimal transportation planning plays an important role in minimizing system operating costs and reducing environmental impacts. Increasing resource utilization rates increases operating costs, but at the same time reduces carbon emissions. These results show that the effort to optimize the reverse logistics system by more investment and productivity in processing technology can lead to a reduction in carbon emissions and a reduction in operating costs.

In addition, the results of solving the model show that by optimally integrating the use of resources with the reduction of environmental effects, it is possible to advance environmental and economic issues at the same time. The results of the model show that it is possible to prevent the construction of additional facilities and prevent the wastage of resources and take the optimal path in the supply chain.

6. Originality/value

In recent decades, modern approaches in reverse logistics management have been developed in order to achieve higher productivity of products and reduce environmental impacts caused by production and consumption processes. The article focuses on two main objective functions, i.e. minimizing reverse logistics costs and reducing carbon emissions from transportation. And the transfer of used products has been evaluated. Using inappropriate methods in recycling and reusing products may lead to secondary pollution; therefore, in the structure of a reverse logistics system, the attitude to environmental issues is very important. In this article, the analysis of the environmental impact with carbon emissions from the processing and transportation processes of consumer products was discussed. In sum, this article points out the importance of planning an environmentally compatible reverse procurement system and shows that the optimal integration of resource use with reducing environmental impacts can simultaneously advance environmental and economic issues.



ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه به منظور طراحی سیستم لجستیک معکوس سبز با در نظر گرفتن بازیابی انرژی

محمد شبانگیز^{الف}، ایمان حیدری^{الف}، سید امیرحسین هاشمی فروشانی^{الف}، علیرضا گلی^{الف*}

^{الف} گروه مهندسی صنایع و آینده پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده	واژگان کلیدی
مقاله یک مدل ریاضی نوین برای طراحی و برنامه‌ریزی یک شبکه لجستیک معکوس عمومی ارائه کرده است. این مدل، از طریق برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه، به حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی سیستم و تأثیرات زیست‌محیطی می‌پردازد. به دلیل اهمیت لجستیک معکوس در مدیریت زباله‌ها، اهداف این مدل ریاضی شامل حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم لجستیک و کاهش میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌باشد. در سیستم لجستیک معکوس، فرآیندهای جمع‌آوری، بازسازی، بازیافت، بازیابی انرژی و دفع محصولات مورد استفاده به صورت یک شبکه مستقل عمل می‌کنند. این سیستم جریان فیزیکی از مصرف‌کنندگان به سمت تأمین‌کنندگان اولیه را مورد بررسی قرار می‌دهد و دربرگیرنده فرآیند طراحی، اجرا، کنترل و حفظ جریان مواد خام، قطعات، محصولات نهایی، موجودی‌ها و سرمایه‌ها می‌باشد. به منظور حل این مدل ریاضی از روش ترکیب وزنی نرمالایز شده استفاده شده است. نتایج حاصل از حل مدل ریاضی نشان می‌دهد که با تغییر وزن اهداف، تابع هدف اول روند کاهشی و تابع هدف دوم روند افزایشی داشته که تأییدکننده تعارض بین اهداف مدل ریاضی می‌باشد. استفاده از این مدل در سازمان‌ها به استفاده بهتر از منابع و ارائه خدمات بهتر به مشتریان منجر می‌شود. همچنین با تأکید بر مسئولیت‌های زیست‌محیطی، تصویر عمومی بهتری برای شرکت‌ها ایجاد می‌کند.	لجستیک معکوس؛ طراحی شبکه زنجیره تأمین؛ برنامه‌ریزی چند هدفه؛ مسئولیت زیست‌محیطی
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

۱- مقدمه

در چشم‌انداز فعلی مدیریت زنجیره تأمین، ضرورت استفاده از منابع و بازیافت به طور فزاینده‌ای برجسته شده است. ادغام فعال این شیوه‌ها در زنجیره‌های تأمین متنوع نه تنها نوید بهینه‌سازی کارایی اقتصادی را می‌دهد، بلکه باعث تقویت پایداری از طریق تهیه مواد اولیه مقرون‌به‌صرفه می‌شود. این تغییر پارادایم به سمت اقتصادهای دایره‌ای با توجه به چالش‌های معاصر مرتبط با کمبود منابع و تخریب محیط‌زیست بسیار مهم است [۱].

مزایای چندوجهی استفاده مجدد از منابع، بازسازی و بازیافت در دهه‌های اخیر مورد توجه تحقیقات گسترده قرار گرفته است. محققین و متخصصان به طور یکسان به مزایای اقتصادی ناشی از استفاده کارآمد از منابع پرداخته‌اند و بر پتانسیل کاهش هزینه و افزایش سودآوری در کل زنجیره تأمین تأکید کرده‌اند. علاوه بر این، پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های لجستیک معکوس، یکی از اجزای اصلی بازیافت منابع، توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است. محققان تلاش کرده‌اند تا چارچوبی

جامع برای ارزیابی و کاهش ردپای اکولوژیکی مرتبط با این فعالیت‌ها تدوین کنند [۲].

از نظر زیست‌محیطی، استفاده مجدد و بازیافت می‌تواند منجر به کاهش آلودگی هوا، آب‌و خاک شوند. استفاده مجدد می‌تواند از دفن زباله جلوگیری کند که می‌تواند باعث تولید گازهای گلخانه‌ای و انتشار مواد سمی شود. بازیافت نیز می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفاظت از منابع طبیعی کمک کند [۲].

لجستیک معکوس می‌تواند به کاهش هزینه‌های جمع‌آوری و پردازش مواد پسماند کمک کند. همچنین می‌تواند به اطمینان از اینکه مواد پسماند به‌طور موثری بازیافت یا استفاده مجدد می‌شوند، کمک کند. در دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی در مورد مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده مجدد و بازیافت انجام شده است. این تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده مجدد و بازیافت می‌تواند مزایای قابل توجهی برای شرکت‌ها، جوامع و محیط‌زیست داشته باشند. با توجه به اهمیت استفاده مجدد و بازیافت، این موضوعات به موضوعاتی مهم در تحقیقات علمی و صنعتی تبدیل شده‌اند. تحقیقات آینده در این زمینه می‌تواند به توسعه روش‌های جدید و کارآمدتر برای استفاده مجدد و بازیافت کمک کند.

در این مقاله، یک مدل ریاضی نوین برای طراحی و برنامه‌ریزی یک شبکه لجستیک معکوس عمومی ارائه شده است. این مدل علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی سیستم و تأثیرات زیست‌محیطی، به کمینه‌سازی انتشار کربن مرتبط با حمل‌ونقل و پردازش محصولات مورد استفاده نیز می‌پردازد. همچنین، این مدل نرخ بهره‌برداری از منابع را باهدف کاهش اتلاف منابع در محل‌های دفن زباله به حداقل می‌رساند. به عبارت دیگر، این مدل تعادل بین دو هدف متناقض را باهدف بهینه‌سازی پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی در فرآیند لجستیک معکوس فراهم می‌کند. این رویکرد نوین نه تنها به بهبود عملکرد اقتصادی سیستم لجستیک معکوس کمک می‌کند بلکه در جهت حفظ و بهبود محیط‌زیست نیز گام مهمی برمی‌دارد.

در ادامه مقاله و در بخش دوم به مرور ادبیات تحقیق پرداخته می‌شود. در بخش سوم مدل ریاضی پیشنهادی ارائه شده و سپس در بخش چهارم نتایج عددی حاصل از بهینه‌سازی مدل ارائه شده و در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی تحقیق ارائه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

گوویندان و همکاران در سال ۲۰۱۴ مقاله‌ای با یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با ادغام پایداری در تصمیم‌گیری، در توزیع در یک شبکه زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی (SCN) پیشنهاد کرده‌اند. مقاله یک مسئله مسیریابی مکان دوطبقه با پنجره‌های زمانی (E-LRPTW2) برای پایداری معرفی می‌کند. طراحی SCN و بهینه‌سازی اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در یک SCN مواد غذایی فاسدشدنی. هدف E-LRPTW2 تعیین تعداد و مکان امکانات و بهینه‌سازی مقدار محصولات تحویل شده به مراحل و مسیرهای پایین‌تر در هر سطح است. همچنین هدف آن کاهش هزینه‌های ناشی از ردپای کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر شبکه است. روش پیشنهادی شامل یک رویکرد ترکیبی چندهدفه جدید به نام MHPV، ترکیبی از دو الگوریتم چندهدفه شناخته شده است [۳].

مارکو بورتولینی و همکاران در سال ۲۰۱۸ مقاله‌ای باهدف طراحی یک شبکه زنجیره تأمین از جمله بهترین انتخاب ظرف بسته‌بندی، محل نگهداری/جابجایی گره و تخصیص جریان طراحی کرده‌اند. مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه از فرآیند تصمیم‌گیری پشتیبانی می‌کند. علیرغم کلی بودن رویکرد، تمرکز عمیق بر زنجیره توزیع میوه و سبزیجات تازه است زیرا ظروف بسته‌بندی یکبار مصرف و قابل استفاده مجدد در عمل همزیستی دارند. این مدل به حداقل رساندن هزینه و اثرات زیست‌محیطی در کل شبکه نگاه می‌کند که مرز پارتو را دریافت می‌کند و از مدیران لجستیک، متخصصان صنعتی و سیاست‌گذاران در طراحی و مدیریت شبکه حمایت می‌کند [۴].

هارابک در سال ۲۰۱۹ یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط قوی برای پشتیبانی تصمیم‌گیری مدیریت پسماند پیشنهاد کرد. سلسله‌مراتب تصفیه زباله، موقعیت تاسیسات، تولید نامشخص زباله، مدل‌سازی تولید زباله و حمل‌ونقل زباله همگی در مدل گنجانیده شده‌اند. نوآوری مقاله از ترکیب جنبه‌های قیمت‌گذاری و تبلیغات در پیش‌گیری و بازیافت زباله،

کاربرد متغیرهای SOS1 و SOS2 برای خطی سازی، اجرای مجموعه‌های عدم قطعیت بیضوی با پارامتر ایمن‌سازی متغیر، و اجرای مدل در زبان برنامه‌نویسی جولیا گرفته‌شده است [۵]. گائو در سال ۲۰۱۹ به طراحی جدید یک شبکه لجستیک معکوس هیبریدی با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و محیطی در میان عدم قطعیت‌های ذاتی پرداخت. این مطالعه بازسازی امکانات موجود در مراکز پردازش ترکیبی برای تجهیزات مشترک و کاهش انتشار کربن را پیشنهاد کرد، درحالی‌که چالش‌هایی مانند تقاضای نامشخص و بازده محصول را تأیید می‌کرد. برای پرداختن به این عدم قطعیت‌ها، تحلیل سناریو به کار گرفته شد، و انتشار کربن در سراسر زنجیره تأمین در نظر گرفته شد. به‌طور کلی، این مقاله یک رویکرد امیدوارکننده برای طراحی شبکه پایدار با پتانسیل تصمیم‌گیری عملی ارائه می‌دهد [۶].

شی در سال ۲۰۲۰ یک زنجیره تأمین حلقه بسته جدید برای زباله‌های ساختمانی و تخریب (CDW^۱) پیشنهاد کرد که تدارکات روبه‌جلو و معکوس را با مراکز دفع متعدد یکپارچه کرد. برای افزایش بازیافت و کاهش انتشار کربن، سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن و تجارت کربن در سیستم اعمال شد. یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP^۲) برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی تحت سیاست‌های کربن مذکور به کار گرفته شد. یک مطالعه موردی دنیای واقعی از چین، کاربرد روش را نشان داد، درحالی‌که تجزیه و تحلیل سناریو، تأثیر سیاست‌های مختلف کربن بر تصمیمات دفع CDW را بررسی کرد و توصیه‌های سیاستی برای مدیریت مؤثر CDW ارائه کرد [۷]. گوان و یانگ در سال ۲۰۲۰ یک مدل شبکه لجستیک معکوس را برای باتری‌های برق مورد استفاده تحت حالت بازیابی شخص ثالث پیشنهاد کردند. این مدل با توجه به تغییرات در استفاده از وسایل نقلیه انرژی جدید، روش‌های مختلف بازیابی توان باتری را در نظر گرفته است. همچنین تأثیر منفی باتری‌های برقی استفاده‌شده را بر ساکنان و جامعه در طول فرآیند بازیافت در نظر گرفته است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی دو هدفه بهینه باهدف بهبود مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی ایجاد شد. سپس مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تست و اعتبارسنجی شد [۸].

ژو در سال ۲۰۲۳ یک رویکرد جدید برای طراحی شبکه بازیافت زباله‌های پزشکی شهری ارائه کرد که ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی تولید زباله را در نظر گرفته و بارگذاری مطمئن وسایل نقلیه را تضمین می‌کرد. یک مدل بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه‌های کلی توسعه داده‌شده است، درحالی‌که به‌صورت استراتژیک محل نقاط جمع‌آوری، مدیریت استفاده از وسایل نقلیه و بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل را تعیین می‌کند. نوآوری کلیدی در الگوریتم MACO - GKA بود که به‌طور مؤثر بهینه‌سازی کلونی مورچگان را با خوشه‌بندی میانگین K^۳ و الگوریتم‌های ژنتیک ترکیب کرد. مطالعات موردی در شهر زوزو چین، اثربخشی این رویکرد را نشان داد و کاهش هزینه قابل توجهی را در مقایسه با روش‌های سنتی نشان داد. این مطالعه دیدگاه‌های ارزشمندی را برای بهبود مدیریت پسماند پزشکی و حفاظت از سلامت عمومی از طریق یک شبکه قابل‌اطمینان و کارآمد ارائه کرد [۹]. فان در سال ۲۰۲۳ یک مدل جدید شبکه لجستیک معکوس تصادفی (SRLN^۴) را برای باتری‌های وسایل نقلیه الکتریکی (WEVB^۵) ارائه داد که گزینه‌های بازیافت چندگانه، تکنولوژی‌های بازسازی چندگانه و انواع متعدد باتری را در نظر گرفت. این مدل هزینه‌های اقتصادی و انتشار کربن را تحت یک محیط فازی کامل به حداقل رساند. نویسندگان یک روش فازی تعاملی با کنترل اولویت برای بهبود قابلیت حل و به دست آوردن راه‌حلی که تصمیم‌گیرنده را از طریق تعامل مداوم راضی می‌کند توسعه دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مدل SRLN با ترکیب انتشار کربن، می‌تواند به‌طور قابل توجهی انتشار کربن در شبکه را از طریق یک افزایش اندک در هزینه ساخت شبکه اولیه کاهش دهد [۱۰]. ژو در سال ۲۰۲۳ مدلی را برای طراحی یک شبکه لجستیک معکوس سودآور و سازگار با محیط‌زیست برای بسته‌های سازگار با محیط‌زیست معرفی کرد. این مدل مکان‌های ایستگاه بهینه، استفاده از وسایل نقلیه، و انگیزه‌ها برای به حداکثر رساندن سود و کاهش انتشار کربن، با در نظر گرفتن احتمال بازگشت مشتری، انتشار حمل‌ونقل، و یک الگوریتم MOHGATS

¹ construction and demolition waste

² Mixed-Integer Nonlinear Programming

³ K-means clustering

⁴ sustainable reverse logistics network

⁵ waste electric vehicle batteries

جدید برای یافتن راه‌حل‌های بهینه را در نظر می‌گیرد. آزمایش‌ها و یک مطالعه موردی، اثربخشی مدل را در تعادل اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تأیید کردند [۱۱]. او در سال ۲۰۲۳ مدل یادگیری مرجع وظیفه میزبان چند زمانه (MAHOP^۱) را برای پیش‌بینی دقیق حجم‌های بازگشت WEEE^۲ معرفی کرد. سه برج اختصاصی در این مدل برای استخراج ویژگی‌های مشترک چند زمانی از داده‌های سری زمانی در انواع مختلف WEEE به کار گرفته می‌شوند. مقیاس‌های زمانی متنوع توسط برج‌های مختلف تهیه می‌شوند، با تصدیق تغییرپذیری در اینکه چگونه دسته‌های WEEE متمایز به ویژگی‌های زمانی مختلف بستگی دارند. علاوه بر این، یک استراتژی یادگیری وظیفه - میزبان رأی‌گیری و یک تابع زیان ترجیح داده - میزبان توسط MAHOP برای اطمینان از پیش‌بینی عادلانه در تمام انواع WEEE استفاده می‌شود. سرعت بهینه یادگیری برای وظیفه میزبان از طریق رویکرد نظرسنجی فعال می‌شود، درحالی‌که یادگیری متعادل در میان وظایف مهمان در طول آموزش همزمان تسهیل می‌شود. علاوه بر این، اولویت‌بندی یادگیری هر وظیفه میزبان توسط تابع زیان ترجیحی میزبان هدایت می‌شود. برتری MAHOPs نسبت به مدل‌های پایه از طریق ارزیابی داده‌های بازده WEEE جهان واقعی نشان داده شد [۱۲]. مجزی و اسپچیا در سال ۲۰۲۳ بر موضوع حیاتی مدیریت و تصفیه زباله‌های پزشکی تمرکز کردند. اهمیت تفکیک درست و طبقه‌بندی زباله‌های پزشکی برای تصفیه مؤثر و ایمن در کار آن‌ها مورد تأکید قرار گرفته است. استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته مانند استریلیزاسیون میکروویو و پلیمریزاسیون معکوس در این مقاله به‌عنوان ابزاری برای پردازش کارآمد زباله‌های پزشکی توصیه می‌شود. علاوه بر این، پتانسیل فن‌آوری‌های زباله به انرژی (WtE^۳) به‌عنوان یک راه‌حل دوگانه برای تصفیه زباله و تولید انرژی در زمینه مدیریت زباله پزشکی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳].

لی در سال ۲۰۲۴ بر عملیات پیچیده یک مرکز بازیابی محصول، به‌ویژه جمع‌آوری هم‌زمان محصولات، جدا کردن آن‌ها از مواد خام، و تحویل بعدی آن‌ها به کارخانه‌های تولید مجدد تمرکز کرد. این مرکز با ناوگان وسایل نقلیه یکسان در اختیار خود، باهدف بهینه‌سازی تصمیمات مونتاژ، مدیریت موجودی، و مسیریابی وسیله نقلیه برای حداکثر بهره‌وری، طراحی شده است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای نشان دادن مساله فرمول‌بندی شد، سپس یک رویکرد اکتشافی دوفازی تقویت‌شده با جستجوی تابو، یک مکانیسم یادگیری، و اپراتورهای حذف جدید دنبال شد. آزمایش گسترده در دنیای واقعی و داده‌های شبیه‌سازی شده، توانایی قابل توجه روش برای تولید سریع راه‌حل‌های باکیفیت بالا را نشان می‌دهد، که راه را برای چرخه عمر محصول کارآمدتر و پایدارتر هموار می‌کند [۱۴]. خلاصه تحقیقات مرور شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱ خلاصه مقالات مرور شده

ردیف	نویسنده	نوع تابع هدف	بررسی انرژی	تنوع زباله	روش حل
۱	(Govindan et al, 2014)	هزینه/زیست‌محیطی	x	✓	تقریبی
۲	(Bortolini et al, 2018)	هزینه/زیست‌محیطی	✓	✓	قطعی
۳	(Hrabec et al, 2019)	هزینه	✓	✓	قطعی
۴	(Gao, 2019)	سود/زیست‌محیطی	✓	x	تقریبی
۵	(Shi et al, 2020)	هزینه/زیست‌محیطی	x	x	قطعی
۶	(Guan et al, 2020)	هزینه/اجتماعی	x	x	تقریبی
۷	(Xu et al, 2023)	هزینه	✓	✓	تقریبی
۸	(Fan et al, 2023)	هزینه/زیست‌محیطی	✓	✓	تقریبی
۹	(Zhou et al, 2023)	سود/زیست‌محیطی	x	x	تقریبی
۱۰	(Wu et al, 2024)	زیست‌محیطی	x	✓	تقریبی
۱۱	(Mazzei & Specchia, 2023)	زیست‌محیطی	x	✓	تقریبی
۱۲	(Lei et al, 2023)	هزینه	x	x	تقریبی

¹ Multi-Time Scale Aware Host Task Preferred Learning

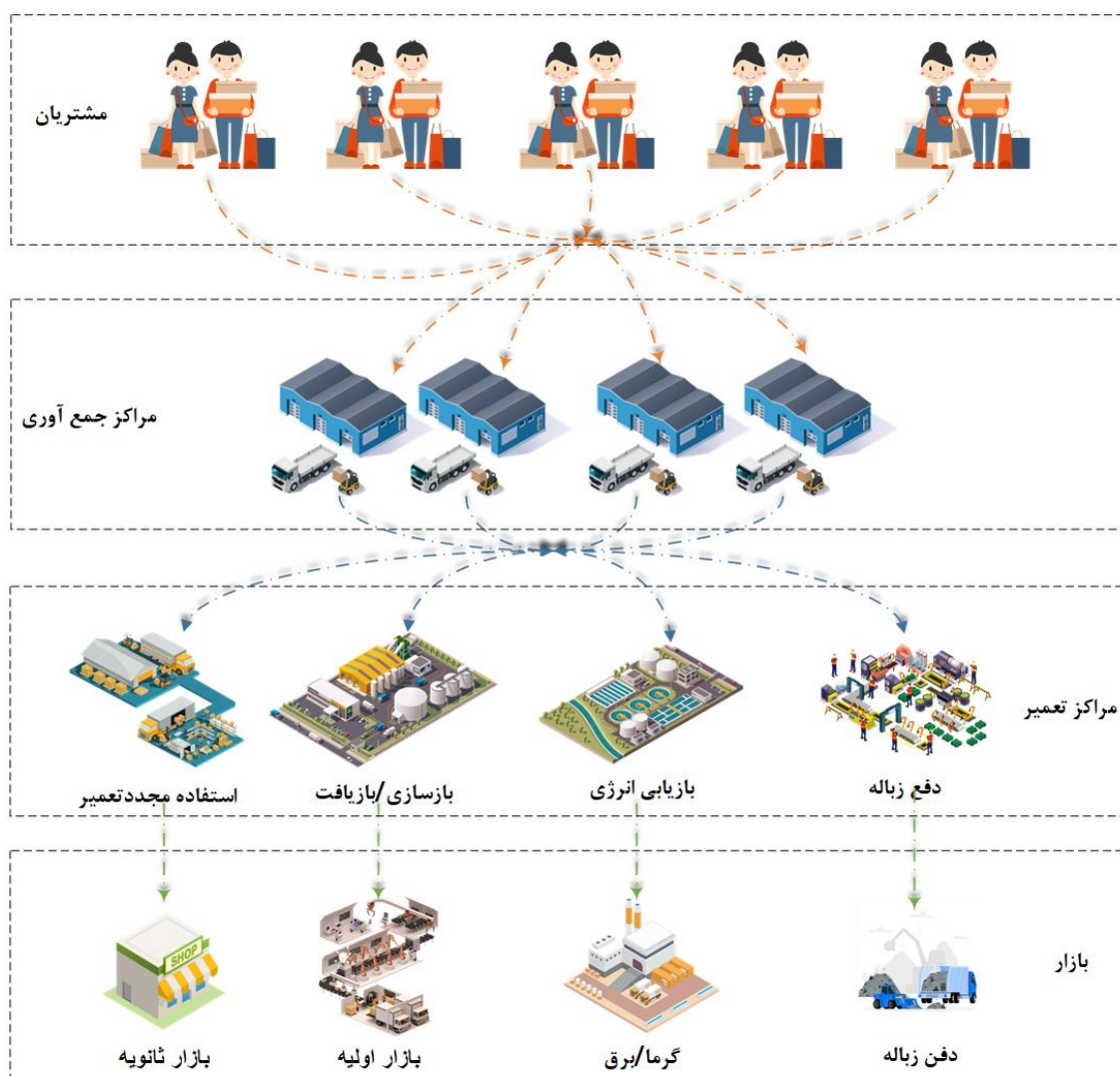
² waste of electronic and electrical equipment

³ waste-to-energy

۳- شرح مسئله

در این قسمت، یک شبکه زنجیره و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به‌منظور بهبود فرآیند برنامه‌ریزی سیستم لجستیک معکوس ارائه شده است.

در سیستم لجستیک معکوس، محصولات مصرفی از مشتریان نهایی جمع‌آوری، بازرسی، مونتاژ می‌شوند و در نهایت برای استفاده مجدد از اجزا، بازیافت مواد، بازیابی انرژی و دفع مناسب توزیع می‌شوند. این شبکه عمومی لجستیک معکوس از چهار سطح مشتریان، مراکز جمع‌آوری، مراکز پردازشی و بازارها تشکیل شده است که در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱ سطوح زنجیره تأمین

در مرحله اولیه، محصولات مصرفی توسط مشتریان بازگردانده یا توسط ارائه‌دهندگان خدمات شخص ثالث در مراکز جمع‌آوری می‌شوند. این مراکز علاوه بر بازرسی و مونتاژ، محصولات را برای پردازش‌های بازیافتی به کارخانه‌های پایین‌دست ارسال می‌کنند.

چهار نوع مرکز برای قطعات و اجزای محصولات مصرفی در نظر گرفته شده است: تعمیر و استفاده مجدد، بازیابی و بازیافت، بازیابی انرژی و دفع زباله. بازارهای هدف هر یک از این مراکز نیز مشخص شده است. اجزای استفاده شده و تعمیر شده عمدتاً در بازارهای ثانویه به فروش می‌رسند، در حالی که مواد و اجزای بازیافتی و بازیافت شده اصولاً در بازار اولیه مورد استفاده

قرار می‌گیرند.

برای قطعات و اجزایی که برای بازیافت و استفاده مجدد مناسب نیستند، به منظور بازیابی انرژی یا دفع در محل دفن زباله، از کارخانه‌های زباله‌سوز استفاده می‌شود. انرژی بازیابی شده نیز می‌تواند به منظور تولید برق و گرما مورد استفاده قرار گیرد.

در این راستا، مفروضات مدل ریاضی به شرح زیر می‌باشد.

- تعداد و مکان مشتریان و بازارها ثابت است.
- مکان‌های پیشنهادی برای مراکز جمع‌آوری، کارخانه تعمیر، کارخانه بازسازی، کارخانه سوزاندن، و محل دفن زباله به از قبل تعیین شده‌اند.
- پارامترهای هزینه، نیازمندی‌های تسهیلات بالاتر و پایین‌تر، نرخ تبدیل، عوامل انتشار کربن و دیگر پارامترهای ضروری در دوره مورد مطالعه ثابت است.
- انتشار کربن از مراکز جمع‌آوری به دلیل تأثیر محدود آن نسبت به سایر تجهیزات فرآوری در نظر گرفته نمی‌شود.
- ارسال مستقیم محصولات مصرفی از مشتریان به امکانات درمانی امکان‌پذیر نمی‌باشد.
- محصولات مصرفی را می‌توان با نرخ ثابت تعمیر، بازسازی، و به صورت قابل بازیافت مدیریت کرد.
- تمام محصولات تعمیر و بازسازی شده، بسته به نوع مراکز درمانی، می‌توانند در بازارهای اولیه و ثانویه به فروش برسند.
- جریانات مواد بین مراکز مختلف سطوح زنجیره و نظریه‌های جداگانه برای هر یک از مراکز سطح ۴ زنجیره که شامل بازار اولیه، بازار ثانویه، مراکز دفن و مراکز تولید برق و گرما می‌شود را در نظر می‌گیرد.

۳-۱- مدل سازی ریاضی

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

مشتریان	$C = \{1, 2, \dots, C\}$	$c \in C$
مراکز جمع‌آوری	$O = \{1, 2, \dots, O\}$	$o \in O$
مراکز پردازشی تعمیر و استفاده مجدد	$P = \{1, 2, \dots, P\}$	$p \in P$
مراکز پردازشی بازیافت و ساخت مجدد	$R = \{1, 2, \dots, R\}$	$r \in R$
مراکز پردازشی بازیابی انرژی	$I = \{1, 2, \dots, I\}$	$i \in I$
مراکز پردازشی دفع زباله	$L = \{1, 2, \dots, L\}$	$l \in L$
بازارهای اولیه	$A = \{1, 2, \dots, A\}$	$a \in A$
بازارهای ثانویه	$B = \{1, 2, \dots, B\}$	$b \in B$
بازارهای الکتریسیته و گرما (انرژی)	$E = \{1, 2, \dots, E\}$	$e \in E$
محل‌های دفن زباله	$G = \{1, 2, \dots, G\}$	$g \in G$
مجموعه مراکز (تسهیلات)	$X = \{o, p, r, i, l\}$	$x \in X$

پارامترها

هزینه‌های عملیاتی ثابت در مراکز X	F_x
هزینه‌های پردازش واحد محصولات در مراکز X	V_x
هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز C به O	Tco_{co}
هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز O به P	Top_{op}
هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز O به R	Tor_{or}
هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز O به I	Toi_{oi}

هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز o به l	Tol_{ol}
هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز p به a	Tpa_{pa}
هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز r به b	Trb_{rb}
هزینه‌های حمل‌ونقل/انتقال واحد محصولات از مرکز l به g	Tlg_{lg}
هزینه‌های انتقال واحد برق/گرما بین زباله‌سوز i و بازار e	$ELCie_{ie}$
سود فروش واحد محصولات انتقالی از مرکز p به a	Ppa_{pa}
سود فروش واحد محصولات انتقالی از مرکز r به b	Prb_{rb}
سود فروش واحد محصولات انتقالی از مرکز l به g	Plg_{lg}
سود فروش واحد محصولات انتقالی از مرکز i به e	Pie_{ie}
نرخ تبدیل محصولات در مراکز $x \in X \setminus \{o\}$	$TETA_x$
نشانگر انتشار کربن ثابت در مراکز $x \in X \setminus \{o\}$	CaE_x
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز c به o	$Caco_{co}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز o به p	$Caop_{op}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز o به r	$Caor_{or}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز o به i	$Caio_{oi}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز o به l	$Caol_{ol}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز p به a	$Capa_{pa}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز r به b	$Carb_{rb}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز l به g	$Calg_{lg}$
نشانگر انتشار کربن در انتقال‌ها از مرکز i به e	$Caie_{ie}$
فاصله مرکز c تا o	Sco_{co}
فاصله مرکز o تا p	Sop_{op}
فاصله مرکز o تا r	Sor_{or}
فاصله مرکز o تا i	Soi_{oi}
فاصله مرکز o تا l	Sol_{ol}
فاصله مرکز p تا a	Spa_{pa}
فاصله مرکز r تا b	Srb_{rb}
فاصله مرکز l تا g	Slg_{lg}
فاصله مرکز i تا e	Sie_{ie}
فرکانس حمل‌ونقل از مرکز c به o	$FRco_{co}$
فرکانس حمل‌ونقل از مرکز o به p	$FRop_{op}$
فرکانس حمل‌ونقل از مرکز o به r	$FRor_{or}$
فرکانس حمل‌ونقل از مرکز o به i	$FRoi_{oi}$

فرکانس حمل و نقل از مرکز o به l	$FRol_{ol}$
فرکانس حمل و نقل از مرکز p به a	$FRpa_{pa}$
فرکانس حمل و نقل از مرکز r به b	$FRrb_{rb}$
فرکانس حمل و نقل از مرکز l به g	$FRLg_{lg}$
فرکانس حمل و نقل از مرکز i به e	$FRie_{ie}$
درصد محصول استفاده شده با توجه به استفاده مجدد در مراکز $x \in X \setminus \{o\}$	$GAMA_x$
نرخ تولید محصولات استفاده شده مشتریان مجموعه c	$BETA_c$
نرخ مصرف مورد نیاز از محصولات استفاده شده	$RATE$
حد پایین مورد نیاز محصولات تسهیلات مراکز x	LO_x
حد بالای مورد نیاز محصولات تسهیلات مراکز x	UP_x
حداکثر تعداد تسهیلات مراکز x	NU_x
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز c به o	$TETco_{co}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز o به p	$TETop_{op}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز o به r	$TETor_{or}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز o به i	$TEToi_{oi}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز o به l	$TETol_{ol}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز p به a	$TETpa_{pa}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز r به b	$TETrb_{rb}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز l به g	$TETlg_{lg}$
ظرفیت وسیله حمل و نقل مسیر مرکز i به e	$TETie_{ie}$

متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم باینری در صورت احداث (۱) و عدم احداث (۰) تسهیلات مراکز مجموعه x در مکان‌های

Q_x	کاندید
$Acoco$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز c به o
$Aopop$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز o به p
$Aoror$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز o به r
$Aiooi$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز o به i
$Aolol$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز o به l
$Apapa$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز p به a
$Arbrb$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز r به b
$Alglg$	تعداد محصولات منتقل شده از مسیر مرکز l به g
$Vieie$	میزان الکتریسیته و گرمای منتقل شده از مسیر مرکز i به e

مدل سازی مسئله موجود به شرح زیر می باشد:

$$\begin{aligned}
 MinCost = & \left(\sum_{o \in O} F_o Q_o + \sum_{p \in P} F_p Q_p + \sum_{r \in R} F_r Q_r + \sum_{i \in I} F_i Q_i + \sum_{l \in L} F_l Q_l \right) + \left(\sum_{o \in O} V_o \sum_{c \in C} Aco_{co} \right. \\
 & + \sum_{p \in P} V_p \sum_{o \in O} Aop_{op} + \sum_{r \in R} V_r \sum_{o \in O} Aor_{or} + \sum_{i \in I} V_i \sum_{o \in O} Aoi_{oi} + \sum_{l \in L} V_l \sum_{o \in O} Aol_{ol} \\
 & + \left(\sum_{c \in C} \sum_{o \in O} Tco_{co} Aco_{co} + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} Top_{op} Aop_{op} + \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} Tol_{ol} Aol_{ol} \right. \\
 & + \sum_{o \in O} \sum_{r \in R} Tor_{or} Aor_{or} + \sum_{o \in O} \sum_{i \in I} Toi_{oi} Aoi_{oi} + \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} Tpa_{pa} Apa_{pa} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} Trb_{rb} Arb_{rb} + \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} Tlg_{lg} Alg_{lg} + \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} Elcie_{ie} Vie_{ie} \\
 & - \left(\sum_{p \in P} \sum_{a \in A} Ppa_{pa} TETA_p \sum_{o \in O} Aop_{op} + \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} Prb_{rb} TETA_r \sum_{o \in O} Aor_{or} \right. \\
 & \left. + \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} Plg_{lg} TETA_l \sum_{o \in O} Aol_{ol} + \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} Pie_{ie} TETA_i \sum_{o \in O} Aoi_{oi} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 Min Carbon E = & \left(\sum_{p \in P} CaE_p \sum_{o \in O} Aop_{op} + \sum_{r \in R} CaE_r \sum_{o \in O} Aor_{or} + \sum_{i \in I} CaE_i \sum_{o \in O} Aoi_{oi} \right. \\
 & + \sum_{l \in L} CaE_l \sum_{o \in O} Aol_{ol} \left. \right) + \left(\sum_{c \in C} \sum_{o \in O} Caco_{co} Sco_{co} FRco_{co} \right. \\
 & + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} Caop_{op} Sop_{op} FRop_{op} + \sum_{o \in O} \sum_{r \in R} Caor_{or} Sor_{or} FRor_{or} \\
 & + \sum_{o \in O} \sum_{i \in I} Caoi_{oi} Soi_{oi} FROI_{oi} + \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} Caol_{ol} Sol_{ol} FROL_{ol} \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} Capa_{pa} Spa_{pa} FRpa_{pa} + \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} Carb_{rb} Srb_{rb} FRrb_{rb} \\
 & \left. + \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} Calg_{lg} Slg_{lg} FRlg_{lg} + \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} Caie_{ie} Sie_{ie} FRie_{ie} \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\left(\sum_{c \in C} BETA_c - \sum_{l \in L} \sum_{o \in O} Aol_{ol} \right) / \sum_{c \in C} BETA_c \geq RATE \tag{3}$$

$$\sum_{c \in C} Aco_{co} \geq LO_o Q_o, \forall o \in O \tag{4}$$

$$\sum_{o \in O} Aop_{op} \geq LO_p Q_p, \forall p \in P \tag{5}$$

$$\sum_{o \in O} Aor_{or} \geq LO_r Q_r, \forall r \in R \tag{6}$$

$$\sum_{o \in O} Aoi_{oi} \geq LO_i Q_i, \forall i \in I \tag{7}$$

$$\sum_{o \in O} Aol_{ol} \geq LO_l Q_l, \forall l \in L \tag{8}$$

$$\sum_{c \in C} Aco_{co} \leq UP_o Q_o, \forall o \in O \tag{9}$$

$$\sum_{o \in O} Aop_{op} \leq UP_p Q_p, \forall p \in P \tag{10}$$

$$\sum_{o \in O} Aor_{or} \leq UP_r Q_r, \forall r \in R \tag{11}$$

$$\sum_{o \in O} Aoi_{oi} \leq UP_i Q_i, \forall i \in I \tag{12}$$

$$\sum_{o \in O} Aol_{ol} \leq UP_l Q_l, \forall l \in L \tag{13}$$

$$\sum_{o \in O} Q_o \leq NU_o \quad (14)$$

$$\sum_{p \in P} Q_p \leq NU_p \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} Q_i \leq NU_i \quad (16)$$

$$\sum_{l \in L} Q_l \leq NU_l \quad (17)$$

$$\sum_{r \in R} Q_r \leq NU_r \quad (18)$$

$$\sum_{o \in O} Aco_{co} = BETA_c, \forall c \in C \quad (19)$$

$$\sum_{c \in C} Aco = \sum_{p \in P} Aop_{op} + \sum_{r \in R} Aor_{or} + \sum_{i \in I} Aoi_{oi} + \sum_{l \in L} Aol_{ol}, \forall o \in O \quad (20)$$

$$\sum_{p \in P} Aop_{op} \leq GAMA_p \sum_{c \in C} Aco_{co}, \forall o \in O \quad (21)$$

$$\sum_{r \in R} Aor_{or} \leq GAMA_r \sum_{c \in C} Aco_{co}, \forall o \in O \quad (22)$$

$$\sum_{i \in I} Aoi_{oi} \leq GAMA_i \sum_{c \in C} Aco_{co}, \forall o \in O \quad (23)$$

$$\sum_{l \in L} Aol_{ol} \leq GAMA_l \sum_{c \in C} Aco_{co}, \forall o \in O \quad (24)$$

$$GAMA_p + GAMA_r + GAMA_l + GAMA_i \leq 1 \quad (25)$$

$$\sum_{a \in A} Apa_{pa} = TETA_p \sum_{o \in O} Aop_{op}, \forall p \in P \quad (26)$$

$$\sum_{b \in B} Arb_{rb} = TETA_r \sum_{o \in O} Aor_{or}, \forall r \in R \quad (27)$$

$$\sum_{g \in G} Alg_{lg} = TETA_l \sum_{o \in O} Aol_{ol}, \forall l \in L \quad (28)$$

$$\sum_{e \in E} Vie_{ie} = TETA_i \sum_{o \in O} Aoi_{oi}, \forall i \in I \quad (29)$$

$$Aco_{co} \leq TETco_{co} Q_o, \forall c \in C, o \in O \quad (30)$$

$$Aop_{op} \leq TETop_{op} Q_o Q_p, \forall o \in O, p \in P \quad (31)$$

$$Aor_{or} \leq TETor_{or} Q_o Q_r, \forall o \in O, r \in R \quad (32)$$

$$Aoi_{oi} \leq TEToi_{oi} Q_o Q_i, \forall o \in O, i \in I \quad (33)$$

$$Aol_{ol} \leq TETol_{ol} Q_o Q_l, \forall o \in O, l \in L \quad (34)$$

$$Apa_{pa} \leq TETpa_{pa} Q_p, \forall p \in P, a \in A \quad (35)$$

$$Arb_{rb} \leq TETrb_{rb} Q_r, \forall r \in R, b \in B \quad (36)$$

$$Alg_{lg} \leq TETlg_{lg} Q_l, \forall l \in L, g \in G \quad (37)$$

$$Vie_{ie} \leq TETie_{ie} Q_i, \forall i \in I, e \in E \quad (38)$$

$$Q_o, Q_p, Q_r, Q_i, Q_l \in \{0,1\}, \forall o \in O, \forall p \in P, \forall r \in R, \forall i \in I, \forall l \in L \quad (39)$$

$$Aco_{co}, Aop_{op}, Aor_{or}, Aoi_{oi}, Aol_{ol}, Apa_{pa}, Arb_{rb}, Alg_{lg}, Vie_{ie} \geq 0, \quad (40)$$

$$\forall c \in C, \forall o \in O, \forall p \in P, \forall r \in R, \forall i \in I, \forall l \in L, \forall a \in A, \forall b \in B, \forall g \in G, \forall e \in E$$

این مدل تعداد و محل مراکز جمع‌آوری، کارخانه‌های تعمیر یا استفاده مجدد، کارخانه‌های بازیافت یا بازسازی و کوره‌های زباله‌سوزی و همچنین استراتژی حمل‌ونقل محصولات مورد استفاده، اجزای جداشده و محصولات تجدید شده را تعیین می‌کند و بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح چندهدفه فرمول‌بندی شده و بر توازن بهینه بین دو تابع هدف متمرکز شده است.

اولین تابع هدف برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای طراحی و برنامه‌ریزی یک شبکه لجستیک معکوس چند سطحی در معادله (۱) فرمول‌بندی شده است. هزینه‌های کلی سیستم از پنج جز تشکیل شده است: هزینه‌های عملیاتی تسهیلات ثابت، هزینه‌های پردازش متغیر، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های انتقال برق / حرارت و سود حاصل از فروش محصولات و انرژی تجدید شده. هزینه‌های پردازش متغیر و هزینه‌های حمل‌ونقل به‌طور مستقیم متناسب با مقدار محصولات مورد استفاده یا اجزای جداشده هستند. بر اساس فرض مدل، محصولات مورد استفاده را می‌توان به محصولات تعمیر شده، مواد و محصولات بازیابی شده و انرژی بازیابی شده در یک نرخ تبدیل ثابت جایگزین کرد.

تابع هدف دوم تأثیرات محیطی سیستم لجستیک معکوس را به حداقل می‌رساند. در این تحقیق، تأثیرات زیست‌محیطی توسط انتشار کربن مربوط به حمل‌ونقل و پردازش محصولات مورد استفاده ارزیابی می‌شوند. همان‌طور که در معادله (۲) نشان داده شده است: انتشار کربن از مجموع انتشار کربن از پردازش محصولات مورد استفاده و انتشار کربن از حمل‌ونقل به دست می‌آید.

رابطه (۳) شرط نرخ بهره‌برداری از منابع سیستم لجستیک معکوس را تضمین می‌کند. روابط (۴) تا (۸) محصولات مورد استفاده یا قطعات جداشده پردازش‌شده در هر تأسیسات را محدود می‌کند که بیشتر از حد پایین آن است. این الزام تضمین می‌کند که استفاده از امکانات باز شده در شبکه لجستیک معکوس در سطح بالایی حفظ می‌شود تا از اتلاف منابع جلوگیری شود و از مزیت مقیاس اقتصادی بهره‌مند شود. روابط (۹) تا (۱۳)، اطمینان حاصل می‌کند از محصولات مورد استفاده یا قطعات جداشده پردازش‌شده در هر سازمان کم‌تر از حد بالای آن است به‌طوری‌که از ظرفیت سازمان تجاوز نکند.

روابط (۱۴) تا (۱۸)، حداکثر تعداد مکان‌های کاندید را به ترتیب برای افتتاح مراکز جمع‌آوری، کارخانه‌های تعمیر / استفاده مجدد، کارخانه‌های بازیافت / بازسازی، کارخانه‌های زباله‌سوز و محل‌های دفن زباله را محدود می‌کنند. رابطه (۱۹)، تضمین می‌کند که محصولات مورد استفاده تولید شده در هر موقعیت مشتری به‌طور کامل جمع‌آوری شده و برای درمان مربوطه ارسال می‌شوند.

روابط (۲۰) تا (۲۵) قید تعادل جریان را در مراکز جمع‌آوری فرمول‌بندی می‌کنند. رابطه (۲۰)، جریان ورودی محصولات مورد استفاده، برابر با جریان خروجی اجزای جداشده در هر مرکز جمع‌آوری را تضمین می‌کند. روابط (۲۱) و (۲۴)، اطمینان می‌دهد که مقدار اجزای جداشده برای تعمیر، بازیافت و بازیابی انرژی نمی‌تواند از حداکثر تعداد آن‌ها تجاوز کند. رابطه (۲۵)، اطمینان می‌دهد که مجموع نرخ تبدیل را نمی‌تواند از ۱ تجاوز کند. به این معنی که نرخ استفاده مجدد، تعمیر، بازسازی، بازیافت و بازیابی انرژی نمی‌تواند بیش از ۱۰۰٪ باشد.

روابط (۲۶) تا (۲۹)، محدودیت‌های تعادل جریان برای کارخانه تعمیر / استفاده مجدد، کارخانه بازسازی / بازیافت و کوره زباله‌سوزی در شبکه لجستیک معکوس هستند. روابط (۲۶) و (۲۷) و (۲۸)، جریان ورودی اجزای جداشده را برابر با جریان خروجی محصولات تعمیر شده یا بازیافت شده تضمین می‌کنند. رابطه (۲۹)، نرخ تولید برق از احتراق مواد زاید را مشخص می‌کند.

روابط (۳۰) تا (۳۸)، با توجه به اهمیت آن‌ها در تعیین ظرفیت مسیر و تأثیرات آن بر حالت حمل‌ونقل، از اهمیت بالایی برخوردارند. در واقع، ظرفیت مسیر توسط سه عامل اصلی تعیین می‌شود: حالت حمل‌ونقل، فرکانس حمل‌ونقل، و ظرفیت تأسیسات بالادست. با افزایش ظرفیت مسیر، می‌توان به بهره‌وری بیشتر از سیستم حمل‌ونقل دست یافت و توزیع بهینه‌تر محصولات را انجام داد. به‌عنوان مثال، هنگامی که ظرفیت مسیر به اندازه کافی بزرگ یا حتی نامحدود است، می‌توان با جایگزینی پارامترها با مقادیر بزرگ نامحدود، حمل‌ونقل محصولات مورد استفاده را بهینه کرد و تا حد زیادی از محدودیت‌هایی که ممکن

است وجود داشته باشند، خارج شد. باین حال، در صورتی که مکان کاندید برای ایجاد تسهیلات مربوطه به دلیل محدودیت‌های طبیعی یا محیطی نتواند تحت تأثیر قرار گیرد، امکان وجود این تسهیلات نخواهد بود و اجرای این روابط مورد ممکن نخواهد بود. بنابراین، در نتیجه، اصلاحات و بهبودهایی در این روابط می‌تواند منجر به بهبود کارایی و کاربردی‌تر شدن سیستم حمل‌ونقل شود و به توسعه و بهره‌وری بیشتر از ظرفیت‌های مسیر کمک کند.

۳-۲- رویکرد حل

در این بخش به منظور ساده‌تر کردن و بهینه‌سازی مسئله تحقیق، خطی سازی بخشی از روابط اصلی با استفاده از روابط (۴۱)، (۴۲) و (۴۳) صورت گرفته است. این کار به منظور کاهش پیچیدگی مسئله و افزایش سرعت حل صورت گرفته شده است. به این ترتیب، مسئله به یک مسئله MILP^۱ تبدیل شده است، و با استفاده از حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS بهینه‌سازی خواهد شد.

برای خطی سازی، روابط (۳۱)، (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) از روابط (۴۴) تا (۵۶) بهره گرفته شده است. این گام نه تنها از لحاظ سادگی در فرآیند حل مسئله تأثیر مثبت دارد بلکه امکان استفاده از الگوریتم‌ها و ابزارهای بهینه‌سازی مختلف را فراهم می‌کند. برای حل این مسئله MILP، از روش حل CPLEX و نرم‌افزار GAMS بهره‌مند خواهیم شد. این ابزارها به دلیل کارایی بالا و قابلیت اطمینان در حل مسائل بهینه‌سازی، بهترین نتایج را ارائه می‌دهند.

$$Z \leq X \quad (41)$$

$$Z \leq Y \quad (42)$$

$$Z \geq X + Y - 1 \quad (43)$$

در رابطه (۴۳)، x و y متغیرهای باینری هستند که حاصل ضرب آن‌ها خطی سازی شده است. در مدل ریاضی این تحقیق، در روابط (۳۱)، (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) از ضرب متغیرهای باینری استفاده شده که در نهایت فرم خطی شده آن در روابط (۴۴) تا (۵۵) نشان داده شده است. برای اینکار متغیرهای تصمیم‌گیری Qop_{op} , Qor_{or} , Qoi_{oi} , Qol_{ol} اضافه می‌گردد.

$$Qop_{op} \leq Q_o, \forall o, p \quad (44)$$

$$Qop_{op} \leq Q_p, \forall o, p \quad (45)$$

$$Qop_{op} \geq Q_o + Q_p - 1, \forall o, p \quad (46)$$

$$Qor_{or} \leq Q_o, \forall o, r \quad (47)$$

$$Qor_{or} \leq Q_r, \forall o, r \quad (48)$$

$$Qor_{or} \geq Q_o + Q_r - 1, \forall o, r \quad (49)$$

$$Qoi_{oi} \leq Q_o, \forall o, i \quad (50)$$

$$Qoi_{oi} \leq Q_i, \forall o, i \quad (51)$$

$$Qoi_{oi} \geq Q_o + Q_i - 1, \forall o, i \quad (52)$$

$$Qol_{ol} \leq Q_o, \forall o, l \quad (53)$$

$$Qol_{ol} \leq Q_l, \forall o, l \quad (54)$$

$$Qol_{ol} \geq Q_o + Q_l - 1, \forall o, l \quad (55)$$

همچنین در مسائل چندهدفه، تعادل بین هدف‌های مختلف بسیار حیاتی است. هر هدف ممکن است نیاز به توجه و وزن دارد تا مسئله به صورت کامل بهینه‌سازی شود. در اینجا، از روش ترکیب وزنی به منظور ایجاد تعادل مناسب میان هدف‌ها

^۱ Mixed Integer Linear Programming

استفاده می‌شود. برای حل مسائل چندهدفه، از ترکیب وزن‌ها با تابع هدف کل استفاده شده است. تابع هدف کل با وزن‌های مختلف برای هر هدف مورد توجه قرار می‌گیرد. به همین منظور پارامترهای u_1 و u_2 تعریف شدند. فرمول ریاضی این رویکرد به صورت رابطه (۵۶) است:

$$\begin{aligned}
 F(x) = u_1 \times & \left(\left(\sum_{o \in O} F_o Q_o + \sum_{p \in P} F_p Q_p + \sum_{r \in R} F_r Q_r + \sum_{i \in I} F_i Q_i + \sum_{l \in L} F_l Q_l \right) \right. \\
 & + \left(\sum_{o \in O} V_o \sum_{c \in C} Aco_{co} + \sum_{p \in P} V_p \sum_{o \in O} Aop_{op} + \sum_{r \in R} V_r \sum_{o \in O} Aor_{or} + \sum_{i \in I} V_i \sum_{o \in O} Aoi_{oi} \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{l \in L} V_l \sum_{o \in O} Aol_{ol} \right) \right. \\
 & + \left(\sum_{c \in C} \sum_{o \in O} Tco_{co} Aco_{co} + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} Top_{op} Aop_{op} + \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} Tol_{ol} Aol_{ol} \right. \\
 & + \sum_{o \in O} \sum_{r \in R} Tor_{or} Aor_{or} + \sum_{o \in O} \sum_{i \in I} Toi_{oi} Aoi_{oi} + \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} Tpa_{pa} Apa_{pa} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} Trb_{rb} Arb_{rb} + \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} Tlg_{lg} Alg_{lg} + \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} ElCie_{ie} Vie_{ie} \left. \right) \\
 & - \left(\sum_{p \in P} \sum_{a \in A} Ppa_{pa} TETA_p \sum_{o \in O} Aop_{op} + \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} Prb_{rb} TETA_r \sum_{o \in O} Aor_{or} \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} Plg_{lg} TETA_l \sum_{o \in O} Aol_{ol} + \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} Pie_{ie} TETA_i \sum_{o \in O} Aoi_{oi} \right) \right) \tag{۵۶} \\
 & + u_2 \left(\left(\sum_{p \in P} CaE_p \sum_{o \in O} Aop_{op} + \sum_{r \in R} CaE_r \sum_{o \in O} Aor_{or} + \sum_{i \in I} CaE_i \sum_{o \in O} Aoi_{oi} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{l \in L} CaE_l \sum_{o \in O} Aol_{ol} \right) \right. \\
 & + \left(\sum_{c \in C} \sum_{o \in O} Caco_{co} Sco_{co} FRco_{co} + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} Caop_{op} Sop_{op} Frop_{op} \right. \\
 & + \sum_{o \in O} \sum_{r \in R} Caor_{or} Sor_{or} FRor_{or} + \sum_{o \in O} \sum_{i \in I} Cai_{oi} Soi_{oi} FROI_{oi} \\
 & + \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} Caol_{ol} Sol_{ol} FROL_{ol} + \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} Capa_{pa} Spa_{pa} FRpa_{pa} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} Carb_{rb} Srb_{rb} FRrb_{rb} + \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} Calg_{lg} Slg_{lg} FRlg_{lg} \\
 & \left. \left. + \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} Cai_{ie} Sie_{ie} FRie_{ie} \right) \right)
 \end{aligned}$$

۴- نتایج عددی

در این بخش، ابتدا به ارائه مقادیر پارامترهای مدل ریاضی پرداخته شده و سپس نتایج حاصل از حل آن ارائه می‌شود. در

این راستا، جداول ۲ تا ۵ نمایانگر مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل نظیر تقاضا، ظرفیت، مقدار ارسال زباله و هزینه‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از انتقال زباله‌ها بین سطوح مختلف زنجیره تأمین در شکل ۲ موجود است.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای استفاده شده در حل مدل

پارامترها	توضیحات	حد بالا	حد پایین
T/ELC	هزینه‌های حمل و نقل/انتقال واحد محصولات	۲	۱
P	سود فروش واحد محصولات	۱۰۰۰	۱۰۰
Ca	نشانگر انتشار کربن انتقال‌ها	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰
S	فاصله‌های تسهیلات	۱۵	۵
FR	فرکانس حمل و نقل	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰
TET	ظرفیت حمل و نقل مسیرهای مختلف	۱۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰

جدول ۳ مقادیر پارامترهای استفاده شده در حل مدل

پارامترها	توضیحات	مقدار
$TETA$	نرخ تبدیل محصولات	۰.۵
NU	حداکثر تعداد تسهیلات	به میزان تعداد حد بالا
$RATE$	نرخ مصرف مورد نیاز از محصولات استفاده شده	۰.۰۰۱
$GAMA$	درصد محصول استفاده شده با توجه به استفاده مجدد	۰.۲۵
$BETA$	نرخ تولید محصولات استفاده شده مشتریان	۳۰۰۰

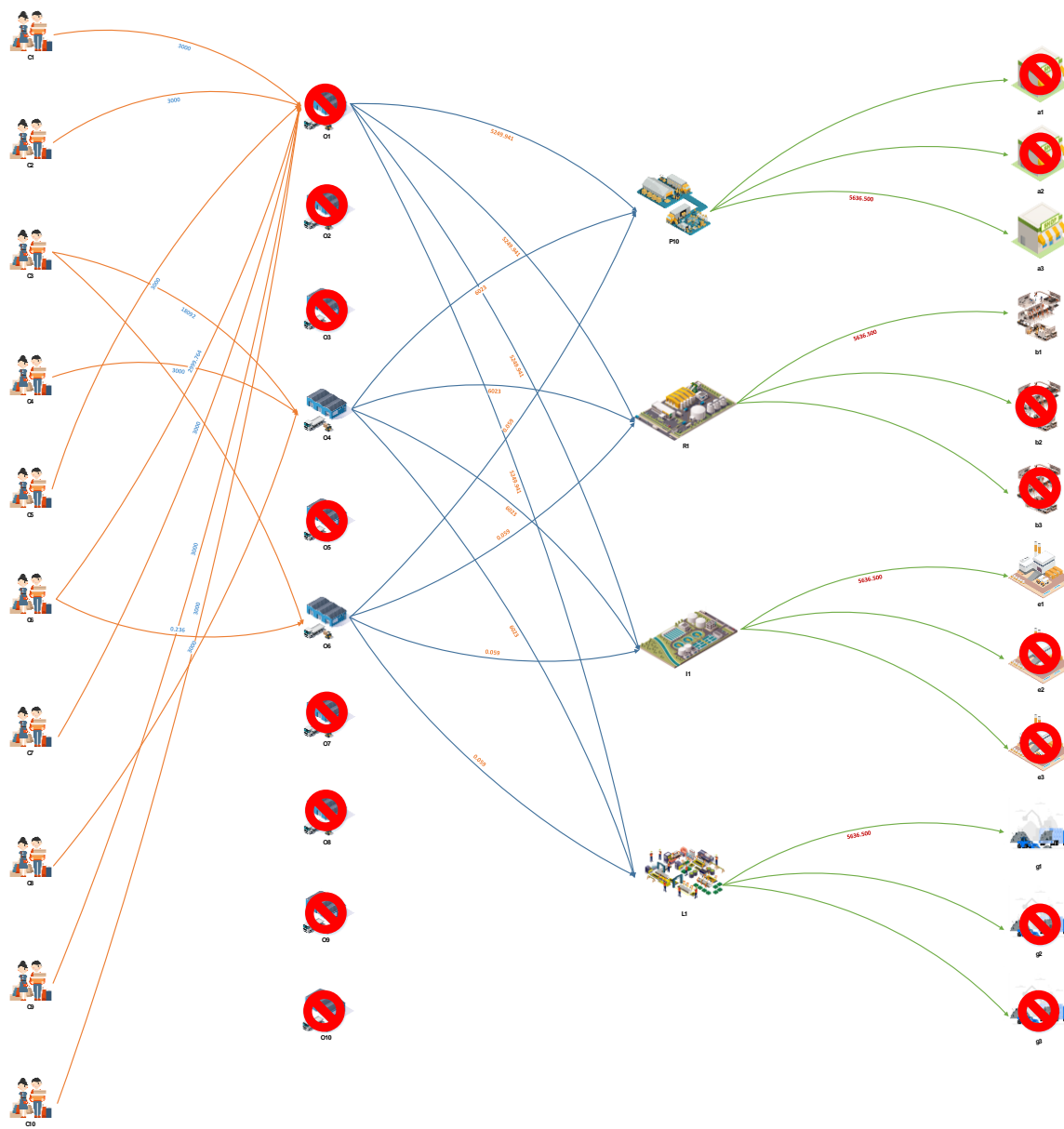
جدول ۴ ماتریس فاصله بین مشتریان و مکان‌های نامزد مرکز جمع‌آوری [۱۵]

نقاط کاندید	مرکز جمع‌آوری								تسهیلات تعمیر و استفاده مجدد
	UP_o	LO_o	V_o	F_o	UP_p	LO_p	CaE_p	V_p	
۱	۲۷۱,۱۶۱	۱۲,۱۳۳	۲۶	۶۰۲,۶۴۱	۳۳	۳	۳۳	۵۰۸۱	۱۶۶,۸۸۷
۲	۲۶۲,۱۷۴	۱۰,۰۷۳	۳۱	۶۳۴,۱۲۰	۲۷	۴	۲۷	۷۰۸۰	۱۷۴,۶۷۸
۳	۲۶۴,۶۶۳	۱۱,۹۰۲	۲۵	۷۳۲,۴۵۹	۲۷	۳	۲۷	۶۸۰۰	۱۵۶,۰۲۵
۴	۲۹۸,۲۳۸	۱۶,۶۷۷	۲۱	۸۶۴,۱۷۷	۳۴	۳	۳۴	۹۷۸۵	۱۴۹,۲۳۷
۵	۲۵۸,۶۴۲	۱۹,۷۰۶	۳۰	۷۹۴,۵۴۹	۲۸	۴	۲۸	۵۶۹۳	۱۳۰,۴۹۰
۶	۲۵۵,۵۳۷	۲۳,۶۲۰	۳۵	۶۸۱,۵۴۳	۲۵	۴	۲۵	۷۲۷۴	۱۶۸,۸۸۸
۷	۲۸۶,۲۶۷	۱۷,۰۷۷	۲۹	۶۴۳,۱۵۴	۲۶	۳	۲۶	۵۹۰۵	۱۰۸,۸۱۲
۸	۳۴۶,۱۱۵	۲۴,۷۱۵	۲۴	۶۴۸,۱۷۷	۲۹	۳	۲۹	۶۸۶۴	۱۴۴,۲۱۳
۹	۱۹۳,۲۵۵	۲۸,۳۴۸	۲۸	۷۲۶,۷۷۴	۳۰	۳	۳۰	۹۷۵۸	۲۰۹,۰۳۴
۱۰	۳۲۸,۳۴۶	۲۲,۲۹۹	۳۴	۶۴۷,۶۲۸	۲۸	۴	۲۸	۷۹۵۸	۱۱۶,۴۹۶

جدول ۵ پارامترهای مکان‌های کاندید دفن زباله [۱۵]

نقاط کاندید	دفن زباله				
	UR_i	LO_i	CaE_i	V_i	F_i
۱	۲۱۵,۴۷۱	۹۱۴۶	۷	۱۷	۲۷۸,۷۹۸

۱۸۲,۰۶۳	۹۱۴۶	۷	۱۸	۲۷۹,۰۹۳	۲
۲۷۴,۴۷۴	۷۴۹۶	۸	۱۹	۳۴۸,۵۹۴	۳



شکل ۲ نتیجه انتقال زباله‌ها در سطوح مختلف زنجیره

جدول ۶ پارامترهای مکان‌های کاندید تاسیسات بازیافت و بازیافت انرژی [۱۵]

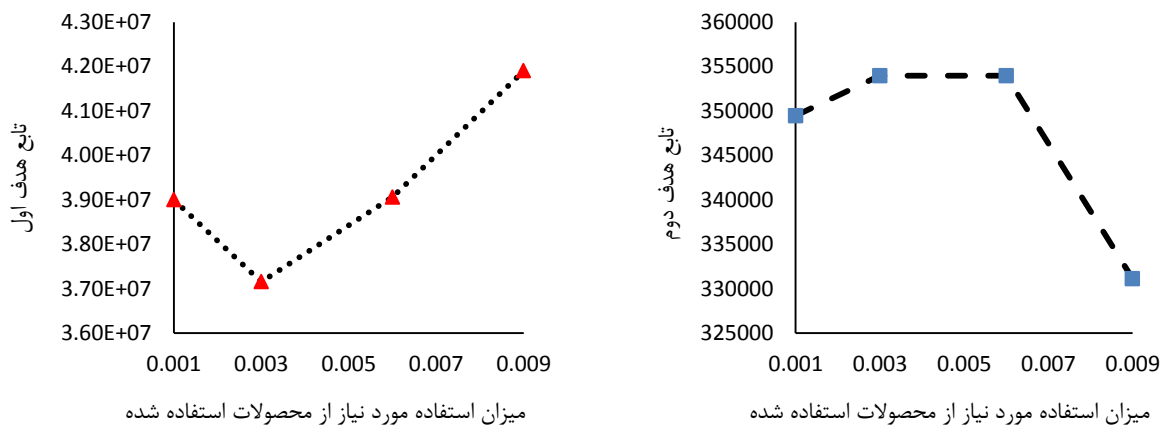
تاسیسات بازیافت انرژی					تاسیسات بازیافت و تولید مجدد					نقاط
UP_i	LO_i	CaE_i	V_i	F_i	UP_r	LO_r	CaE_r	V_r	F_r	کاندید
۱۲۵,۴۴۹	۷۷۶۲	۱۷	۲۲	۵۱۹,۴۰۷	۱۸۳,۷۹۵	۱۱,۲۷۳	۳	۳۷	۹۹۳,۰۹۵	۱
۱۹۱,۸۳۳	۷۷۳۱	۱۸	۲۰	۵۰۱,۲۷۱	۱۲۹,۳۲۴	۱۱,۲۲۹	۴	۳۵	۹۲۰,۹۵۹	۲
۱۵۵,۳۹۰	۷۱۳۵	۱۵	۲۴	۵۸۵,۰۲۳	۲۳۶,۰۳۸	۱۱,۴۱۸	۳	۳۷	۹۶۲,۷۲۶	۳

تأسیسات بازیافت انرژی					تأسیسات بازیافت و تولید مجدد					نقاط
UP _i	LO _i	CaE _i	V _i	F _i	UP _r	LO _r	CaE _r	V _r	F _r	کاندید
۱۹۹,۶۹۰	۹۷۰۷	۱۸	۲۱	۶۷۱,۸۷۵	۱۱۳,۵۹۵	۱۳,۰۳۸	۳	۳۲	۸۵۹,۴۸۹	۴
۱۵۴,۵۶۰	۸۳۱۴	۱۸	۲۱	۶۶۸,۸۶۷	۱۵۳,۲۵۴	۱۴,۹۳۲	۴	۳۸	۷۶۸,۱۶۴	۵
					۱۸۲,۶۷۶	۱۴,۱۴۵	۴	۳۱	۷۸۱,۵۹۴	۶
					۱۴۳,۳۹۱	۱۲,۸۲۸	۳	۳۷	۸۴۹,۰۴۹	۷
					۱۶۷,۶۴۷	۱۳,۵۹۵	۳	۳۷	۷۲۶,۵۲۷	۸
					۲۳۱,۷۶۰	۱۱,۹۵۳	۳	۳۰	۸۳۹,۲۴۱	۹
					۱۲۱,۳۹۳	۱۴,۱۷۸	۴	۳۸	۹۳۰,۰۵۷	۱۰

۴-۱- تحلیل حساسیت

در این بخش، تأثیر تغییر مقادیر پارامترهای مختلف بر مقدار تابع هدف را مورد بررسی قرار می‌گیرد و نشان داده می‌شود که هر کدام از پارامتر چه میزان تأثیری بر تابع هدف دارد. پارامترهایی که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارتند از: حساسیت میزان استفاده مورد نیاز از محصولات استفاده شده، درصد محصول مصرف شده با توجه به استفاده مجدد در کارخانه p ، درصد محصول مصرف شده با توجه به بازیافت در کارخانه r .

در این راستا، نتایج مربوط به تحلیل حساسیت میزان استفاده مورد نیاز از محصولات استفاده شده در شکل ۲، پارامتر درصد محصول مصرف شده با توجه به استفاده مجدد در کارخانه p در شکل ۳ و نهایتاً درصد محصول مصرف شده با توجه به بازیافت در کارخانه r در شکل ۴ ارائه شده است.

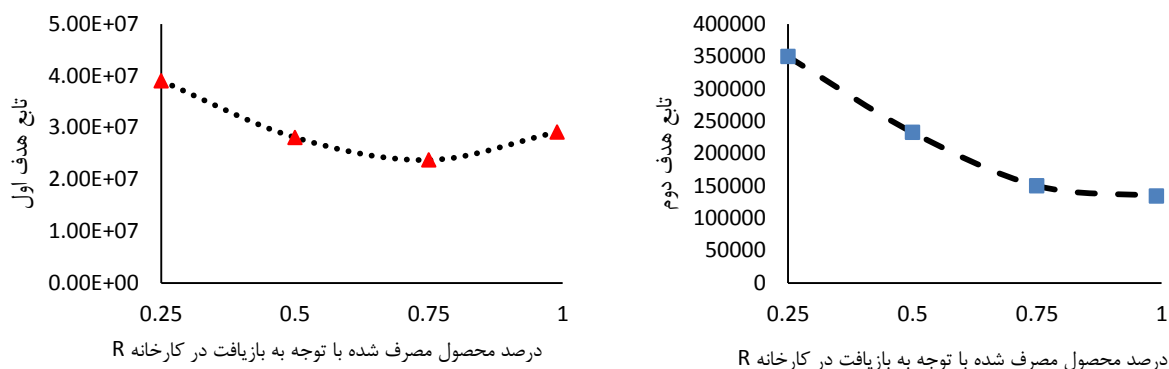


شکل ۳ نمودار تحلیل حساسیت میزان استفاده مورد نیاز از محصولات استفاده شده

با توجه به نمودار حساسیت در شکل ۳، تحلیل حاکی از آن است که افزایش نرخ مصرف مراکز جمع‌آوری به میزان کم، به ایجاد هزینه‌های بهره‌وری نمی‌انجامد و زباله‌ها به مقدار کمتری به مراکز جمع‌آوری منتقل می‌شوند. این موضوع باعث کاهش هزینه‌ها می‌گردد. با این حال، با افزایش نرخ مصرف به میزان بیشتر، مشاهده می‌شود که مراکز جمع‌آوری قادر به پاسخگویی به حجم زیاد زباله‌های تولیدی نیستند و مجبور به احداث مراکز جمع‌آوری بیشتر می‌شوند. این امر منجر به افزایش هزینه‌های سیستم می‌شود.

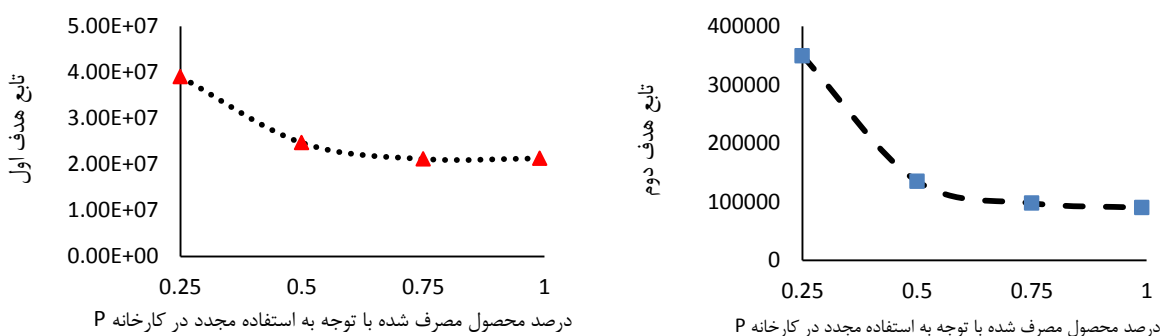
با افزایش نرخ مصرف، نیاز به انتقال زباله‌های بیشتری پیش می‌آید که در نتیجه موجب افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی از انتقال زباله‌ها می‌شود. با افزایش بیشتر زباله‌ها، هزینه‌های سیستم افزایش می‌یابد و ظرفیت سیستم به سرعت پر می‌شود.

در نتیجه، سیستم دیگر توانایی پاسخگویی را ندارد و ارسال زباله جدید ممکن نمی‌شود.



شکل ۴ نمودار تحلیل حساسیت درصد محصول مصرف‌شده با توجه به استفاده مجدد در کارخانه p

با توجه به تجزیه و تحلیل حساسیت در شکل ۴، که بر اساس درصد محصولات مصرفی با توجه به استفاده مجدد در کارخانه صورت گرفته است، مشاهده می‌شود که با افزایش این پارامتر، مقدار تابع هدف اول، یعنی هزینه‌های سیستم، بهبود می‌یابد. همچنین، با افزایش درصد محصولات مصرفی و توجه به افزایش استفاده مجدد، مقدار تابع هدف دوم، که نمایانگر میزان آلودگی زیست‌محیطی است، کاهش می‌یابد و تأثیر زیان‌آور آلودگی زیست‌محیطی کاهش می‌یابد.



شکل ۵ نمودار تحلیل حساسیت درصد محصول مصرف‌شده با توجه به بازیافت در کارخانه r

با توجه به تجزیه و تحلیل حساسیت در شکل ۵، که بر اساس درصد محصولات مصرفی با توجه به عملیات بازیافت در کارخانه انجام شده است، آشکار است که با افزایش این پارامتر، مقدار تابع هدف اول، یعنی هزینه‌های سیستم، بهبود می‌یابد. همچنین، با افزایش درصد محصولات بازیافتی در کارخانه و توجه به افزایش مقدار بازیافت و استفاده مجدد، مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف دوم، که نمایانگر میزان آلودگی زیست‌محیطی است، با افزایش بازیافت و استفاده مجدد، کاهش می‌یابد و تأثیر آلودگی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد.

۴-۲- بررسی تعارض اهداف

به منظور بررسی تعارض اهداف، یک‌بار مدل ریاضی باهدف کاهش کل هزینه‌ها و یک‌بار باهدف حداقل کردن آلودگی‌های زیست‌محیطی بهینه‌سازی شده و نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است هر یک از اهداف این مسئله با توجه به ماهیت متفاوت آن‌ها در تعارض هستند.

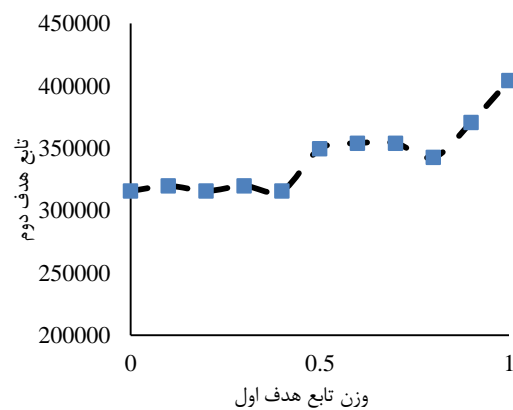
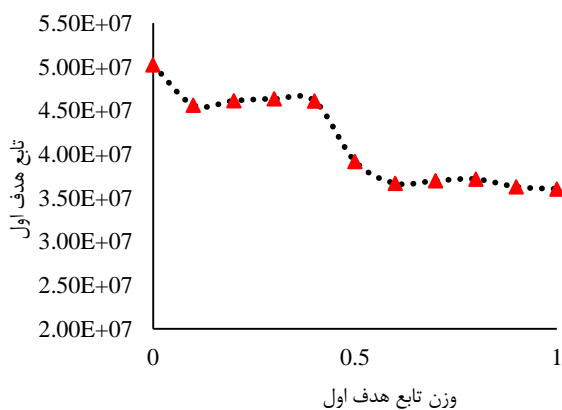
جدول ۷ مقادیر توابع هدف

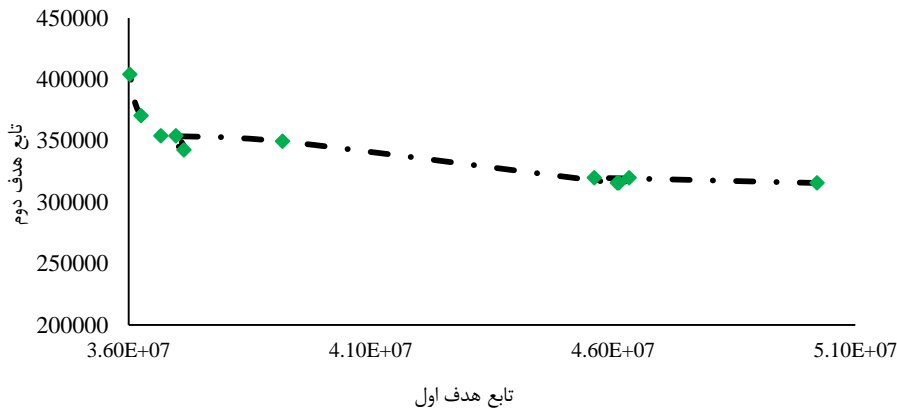
مقدار به دست آمده برای تابع هدف اول	مقدار به دست آمده برای تابع هدف دوم
3.602228×10^7	۴۰۴۱۷۸
5.507148×10^7	۳۱۵۶۴۴

همان طور که مشاهده می شود، مقدار عددی که پس از حل تابع هدف اول (حداقل کردن هزینه) در حالت اول، که تابع هدف اول بهینه شده است، به دست آمده است، کمتر از حالت دوم است. این اختلاف به دلیل این است که در حالت اول، عوامل هزینه‌زا به طور بیشتری کاهش یافته‌اند و مقادیر کمتری گرفته‌اند. در نتیجه، هزینه کل بهینه و در مینیمم‌ترین حالت خود قرار گرفته است. با توجه به تابع هدف دوم (حداقل کردن میزان انتشار کربن)، در هر دو حالت، مدل یک جواب یکسان را ارائه داده است. این ویژگی به دلیل آن است که مدل برای حل در هر دو حالت، به مقادیر تأثیرگذار بر تابع هدف دوم، اعدادی یکسان را نسبت داده است. بنابراین، این جواب، حداقل‌ترین و بهینه‌ترین جواب در دو حالت است. نتایج حاصل از سناریوهای مختلف با در نظر گرفتن ضرایب متفاوت در جدول ۸ و شکل ۶ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، تابع هدف اول در سناریوهای مختلف روند نزولی و تابع هدف دوم روند صعودی گرفته است که نشان دهنده تعارض اهداف می باشد.

جدول ۸ سناریوهای مختلف ضرایب توابع هدف

سناریو	U_1	U_2	Z_1	Z_2
۱	۰	۱	5.02×10^7	۳۱۵۶۴۴
۲	۰.۱	۰.۹	4.56×10^7	۳۱۹۷۰۴
۳	۰.۲	۰.۸	4.61×10^7	۳۱۵۶۴۴
۴	۰.۳	۰.۷	4.63×10^7	۳۱۹۷۰۴
۵	۰.۴	۰.۶	4.61×10^7	۳۱۵۶۴۴
۶	۰.۵	۰.۵	3.92×10^7	۳۴۹۴۶۳
۷	۰.۶	۰.۴	3.67×10^7	۳۵۳۹۵۸
۸	۰.۷	۰.۳	3.70×10^7	۳۵۳۹۵۸
۹	۰.۸	۰.۲	3.71×10^7	۳۴۲۵۴۰
۱۰	۰.۹	۰.۱	3.63×10^7	۳۷۰۵۴۳
۱۱	۱	۰	3.60×10^7	۴۰۴۱۷۸





شکل ۶ تعارض اهداف برای سناریوهای مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر، رویکردهای مدرن در مدیریت تدارکات معکوس به‌منظور بهره‌وری بالاتر از محصولات و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از فرآیندهای تولید و مصرف گسترش‌یافته‌اند مقاله با تمرکز بر دو تابع هدف اصلی، یعنی حداقل سازی هزینه‌های لجستیک معکوس و کاهش انتشار کربن حاصل از حمل‌ونقل محصولات مورداستفاده، به ارزیابی شکل گرفته است.

استفاده از روش‌های نامناسب در بازیافت و استفاده مجدد محصولات ممکن است منجر به آلودگی ثانویه گردد؛ بنابراین، در ساختار یک سیستم لجستیک معکوس، نگرش به مسائل زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله به تجزیه و تحلیل تأثیر زیست‌محیطی با انتشار کربن از فرآیندهای پردازش و حمل‌ونقل محصولات مصرفی پرداخته شد.

برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بهینه نقش مهمی در به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی سیستم دارد و اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. افزایش نرخ بهره‌برداری از منابع، هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد، اما درعین‌حال، انتشار کربن کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که تلاش برای بهینه‌سازی سیستم لجستیک معکوس به‌وسیله سرمایه‌گذاری بیشتر و بهره‌وری در فن‌آوری پردازش، می‌تواند به کاهش انتشار کربن و کاهش هزینه‌های عملیاتی منجر شود.

به‌علاوه، نتایج حاصل از حل مدل نشان می‌دهد که با ادغام بهینه استفاده از منابع با کاهش اثرات زیست‌محیطی، می‌توان به جهت پیشبرد مسائل محیط‌زیستی و اقتصادی هم‌زمان پیش رفت. نتایج مدل نشان می‌دهد که می‌توان از احداث تسهیلات اضافی جلوگیری کرد و مانع هدر رفتن منابع شد و مسیر بهینه را در زنجیره تأمین پیش گرفت.

در مجموع، مقاله حاضر به اهمیت برنامه‌ریزی سیستم سازگار با محیط‌زیست تدارکات معکوس اشاره می‌کند و نشان می‌دهد که ادغام بهینه استفاده از منابع با کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌تواند به جهت پیشبرد مسائل محیط‌زیستی و اقتصادی هم‌زمان باشد. به‌منظور توسعه این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که این مدل در شرایط عدم قطعیت موردبررسی قرار گرفته و برای حل مدل در ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری نوین مانند الگوریتم تحقیقات مبتنی بر قانون (FBI)¹ استفاده شود.

۶- منابع

- [1] Kannan D, Solanki R, Darbari JD, Govindan K, Jha P. A novel bi-objective optimization model for an eco-efficient reverse logistics network design configuration. *Journal of Cleaner Production*. 2023;394:136357.
- [2] Govindan K, Paam P, Abtahi A-R. A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological indicators*. 2016;67:753-68.

¹ Feedback-based intelligent

- [3] Govindan K, Jafarian A, Khodaverdi R, Devika K. Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International journal of production economics*. 2014;152:9-28.
- [4] Bortolini M, Galizia FG, Mora C, Botti L, Rosano M. Bi-objective design of fresh food supply chain networks with reusable and disposable packaging containers. *Journal of Cleaner Production*. 2018;184:375-88.
- [5] Hrabec D, Kúdela J, Šomplák R, Nevrlý V, Popela P. Circular economy implementation in waste management network design problem: a case study. *Central European Journal of Operations Research*. 2019;28:1441-58.
- [6] Gao X. A novel reverse logistics network design considering multi-level investments for facility reconstruction with environmental considerations. *Sustainability*. 2019;11:2710.
- [7] Shi Y, Huang Y, Xu J. Technological paradigm-based construction and demolition waste supply chain optimization with carbon policy. *Journal of Cleaner Production*. 2020;277:123331.
- [8] Guan Q, Yang Y. Reverse logistics network design model for used power battery under the third-party recovery mode. 2020 16th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS): IEEE; 2020. p. 293-7.
- [9] Xu X, Wang F, Chen Y, Yang B, Zhang S, Song X, et al. Design of urban medical waste recycling network considering loading reliability under uncertain conditions. *Computers & Industrial Engineering*. 2023;183:109471.
- [10] Fan Z, Luo Y, Liang N, Li S. A Novel Sustainable Reverse Logistics Network Design for Electric Vehicle Batteries Considering Multi-Kind and Multi-Technology. *Sustainability*. 2023;15:10128.
- [11] Zhou J, Yang S, Feng H, An Z. Multi-echelon sustainable reverse logistics network design with incentive mechanism for eco-packages. *Journal of Cleaner Production*. 2023;430:139500.
- [12] Wu Y, Gao M, Liu R, Zeng J, Zhao Q, Gao J, et al. Multi-Time Scale Aware Host Task Preferred Learning for WEEE return prediction. *Expert Systems with Applications*. 2023:122160.
- [13] Mazzei HG, Specchia S. Latest insights on technologies for the treatment of solid medical waste: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023:109-309.
- [14] Lei J, Che A, Van Woensel T. Collection-disassembly-delivery problem of disassembly centers in a reverse logistics network. *European Journal of Operational Research*. 2024;313:478-93.
- [15] Yu H, Solvang WD. A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87:2693-711.