Iranian Journal of Supply Chain Management
Vol. 27, No. 3, Autumn 2025, Serial No. 88
ISSN: 2008-9198 , E-ISSN: 2717-1647

Multi-Objective Optimization of Sustainable Reverse Supply Chain for Municipal Solid Waste Considering Uncertainty: Robust Optimization Approach

Mohammad Mozafari[1], Maryam Daneshvar[2*], Fatemeh KarimiJafari[3]

[1] Master's Degree, Department of Management, Faculty of Management and Finance, Khatam University, Tehran, Iran. Email Address: m.mozaffari@khatam.ac.ir

[2] Correspondence: Assistant Professor, Department of Management, Faculty of Management and Finance, Khatam University, Tehran, Iran. Email Address: m.daneshvar@khatam.ac.ir

[3] Assistant Professor, Department of Management, Faculty of Management and Finance, Khatam University, Tehran, Iran. Email Address: f.karimijafari@khatam.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2 February 2025

Received in revised form: 7 April 2025

Accepted: 6 September 2025

Available online: 21 November 2025

Keywords:

Reverse Supply Chain

Sustainable Supply Chain

Waste Management

Robust Optimization

ABSTRACT

In recent years, waste management has become a serious challenge due to the increase in population, urbanization, and waste production. Improper waste management not only damages the environment and increases pollution, but also increases economic costs and has negative effects on human health and quality of life. Therefore, designing a sustainable supply chain that simultaneously considers economic, environmental, and social dimensions is very important. Also, due to the existence of uncertainties such as changes in the volume of waste produced and supply chain costs, it is essential to consider these factors in waste management. The aim of this research is to develop a mathematical model of a sustainable reverse supply chain network for municipal solid waste management. In this model, the parameters of transportation costs between centers are considered as uncertain parameters. Also, the robust optimization approach and the Bertsims-Wasim method have been used to consider uncertainty. Finally, to verify the validity of the model, a numerical example has been solved, which, due to the multi-objective nature of the model, has been solved using the epsilon constraint method. Based on the results, the designed model can reduce waste management costs, including waste transportation costs and operational costs such as collection, separation, processing, and recycling.

Cite this article: M. Mozafari, M. Daneshvar, and F. KarimiJafari, "Multi-Objective Optimization of Sustainable Reverse Supply Chain for Municipal Solid Waste Considering Uncertainty: Robust Optimization Approach," Journal of Supply Chain Management, vol. 27, no. 3, pp. 1-34, 2025. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1404.27.88.1.7

OPEN ACCESS CC BY

Publisher: Imam Hossein University.© The Author(s).

Introduction

In recent years, the advancement of societies and their industrialization have had negative impacts on the environment, and serious actions must be taken to address these problems. In this regard, attention to the principles of sustainability is considered a strategic necessity to ensure survival and resilience against future crises. Developed countries are moving faster along this path, while developing countries face numerous challenges due to limited resources, lack of effective government support, and shortage of skilled labor. Under such circumstances, businesses often prioritize their economic growth and overlook environmental aspects, thereby causing harm to the environment.

Waste management, as one of the most important pillars of sustainable development, holds significant importance. According to the 2021 report of the Research Center of the Islamic Consultative Assembly of Iran, approximately 20 million tons of municipal waste were generated in the country, of which more than 83 percent was produced by urban residents and over 16 percent by rural residents. Given the large volume of waste generation, this issue has become one of the most complex challenges faced by governments in protecting the environment and controlling pollution. Proper waste management can prevent its negative consequences on human health and the environment. Essential actions in this field include raising public awareness, increasing investment, and developing practical programs.

For the effective management of municipal solid waste, it is essential to develop an efficient reverse supply chain that considers all three dimensions of sustainability—economic, environmental, and social.

The design of a sustainable supply chain network is a complex process that involves decision-making related to the location of facilities, waste disposal and recycling centers, transportation routing, and inventory management. These decisions can influence environmental, social, and economic impacts. To achieve sustainability, factors such as reducing carbon emissions and pollution (environmental), minimizing costs or increasing profits (economic), and addressing ethical issues, social responsibility, and enhancing citizen satisfaction or job creation (social) must be taken into account. Concepts such as reverse logistics have been developed to create a balance among these dimensions.

One of the major challenges in achieving sustainability is the consideration of uncertainties. Factors such as demand fluctuations, market dynamics, changes in laws and regulations, and the availability of resources—such as those affected by natural disasters or climate change—can have negative impacts on supply chain management and its sustainability. These uncertainties may lead to increased costs or waste generation. One possible solution to address these

challenges is the development of mathematical optimization models that are capable of incorporating the unpredictability of the supply chain.

Studies conducted in the field of sustainable supply chain design for waste management have shown that there are relatively few studies that simultaneously consider all three dimensions of sustainability—economic, environmental, and social—along with parameter uncertainty, using a robust optimization approach [6]. In some studies, limited attention has been paid to social aspects, which prevents the achievement of a truly sustainable and efficient supply chain. Moreover, this negligence may lead to negative impacts within the supply chain, such as violations of labor rights, human rights, or ethical principles. Therefore, it is essential to take all three dimensions of sustainability into account.

In addition, previous research on waste management and recycling has mostly been based on deterministic parameters in decision-making, whereas, as mentioned earlier, in real-world situations, many parameters are uncertain—such as the amount of collected waste or transportation costs—and these uncertainties can have significant effects on economic and environmental aspects, which must be considered.

Considering the aforementioned research gaps and the need to obtain reliable solutions under uncertainty, the objective of this study is to develop a multi-objective mathematical model for designing a sustainable reverse supply chain network for municipal solid waste management. In this model, all three dimensions of sustainability are incorporated, and uncertainty is addressed through the application of robust optimization. To achieve this goal, the research seeks to answer the following questions:

How can the economic, environmental, and social dimensions of sustainability be incorporated into the mathematical modeling of waste management? And what is the structure of a robust optimization-based sustainable reverse supply chain model for municipal solid waste management?

Methodology

In this study, to optimize the sustainable reverse supply chain of municipal solid waste, a multi-objective, multi-echelon, and single-period mathematical network model with a linear programming approach is proposed. First, the mathematical model is developed under deterministic conditions, and then, to account for uncertainty in non-deterministic parameters, a robust counterpart of the model is formulated using the Bertsimas and Sim robust optimization approach. In the robust model, the transportation cost parameters for each unit of waste transported to different locations are considered as uncertain parameters.

The starting point of the supply chain, denoted by i, represents the sources of waste generation, including households, companies, and organizations, as well as the collection of waste from bins. Subsequently, the generated waste is transported by vehicles to collection centers, and then to sorting centers, where different types of waste are separated. In the next stage, the waste is transferred to processing centers so that recyclable waste can be sent to recycling centers, while non-recyclable waste is transported to disposal centers.

The assumptions of the proposed mathematical model are as follows:

- The designed sustainable supply chain model is multi-objective, simultaneously addressing three goals: economic, environmental, and social.
- The locations of various facilities in the supply chain—including collection, sorting, processing, recycling, and disposal centers—are predetermined.
- The transportation routes for transferring waste between facilities are also predetermined.
- The model is multi-echelon, consisting of collection, sorting and separation, processing, recycling, and disposal centers.
- The designed supply chain model is single-period and developed for one planning period.

Findings

The multi-objective model was solved using the ε-constraint method. The economic objectives, namely minimizing system costs, and the environmental objectives, which include reducing pollution, align with each other but are in conflict with the social objective. Sensitivity analysis of operational costs indicates that when the initial value of these parameters decreases, the objective function value also decreases; conversely, when they increase, the economic objective value rises under both deterministic and uncertain conditions, since the economic function is directly related to these parameters. However, the environmental and social objective functions remain unchanged when this parameter varies. When the operational cost parameter changes by 20 percent, the economic objective changes by 12.28 percent under the deterministic case and by 12.06 percent under uncertainty. Similarly, when this uncertain parameter changes by 40 percent, the economic objective changes by 24.54 percent under the deterministic condition and by 24.13 percent under uncertainty.

Furthermore, the sensitivity analysis of the vehicle capacity parameter shows that when this parameter changes by 10 percent, the total costs change by 9.99 percent under both deterministic and uncertain conditions. A 20 percent change in this parameter leads to a 19.98 percent change in costs, while a 10 percent change in vehicle capacity results in a 6.86 percent variation in the environmental objective function and a 10 percent variation in the social objective function.

Conclusion

In this study, a multi-objective, multi-echelon, single-period mathematical model was developed to design a sustainable reverse supply chain network, encompassing three objectives: economic, environmental, and social. The economic objective function includes the costs of the supply chain, such as transportation, operational, and facility establishment costs. The environmental objective function focuses on reducing pollution caused by transportation and operational processes at various facilities. Finally, the social objective function is developed with the goal of increasing employment opportunities. The different echelons of this supply chain include collection, sorting, processing, recycling, and disposal centers.

In the robust model, transportation costs of waste are considered as uncertain parameters due to their dependence on route conditions, fuel prices, and traffic, and the model was reformulated using the Bertsimas and Sim approach to ensure robustness against parameter fluctuations. The ε-constraint method was used to obtain Pareto-optimal solutions.

The results indicate that environmental pollution can be optimized by controlling waste transportation, the number of vehicles, and supply chain costs. Reducing pollution also contributes to lowering supply chain costs. Furthermore, increasing the ratio of recycled to disposed waste not only helps reduce pollution and costs but also decreases the consumption of primary resources, thereby supporting environmental preservation. Ultimately, the model, with its focus on increasing employment opportunities, improves the economic status of the community and enhances societal satisfaction. Considering uncertainty and applying the robust optimization approach allows for obtaining optimal and reliable solutions under varying economic conditions and cost fluctuations, making the model suitable for real-world applications.

نشریه علمی «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و هفتم، شماره ۸۸، پاییز ۱۴۰۴؛ ص ۳۴-۱
شاپای چاپی: ۲۰۰۸-۹۱۹۸| شاپای الکترونیکی: ۲۷۱۷-۱۶۴۷

بهینه‌سازی چندهدفه زنجیره تأمین معکوس پایدار زباله‌های جامد شهری با در نظر گرفتن عدم قطعیت : رویکرد بهینه‌سازی استوار

محمد مظفری[۱]، مریم دانشور[۲*]، فاطمه کریمی جعفری[۳]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: m.mozaffari@khatam.ac.ir

[۲] استادیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: m.daneshvar@khatam.ac.ir

[۳] استادیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: f.karimijafari@khatam.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، مدیریت پسماند به دلیل افزایش جمعیت، شهرنشینی و تولید زباله، به یک چالش جدی تبدیل شده است. مدیریت نادرست پسماند نه تنها به محیط‌زیست آسیب می‌زند و آلودگی را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های اقتصادی را نیز افزایش داده و اثرات منفی بر سلامت و کیفیت زندگی انسان‌ها دارد. بنابراین، طراحی یک زنجیره تأمین پایدار که ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را همزمان در نظر بگیرد، بسیار مهم است. همچنین، به دلیل وجود عدم قطعیت‌هایی مانند تغییر در حجم زباله‌های تولیدی و هزینه‌های زنجیره تأمین، در نظر گرفتن این عوامل در مدیریت پسماند ضروری است. هدف این پژوهش، توسعه مدل ریاضی شبکه زنجیره تأمین معکوس پایدار جهت مدیریت پسماند جامد شهری است. در این مدل، پارامترهای هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز به‌عنوان پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جهت در نظرگرفتن عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار و روش برتسیمس‌وسیم استفاده شده است. در نهایت جهت بررسی اعتبار مدل یک مثال عددی حل شده است که با توجه به چندهدفه بودن مدل از روش محدودیت اپسیلون برای حل استفاده شده است. بر اساس نتایج، مدل طراحی‌شده می‌تواند هزینه‌های مدیریت پسماند، از جمله هزینه‌های انتقال پسماند و هزینه‌های عملیاتی مانند جمع‌آوری، تفکیک، پردازش، بازیافت را کاهش دهد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

کلیدواژه‌ها:
زنجیره تأمین معکوس
زنجیره تأمین پایدار
مدیریت پسماند
بهینه‌سازی استوار

استناد: مظفری، محمد، دانشور، مریم، کریمی جعفری، فاطمه، " بهینه‌سازی چندهدفه زنجیره تأمین معکوس پایدار زباله‌های جامد شهری با در نظر گرفتن عدم قطعیت : رویکرد بهینه‌سازی استوار "، نشریه مدیریت زنجیره تامین، دوره ۱۶، شماره ۸۸، صفحات ۳۴-۱، ۱۴۰۴.
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1404.27.88.1.7

OPEN ACCESS
ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع). © نویسندگان.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت جوامع و صنعتی شدن آن‌ها، تاثیرات منفی بر محیط زیست داشته است و برای حل این مشکلات باید اقدامات جدی انجام داد. در این راستا توجه به اصول پایداری یک الزام راهبردی برای تضمین بقا و تاب‌آوری در برابر بحران‌های آینده به‌شمار می‌رود. کشورهای توسعه یافته با سرعت بیشتری در این مسیر حرکت می‌کنند ولی کشورهای در حال توسعه به دلیل کمبود منابع، نبود حمایت‌های موثر از طرف دولت و کمبود نیروی کار ماهر با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند و در این شرایط کسب‌وکارها برای رشد اقتصادی خود و تمرکز بر این مورد جنبه زیست محیطی را نادیده گرفته و باعث آسیب به محیط زیست می‌شوند [۱]. پایداری در دنیای امروز به یک دغدغه جهانی و به یک موضوع شناخته شده در بسیاری از کشورها، تبدیل شده است. بر اساس اهداف هزاره پیشین که توسط سازمان ملل متحد تعیین شده است، ۱۷ هدف توسعه پایداری که شامل ایجاد شهرها و جوامع پایدار، کاهش نابرابری، مصرف و تولید مسئولانه و مقابله با تغییرات اقلیمی است، باید تا سال ۲۰۳۰ تحقق یابند. از زمان تعیین این اهداف، مبحث توسعه پایداری مورد توجه بسیاری از پژوهشگران، کسب‌وکارها، دولت‌ها و نهادهای نظارتی قرار گرفته است و همانطور که ذکر شد، هدف اصلی از پایداری، اطمینان از برآورده شدن نیازهای نسل حاضر بدون اینکه توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهایشان را به خطر بیندازد [۲]. مدیریت پسماند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محورهای توسعه پایدار، از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی در سال ۱۴۰۰ حدود ۲۰ میلیون تن پسماند عادی در کشور بوده است که بیش از ۸۳ درصد آن را شهرنشینان و بیش از ۱۶ درصد را روستانشینان تولید کرده‌اند. با توجه به حجم بالای تولید زباله این موضوع به یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های پیش‌روی دولت‌ها برای حفاظت از محیط‌زیست و کنترل آلودگی تبدیل شده است [۳]. مدیریت صحیح پسماند می‌تواند از پیامدهای منفی آن بر سلامت انسان‌ها و محیط‌زیست جلوگیری کند. اقدامات ضروری در این زمینه شامل افزایش آگاهی مردم، سرمایه‌گذاری و توسعه برنامه‌های کاربردی است [۴] ,[۳]. با رشد سریع جمعیت، حجم زباله‌های جامد در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است[۵]. این موضوع، همراه با نگرانی‌های اقتصادی و زیست محیطی، کشورها را به استفاده از روش های مختلف بازیافت زباله‌های جامد سوق داده است. برخی از این زباله‌ها از نظر اقتصادی ارزشمند هستند و جمع‌آوری آن‌ها می‌تواند سودآور باشد، اما موانعی مانند هزینه‌های بالای جمع‌آوری و الزامات حفاظت از محیط‌زیست، این فرآیند را با چالش مواجه کرده‌اند [۵]. برای مدیریت مؤثر زباله های جامد شهری، توسعه یک زنجیره تأمین معکوس کارآمد که هر سه بعد پایداری (اقتصادی،زیست محیطی و اجتماعی) را در نظر بگیرد، ضروری است [۵]. زنجیره تأمین معکوس نقش کلیدی در موفقیت کسب‌وکارهای امروزی دارد و طراحی آن برای جمع‌آوری، پردازش، بازیافت و دفع مواد زائد شهری حیاتی است. دولت‌ها برای کاهش هزینه‌ها، بهبود عملکرد و پاسخگویی به تقاضای مصرف کنندگان، باید به جنبه های پایداری در زنجیره تأمین توجه کرده و آن ها را به درستی طراحی کنند. یک زنجیره تأمین پایدار باید بین ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تعادل ایجاد کند [۶].

طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار [1] فرآیندی پیچیده است که شامل تصمیم‌گیری‌هایی مانند مکان‌یابی تأسیسات و مراکز دفع و بازیافت زباله، تعیین مسیرهای حمل ونقل و مدیریت موجودی می‌شود. این تصمیم‌ها می‌توانند بر اثرات زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی تأثیر بگذارند. برای دستیابی به پایداری، عواملی مانند کاهش انتشار کربن و آلودگی (زیست‌محیطی)، کاهش هزینه‌ها یا افزایش سود (اقتصادی) و مسائل اخلاقی، مسئولیت پذیری اجتماعی و افزایش رضایت شهروندان یا اشتغال زایی (اجتماعی) باید در نظر گرفته شوند. مفاهیمی مانند لجستیک معکوس برای ایجاد تعادل بین این ابعاد توسعه یافته‌اند [۶].

یکی از چالش های مهم در دستیابی به پایداری، در نظر گرفتن عدم قطعیت ها است. عواملی مانند نوسانات تقاضا، پویایی بازار، تغییر قوانین و مقررات، و در دسترس بودن منابع مانند بلایای طبیعی یا تغییرات آب‌وهوایی می‌توانند تأثیرات منفی بر مدیریت زنجیره تأمین و پایداری آن داشته باشند. این عدم قطعیت‌ها ممکن است منجر به افزایش هزینه‌ها یا ضایعات شوند. یکی از راه‌حل‌های مقابله با این چالش‌ها، توسعه مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی است که توانایی در نظر گرفتن غیرقابل‌پیش‌بینی بودن زنجیره تأمین را دارند [۶].

تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی زنجیره تأمین پایدار مدیریت پسماند، نشان داده است که مطالعات کمی وجود دارد که هر سه جنبه پایداری یعنی اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را به صورت همزمان همراه با عدم قطعیت در پارامترها با استفاده از

[1] Sustainable Supply Chain Network Design

رویکرد بهینه‌سازی استوار در نظر بگیرند. [۶] در برخی مطالعات توجه زیادی به جنبه‌های اجتماعی صورت نگرفته است که این باعث می‌شود که نتوان به یک زنجیره تأمین پایدار واقعی و کارآمد دست پیدا کرد و همچنین می‌تواند اثرات منفی در زنجیره تأمین مانند نقض قوانین مربوط به حقوق کارگران، حقوق انسانی یا نقض مسائل اخلاقی شود پس توجه به هر سه جنبه پایداری ضروری است [۷]. همچنین مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت و بازیافت پسماند، بیشتر بر اساس پارامترهای قطعی تصمیم‌گیری شده است در حالیکه همانطور که قبلا ذکر شد، در دنیای واقعی پارامترهای بسیاری وجود دارد که دارای عدم قطعیت هستند مثلا مقدار زباله جمع‌آوری شده یا هزینه حمل و نقل که این عدم قطعیت‌ها می‌توانند تاثیرات زیادی بر مسائل اقتصادی و زیست محیطی بگذارند و باید به این موارد توجه کرد [۵]. با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی ذکر شده و رسیدن به جواب‌های قابل اعتماد در شرایط عدم اطمینان هدف این مطالعه، توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس پایدار به منظور مدیریت پسماندهای جامد شهری است که در این مدل سه بعد پایداری در نظر گرفته شده‌اند و عدم قطعیت نیز با استفاده از بهینه‌سازی استوار در مدل لحاظ شده است. در راستای تحقق این هدف سوالات تحقیق حاضر عبارتند از: جنبه اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی پایداری برای مدیریت پسماند را به چه صورت می‌توان در مدل‌سازی ریاضی در نظر گرفت؟ مدل ریاضی زنجیره تأمین معکوس پایدار پسماندهای جامد شهری با رویکرد بهینه‌سازی استوار به چه صورت است؟

۲- ادبیات نظری و پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین یک شبکه پیچیده است که شامل تمام مراحل تبدیل مواد اولیه به محصول نهایی و تحویل آن به مشتری می‌شود. این شبکه از اجزایی مانند تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبارها، توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان نهایی تشکیل شده است که شامل سه جریان اصلی یعنی جریان کالا (تولید، انبارداری و توزیع محصول)، جریان اطلاعات (میزان سفارشات، میزان موجودی، قیمت و ...) و جریان مالی (تمام تراکنش‌های مالی در زنجیره تأمین)، می‌باشد [۸].

مدیریت زنجیره تأمین یک رویکرد جامع برای یکپارچه‌سازی این جریان‌ها در یک زنجیره از تأمین‌کنندگان تا مصرف‌کنندگان نهایی همچنین فرایند برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی، اجرا و کنترل کلیه بخش‌های آن می‌باشد [۹]. این مدیریت باعث بهینه‌سازی جریان کالا و در نتیجه کاهش هزینه‌ها، بهبودخدمات‌رسانی و پاسخگویی به مصرف‌کنندگان و همچنین صرفه‌جویی در زمان و امکان شرکت در رقابت‌های جهانی می‌شود [۱۱] ,[۱۰].

زنجیره تأمین معکوس نیز به عنوان بخشی از مدیریت زنجیره تأمین، به فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان معکوس مواد اولیه، محصولات در حال بازیابی، بسته‌بندی و محصولات نهایی از نقطه تولید به مراکز بازیافت یا دفع است و جریان مواد از مصرف‌کنندگان به مراکز بازیافت یا دفع می‌باشد و مزایایی از جمله استفاده بهینه از منابع، افزایش درامد و کاهش پسماند را به همراه دارد [۱۳] ,[۱۲]. فعالیت‌های اصلی این فرایند شامل حمل‌ونقل، انبارداری، توزیع و مدیریت موجودی محصولات برگشتی است [۱۰]. تصمیمات اصلی در این حوزه شامل بازیافت، بازسازی، تعمیر و نگهداری و دفع محصولات است[۱۳] . با این حال، چالش اصلی در اجرای لجستیک معکوس، هزینه‌های بالای آن است که ممکن است از ارزش مواد اولیه یا محصولات جدید بیشتر شود به همین خاطر مدیریت این فعالیت‌ها برای هر شرکتی ضروری می‌باشد [۱۰].

زنجیره تأمین پایدار نیز به عنوان یک رویکرد نوین در مدیریت زنجیره تأمین مطرح شده است که بر تعادل بین جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تأکید دارد که یکی از اهداف اصلی سازمان‌ها برای به دست آوردن مزیت‌های رقابتی، در نظر گرفتن این سه جنبه در برنامه‌های کسب‌وکار خود است و به همین دلیل مطالعه در این زمینه بسیار مهم می‌باشد [۱۴]. این موضوع برای اولین بار در سال ۱۹۸۷ به عنوان توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی نسل آینده برای تأمین نیازهای خود برآورده می‌کند، بیان شد و امروزه در نظر گرفتن هر سه جنبه بسیار اهمیت دارد [۱۶] ,[۱۵]. جنبه اقتصادی پایداری بر کاهش هزینه‌ها، افزایش سودآوری و بقای بلندمدت سازمان، جنبه زیست‌محیطی بر کاهش آلودگی، حفظ منابع و کاهش مصرف انرژی و جنبه اجتماعی بر رعایت حقوق کارگران و مسئولیت‌های اجتماعی متمرکز است [۶].

یکی از چالش‌های اصلی در دستیابی به پایداری در زنجیره تأمین، عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مختلف مانند تقاضا، اختلال در توزیع، تغییرات قوانین و مقررات، هزینه‌های زنجیره و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد زنجیره تأمین و اهداف پایداری داشته باشند و طراحی شبکه‌های پایدار را به چالش‌های جدی تبدیل کنند. برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی پیچیده که بتوانند ماهیت غیرقابل پیش‌بینی بودن عملیات زنجیره تأمین را در

نظـر بگیرنـد، ضـروری اسـت [۶]. هـدف نهـایی از طراحـی چنـین شبکه‌هایی، ایجاد سیستم‌های انعطاف‌پذیری است که بتوانند در برابـر تغییرات احتمالی و شرایط مختلف همچنـان عملکـرد خـوبی داشـته باشند [۹].

در ادامه به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه طراحـی شـبکه زنجیره تأمین پایدار و مدیریت پسماند که در طی سال‌هـای گذشـته انجام شده است می‌پردازیم.

کومار (۲۰۲۴) در پژوهشی به طراحی یک شبکه زنجیـره تـأمین پایدار با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه پرداخت. این مدل از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) بـرای یـک زنجیـره تأمین چهار مرحله‌ای (شامل تأمین‌کنندگان، مراکـز تولیـد، توزیـع و مصرف‌کنندگان) اسـتفاده مـی‌کنـد. بـرای حـل عـدم قطعیـت‌هـا از برنامه‌ریزی با محدودیت تصادفی استفاده شده است. نتایج نشـان داد که در نظر گرفتن هر سه بعـد پایـداری در طراحـی زنجیـره تـأمین، منجـر بـه موفقیـت‌هـای چشـمگیر و تـأثیرات مثبـت بـر جامعـه و محیط‌زیست می‌شود [۶].

مومنی و همکاران (۲۰۲۴) یک مـدل چندهدفـه بـرای طراحـی شبکه زنجیـره تـأمین حلقـه‌بسـته پایـدار ارائـه دادنـد. ایـن مـدل از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفـه اسـتفاده مـی‌کنـد و سـه هدف اقتصادی(حداقل کردن هزینه‌های کل)، زیست محیطی(حداقل کردن انتشار کـربن و مصـرف انـرژی) و اجتمـاعی(افزایش اشـتغال و خودکفایی) دنبال می‌نماید. این مدل به صورت چنـد دوره‌ای و چنـد محصوله طراحی شده و برای حل آن از روش محـدودیت اپسـیلون و به‌دست آوردن جواب‌های پارتو استفاده شده اسـت. نتـایج نشـان داد که توجه بیشتر به جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطـی، هزینـه‌هـای کلی سیستم را افزایش می‌دهد و افزایش تقاضا بیشـترین تـأثیر را بـر هزینه‌های زنجیره تأمین دارد [۱۷].

هونگ و همکاران (۲۰۲۳) به طراحی یک شبکه زنجیـره تـأمین برای جمع‌آوری و انتقال زباله‌های جامد شهری طبقـه‌بنـدی‌شـده بـا اسـتفاده از وسـایل نقلیـه چنـد محفظـه‌ای پرداختنـد. ایـن مـدل از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای تعیین مکان‌های ایستگاه‌هـای انتقـال زبالـه (مکـان‌یـابی) و مسـیرهای وسـایل نقلیـه جمع‌آوری (مسیریابی) اسـتفاده مـی‌کنـد. محـدودیت‌هـای ظرفیـت وسایل نقلیه نیز در نظر گرفته شده‌اند. در زنجیره تأمین طراحی شـده بعد اجتماعی بررسی نشده است. بـرای حـل مـدل، از یـک الگـوریتم ترکیبی ALNS[1] استفاده شده که برای مسائل بزرگ مقیاس مناسـب است. نتایج نشـان داد کـه تفکیـک پسـماند در مبـدأ باعـث کـاهش هزینه‌های سیستم و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. ایـن مـدل در یکی از شهرهای چین پیاده‌سازی شد [۱۸].

اقبالی و همکاران (۲۰۲۲) یک شبکه زنجیره تأمین پایـدار چهـار سطحی شامل مراکز جمـع‌آوری زبالـه، ایسـتگاه‌هـای انتقـال، مراکـز بازیافت و محل‌های دفن زباله را برای مدیریت پسماند شهری طراحی کردند. از برنامه‌ریزی خطی عـدد صـحیح مخـتلط (MILP) و روش LP-METRIC برای حل مسئله استفاده شده است. نتـایج نشـان داد که انتخاب فناوری مناسب به هدف زنجیره تأمین وابسـته اسـت و در نظـر گـرفتن هـر سـه بعـد پایـداری (اقتصـادی، اجتمـاعی و زیست‌محیطی) بـه‌صـورت یکپارچـه، مزایـایی ماننـد تصـمیم‌گیـری آگاهانه برای مدیران، کاهش هزینه‌ها و بهبود شـرایط محیطـی را بـه همراه دارد [۳].

عباسی و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل زنجیره تأمین چنـد هدفـه برای مدیریت پسماند و تولید انرژی (برق) معرفی کردنـد. ایـن مـدل شامل مراکز جمع‌آوری زباله، مرکز جداسازی، نیروگـاه‌هـای بیوگـاز و سوزاندن است. زباله‌ها بر اسـاس رطوبـت تفکیـک شـده و بـه مراکـز مختلف ارسال می‌شوند. جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی پایداری در این مدل در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مدل، از ترکیـب MILP و مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با استفاده از الگوریتم ژنتیـک و روش محدودیت اپسیلون استفاده شده است. نتـایج نشـان داد کـه کـاهش ترکیبـات اسـیدی و CO_2 تـأثیرات مثبتـی بـر محـیط‌زیسـت دارد و افزایش هزینه‌های تولید برق باعث کـاهش سـود سیسـتم مـی‌شـود [۱۹].

یانگ و همکاران (۲۰۲۱) به بـازطراحی زنجیـره تـأمین پسـماند شهری پرداختند که شامل سه مرحله اصلی جمع‌آوری، حمل‌ونقـل و دفع زباله است. این پژوهش جنبه‌هـای اقتصـادی و زیسـت‌محیطـی پایداری را در نظر می‌گیرد. نتـایج نشـان داد کـه بـازطراحی زنجیـره تأمین باعث بهبود سیستم حمل‌ونقل و حمایت از طبقـه‌بنـدی زبالـه می‌شود، اما ممکن است حجم کار انتقـال زبالـه و نیـاز بـه تجهیـزات تخصصی را افزایش دهد. [۲۰].

صادقی‌آهنگـر و همکـاران (۲۰۲۱) یـک زنجیـره تـأمین پایـدار چندهدفه بـرای مـدیریت پسـماند شـهری طراحـی کردنـد. در ایـن پژوهش از برنامه‌ریزی فازی برای حل عدم قطعیت‌هـا و برنامـه‌ریـزی

[1] Adaptive Large Neighborhood Search

خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای بهبود مکان‌یابی مراکز بازیافت استفاده شده است. هر سه جنبه پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) شامل افزایش درآمد، کاهش آلاینده‌ها و افزایش تعداد کارکنان در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مسئله از روش محدودیت افزایشی اپسیلون استفاده شده است. نتایج نشان داد که مدیران می‌توانند بین اهداف مختلف (مانند کاهش هزینه‌ها، افزایش اشتغال یا کاهش آلودگی) اولویت‌بندی کنند و تصمیم‌گیری نمایند [۴].

ساجدی و همکاران (۲۰۲۰) یک شبکه لجستیک معکوس پایدار با در نظر گرفتن معیار ریسک و عدم قطعیت تقاضا طراحی کردند. این مدل چندهدفه، چند محصولی و چند دوره‌ای شامل مکان‌یابی مراکز توزیع، جمع‌آوری، بازیافت و دفع است. اهداف پایداری شامل حداقل‌سازی هزینه‌ها (اقتصادی)، کاهش اثرات زیست‌محیطی و حداکثرسازی فرصت‌های شغلی (اجتماعی) است. برای مقابله با عدم قطعیت در تقاضا و کیفیت محصول، از روش‌های مبتنی بر فازی استفاده شده است. مدل با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه[1] (MOPSO) حل شده و نتایج با روش محدودیت اپسیلون مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که افزایش ظرفیت مراکز باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود و مدیران باید برآوردی از تقاضا در دوره‌های مختلف داشته باشند[۲۱] .

آیواز و همکاران (۲۰۱۹) نیز در یک مطالعه، برای مدیریت پسماند شهری از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی (MP) استفاده کردند. در این مدل‌سازی بر روی یک مسئله چند هدفه کار کردند که هدف اول حداقل کردن کل هزینه و هدف دوم، کاهش اثرات زیست محیطی است که یعنی دو جنبه پایداری در نظر گرفته می‌شود و جنبه اجتماعی در این پژوهش مورد بررسی قرار نمی‌گیرد [۲۲].

محمدی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به برنامه‌ریزی سیستم‌های مدیریت پسماند شهری در یک شبکه یکپارچه زنجیره تأمین پرداختند. این شبکه از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)برای هماهنگی تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی در یک زنجیره تأمین چند سطحی، چند محصولی و چند دوره‌ای استفاده می‌کند. اهداف این مدل فقط اقتصادی بوده و شامل حداکثرسازی سود از فروش محصولات بازیافتی و حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم مدیریت پسماند با رعایت محدودیت‌های تقاضا، تولید، حمل‌ونقل و موجودی است. در این مدل، عدم قطعیت در پارامترها در نظر گرفته نشده و از داده‌های قطعی استفاده شده است. نتایج نشان داد که این شبکه یکپارچه می‌تواند به حداکثر استفاده از پسماندهای قابل بازیافت مانند کاغذ، پلاستیک، شیشه و فلز و پسماندهای غیرقابل بازیافت در نیروگاه‌های تبدیل به انرژی دست یابد. [۲۳].

دوان و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بهینه‌سازی کل هزینه‌های زنجیره تأمین معکوس برای ضایعات الکترونیکی با در نظر گرفتن ریسک حمل‌ونقل پرداختند. مدل طراحی شده در این مقاله پایدار نیست، زیرا فقط اهداف اقتصادی را در نظر می‌گیرد که شامل حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم زنجیره تأمین معکوس ضایعات الکترونیکی است. این مدل چند محصولی و چند سطحی است و از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای مدل‌سازی استفاده شده است. پارامترهای مدل به صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند به مدیران در طراحی شبکه زنجیره تأمین برای ضایعات الکترونیکی با در نظر گرفتن ریسک‌ها و خطرات آن، کمک کند [۲۴].

شرایبر و یانگ (۲۰۱۸) در یک پژوهش به یک مدل بهینه‌سازی لجستیک چند مرحله‌ای و دفع پسماندهای جامد شهری در شهر پکن چین پرداختند. هدف از این تحقیق مدل‌سازی سیستم مدیریت پسماند جامد شهری و ارائه روش‌هایی برای اجرای آن به دلیل کاهش هزینه‌های کل سیستم شامل هزینه جمع‌آوری، حمل‌ونقل، تصفیه و دفع (جنبه اقتصادی) و توسعه الگوی مصرف است در نتیجه این مدل یک شبکه پایدار نیست و پارامترهای مدل نیز قطعی هستند و عدم قطعیت در نظر گرفته نشده است. [۲۵].

شو و همکاران (۲۰۱۷) نیز به طراحی زنجیره تامین معکوس جهانی[2] (GRSC) برای بازیافت پسماندهای جامد شهری پرداختند که در آن جنبه‌های اقتصادی و زیست محیطی پایداری در نظر گرفته می‌شود همچنین عوامل عدم قطعیت نیز لحاظ می‌شود. طبق نتایج پژوهش، مدل طراحی شده به مدیران سیستم فرایند بازیافت زباله کمک می‌کند تا با کنترل کردن هزینه‌ها و انتشار کربن، بتوان عدم قطعیت‌ها را کنترل کرد [۵].

شب‌انگیز و همکاران (۱۴۰۲) در یک پژوهش یک مدل ریاضی چندهدفه را برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین معکوس و همچنین به‌دست آوردن انرژی پیشنهاد دادند. در این مطالعه، هدف اول حداقل کردن هزینه‌های سیستم (جنبه اقتصادی) و هدف دوم، کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و انتشار کربن (جنبه زیست

[1] Multi Objective Particle Swarm Optimization Algorithm

[2] Global Reverse Supply Chain

محیطی) است و از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای این منظور استفاده می‌شود. در این مطالعه زنجیره تأمین معکوس شامل جمع‌آوری، بازیافت، بدست آوردن انرژی و دفع می‌شود و برای حل مدل از روش ترکیب وزنی نرمالایز استفاده می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با ترکیب درست استفاده از منابع همراه با کاهش اثرات زیست محیطی، می‌توان به طور همزمان به اهداف اقتصادی و محیطی دست پیدا کرد [۲۶].

فیروزی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به مدل‌سازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با در نظر گرفتن ابعاد پایداری و تئوری مجموعه فازی پرداختند. این مطالعه از یک مدل تک‌دوره (دوره همه‌گیری کرونا) برای زنجیره تأمین معکوس در ایران استفاده کرد. اهداف مدل شامل اقتصادی(حداقل کردن هزینه‌های شبکه)، زیست محیطی(حداکثر کردن انرژی تولیدی از سوزاندن زباله‌ها و حداقل کردن آلودگی‌های حمل‌ونقل) و اجتماعی(حداقل کردن ریسک ابتلا به کرونا و افزایش اشتغال) می‌باشد. عدم قطعیت در پارامترهایی مانند میزان پسماند تولیدی بیمارستان‌ها با استفاده از اعداد فازی لحاظ شد. برای حل مدل چندهدفه، از الگوریتم‌های دسته میگوها و ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم دسته میگوها به پاسخ‌های بهتر و با پراکندگی بالاتر دست یافت، در حالی که الگوریتم ژنتیک سریع‌تر به جواب رسید [۲۷].

صفری و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش خود از نظریه‌ی بازی استکلبرگ در یک زنجیره تأمین حلقه بسته با هدف افزایش سود استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سودآوری زنجیره تأمین با پرداخت مبلغی به‌صورت مشترک توسط تولیدکننده و طرف سوم قرارداد جهت جمع‌آوری و بازتولید محصول مستهلک به بیشترین میزان خود خواهد رسید [۲۸].

موسویان و زینال‌نژاد (۱۴۰۱) با هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت‌مندی مشتری از تکنیک‌های داده‌کاوی و مدل‌سازی ریاضی جهت طراحی زنجیره تأمین معکوس در صنعت مد استفاده کرده‌اند. نتایج حل مدل نشان می‌دهد حداقل تخفیفات منجر به حداقل‌سازی هزینه‌ها می‌گردد و در صورت اعمال سقف تخفیفات، رضایت مشتریان حداکثر می‌گردد. برای دستیابی به مقادیر بهینه میزان تخفیف باید به صورتی اعمال گردد که مقادیر توابع هدف هزینه و رضایت مشتری در تعادل با یکدیگر باشند [۲۹].

نیک‌ضمیر و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین برای مدیریت پسماندهای بیمارستانی پرداختند. این مطالعه از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه، چندسطحی و چندمحصولی استفاده کرد که عدم قطعیت در آن لحاظ نشده بود. برای حل مدل چندهدفه، ابتدا از روش LP-METRIC برای تک‌هدفه‌سازی استفاده شد و سپس از یک الگوریتم فرا ابتکاری با ترکیب الگوریتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک بهره گرفته شد. مدل ارائه شده علاوه بر مدیریت پسماندهای بیمارستانی در شرایط کرونا، قابلیت استفاده برای جمع‌آوری مواد خطرناک صنایع را نیز دارد [۳۰].

حسینی و آقایی (۱۳۹۸) در پژوهش خود موانع اجرای لجستیک معکوس و راه‌حل‌های رفع این موانع را با بکارگیری رویکرد هیبریدی تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی، شناسایی و اولویت‌بندی کرده‌اند [۳۱].

معنوی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین معکوس مسائل مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی را برای جمع‌آوری زباله‌های خطرناک، در نظر می‌گیرد که یک مدل چند محصولی و چند دوره‌ای است همچنین در این مدل دو جنبه پایداری بررسی می‌شود که از نظر اقتصادی به کاهش هزینه‌های طراحی این سیستم می‌پردازد و برای جنبه اجتماعی، ریسک ایجاد مراکز جمع‌آوری و انتقال زباله‌ها در نظر گرفته می‌شود. [۳۲].

اسمعیل‌زاده و صاحبی (۱۳۹۷) در یک پژوهش، به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین معکوس برای پسماند شهری پرداختند که در این مدل جنبه اقتصادی که شامل حداکثر کردن سود و جنبه زیست محیطی که شامل حداقل کردن انتشار CO_2 است، می‌پردازد. در این مدل به مسئله مکان‌یابی توجه می‌شود و با استفاده از آن می‌توان مکان تاسیسات را بهینه کرد. در این مطالعه برای مدل از روش محدودیت اپسیلون و برای بهینه کردن مکان تاسیسات، از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده می‌شود. طبق این مقاله که یک مطالعه موردی در شهر شیراز است و با توجه به نتایج به دست آمده، برای انتخاب مکان مناسب ایستگاه انتقال در نظر گرفته شده است که این مکان‌ها دارای اولویت بالاتری نسبت به دیگر مکان‌ها و هم هزینه احداث و اثرات محیطی کمتری دارند [۳۳].

پایدار و همکاران (۱۳۹۳) یک مدل لجستیک مستقیم و معکوس یکپارچه در شرایط عدم قطعیت با به‌کارگیری رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت سناریو ارائه کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از تسهیلات ترکیبی توزیع و جمع‌آوری منجر به کاهش هزینه‌های احداث و نگهداری می‌شود [۳۴].

جدول (۱): خلاصه پیشینه در ارتباط با طراحی زنجیره تأمین معکوس

		هدف		دوره زمانی		مسئله					جنبه‌های پایداری			رویکرد حل	
ردیف	نویسنده و سال	تک هدفه	چند هدفه	تک دوره	چند دوره	مکان‌یابی	مسیریابی	موجودی	تخصیص	اقتصادی	محیطی	اجتماعی	قطعی	عدم قطعیت
۱	[۶]		✓	✓			✓			✓	✓	✓		تصادفی
۲	[۱۷]		✓		✓					✓	✓	✓	✓	
۳	[۱۸]		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
۴	[۳]		✓		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	
۵	[۱۹]		✓	✓			✓			✓	✓		✓	
۶	[۲۰]		✓	✓			✓		✓	✓	✓		✓	
۷	[۴]		✓		✓	✓				✓	✓	✓		فازی
۸	[۲۱]		✓		✓	✓				✓	✓	✓		فازی
۹	[۲۲]		✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓	
۱۰	[۲۳]	✓			✓					✓			✓	
۱۱	[۲۴]	✓			✓	✓	✓			✓			✓	
۱۲	[۲۵]	✓			✓			✓		✓			✓	
۱۳	[۵]		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			استوار
۱۴	[۳۵]	✓		✓		✓	✓	✓		✓			✓	
۱۵	[۱۵]		✓	✓						✓	✓	✓	✓	
۱۶	[۲۶]		✓	✓			✓			✓	✓		✓	
۱۷	[۲۷]		✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓		فازی
۱۸	[۳۰]		✓		✓	✓	✓			✓	✓		✓	
۱۹	[۳۲]		✓		✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	
۲۰	[۳۳]		✓	✓		✓				✓	✓		✓	
۲۱	**مطالعه حاضر**		✓	✓		✓				✓	✓	✓		**استوار**

۳- روش تحقیق

۳-۱- روش‌شناسی تحقیق

طبق پیاز پژوهش دانایی‌فرد و همکاران (۱۳۹۳) که شامل ۸ لایه می‌باشد این تحقیق از نظر فلسفی جزء پارادایم اثبات‌گرایی است. طبق لایه دوم یعنی هدف و جهت‌گیری پژوهش، یک مطالعه کاربردی با رویکرد قیاسی است. روش‌شناسی این تحقیق به صورت کمی انجام می‌شود و برای گردآوری داده‌ها از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی استفاده می‌شود. راهبرد تحقیق به صورت پیمایشی است به دلیل اینکه برای جمع‌آوری اطلاعات و داده‌ها از ابزار اسناد و مدارک که در منابع مربوط به موضوع تحقیق، موجود است و همچنین داده‌هایی که به صورت میدانی و کتابخانه‌ای به‌دست می‌آید، استفاده می‌شود. اهداف این پژوهش توصیفی می‌باشد و در آخر برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از اسناد و مدارک موجود استفاده می‌شود [۳۶].

۳-۲- مدل‌سازی ریاضی در حالت قطعی

در این قسمت به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین چندهدفه، چندسطحی و تک‌دوره به صورت ریاضی پرداخته می‌شود که در ابتدا مفروضات مدل طراحی شده، بیان می‌شود و بعد از آن به تعریف اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل پرداخته و در ادامه توابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی نوشته و توضیحات آن‌ها بیان می‌شود. در ابتدای زنجیره نقطه شروع i است که شامل منابع تولید زباله از جمله خانه‌ها، شرکت‌ها و سازمان‌ها و جمع‌آوری آن‌ها از سطل‌های زباله می‌شود. در ادامه پسماند تولید شده توسط وسایل نقلیه به مرکز جمع‌آوری منتقل شده و در مرحله بعد به مراکز تفکیک حمل می‌شوند تا انواع پسماند از هم جدا شوند. در سطح بعد به مرکز پردازش منتقل شده تا بتوان زباله‌هایی که قابل بازیافت هستند را در سطح آخر به مرکز بازیافت و زباله‌هایی که غیرقابل بازیافت هستند به مرکز دفع منتقل شوند.

مفروضات مدل عبارت‌اند از:

- مدل طراحی شده زنجیره تأمین پایدار به صورت چندهدفه است که همزمان دارای سه هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی می‌شود.
- در مدل طراحی شده مکان مراکز مختلف در زنجیره از جمله مراکز جمع‌آوری، تفکیک، پردازش، بازیافت و دفع از قبل مشخص است.
- در مدل طراحی شده مسیر حمل‌ونقل وسایل برای انتقال پسماند بین مراکز از قبل مشخص است.
- مدل به صورت چندسطحی شامل مراکز جمع‌آوری، تفکیک و جداسازی، پردازش، بازیافت و دفع طراحی شده است.
- مدل زنجیره تأمین ایجاد شده تک‌دوره است و برای یک دوره طراحی شده است.

جدول (۲): اندیس‌های مدل

نماد	اندیس ها
i	اندیس نقطه تولید پسماند (i=1,2,...,N)
v	اندیس وسیله نقلیه (v=1,2,...,V)
w	اندیس پسماند جامد شهری (w=1,2,...,W)
m	اندیس مرکز جمع‌آوری (m=1,2,...,M)
s	اندیس مرکز تفکیک (s=1,2,...,S)
p	اندیس مرکز پردازش (p=1,2,...,P)
r	اندیس مرکز بازیافت (r=1,2,...,R)
D	اندیس مرکز دفع (d=1,2,...,D)

جدول (۳): پارامترهای مدل

نماد	تعریف
Cm_{wvim}	هزینه حمل هر واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از نقطه تولید i به مرکزجمع‌آوری m
Cs_{wvms}	هزینه حمل هر واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تفکیک s
Cp_{wvsp}	هزینه حمل هر واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز تفکیک s به مرکز پردازش p
Cr_{wvpr}	هزینه حمل هر واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز پردازش p به مرکز بازیافت r
Cd_{wvpd}	هزینه حمل هر واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز پردازش p به مرکز دفع d
$T1_{mw}$	هزینه جمع آوری پسماند w توسط مرکز جمع‌آوری m

جدول (۳): پارامترهای مدل

نماد	تعریف
$T2_{sw}$	هزینه تفکیک پسماند w توسط مرکز تفکیک s
$T3_{pw}$	هزینه پردازش پسماند w توسط مرکز پردازش p
$T4_{rw}$	هزینه بازیافت پسماند w توسط مرکز بازیافت r
$T5_{dw}$	هزینه دفع پسماند w توسط مرکز دفع d
$f1_i$	هزینه ایجاد مرکز تولید پسماند i
$f2_m$	هزینه ایجاد مرکز جمع‌آوری m
$f3_s$	هزینه ایجاد مرکز تفکیک s
$f4_p$	هزینه ایجاد مرکز پردازش p
$f5_r$	هزینه ایجاد مرکز بازیافت r
$f6_d$	هزینه ایجاد مرکز دفع d
em_{wvim}	میزان آلودگی ناشی از حمل یک واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از نقطه i به مرکزجمع‌آوری m
es_{wvms}	میزان آلودگی ناشی از حمل یک واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تفکیک s
ep_{wvsp}	میزان آلودگی ناشی از حمل یک واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز تفکیک s به مرکز پردازش p
er_{wvpr}	میزان آلودگی ناشی از حمل یک واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز پردازش p به مرکز بازیافت r
ed_{wvpd}	میزان آلودگی ناشی از حمل یک واحد پسماند w توسط وسیله نقلیه v از مرکز p به مرکز دفع d
$B1_{iw}$	میزان آلودگی ناشی از تولید پسماند w در نقطه تولید i
$B2_{mw}$	میزان آلودگی ناشی از جمع‌آوری پسماند w توسط مرکز جمع‌آوری m
$B3_{sw}$	میزان آلودگی ناشی از تفکیک پسماند w توسط مرکز تفکیک s
$B4_{pw}$	میزان آلودگی ناشی از پردازش پسماند w توسط مرکز پردازش p
$B5_{rw}$	میزان آلودگی ناشی از بازیافت پسماند w توسط مرکز بازیافت r
$B6_{dw}$	میزان آلودگی ناشی از دفع پسماند w توسط مرکز دفع d
$H1_m$	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز جمع‌آوری m
$H2_s$	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز تفکیک s
$H3_p$	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز پردازش p
$H4_r$	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز بازیافت r
$H5_d$	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز دفع d
$U1_v$	ظرفیت وسیله نقلیه v
$U2_{iw}$	ظرفیت مرکز تولید پسماند w در نقطه تولید i
$U3_{mw}$	ظرفیت مرکز جمع‌آوری m برای پسماند w
$U4_{sw}$	ظرفیت مرکز تفکیک s برای پسماند w

جدول (۳): پارامترهای مدل

نماد	تعریف
$U5_{pw}$	ظرفیت مرکز پردازش p برای پسماند w
$U6_{rw}$	ظرفیت مرکز بازیافت r برای پسماند w
$U7_{dw}$	ظرفیت مرکز دفع d برای پسماند w

جدول (۴): متغیرهای تصمیم

نماد	تعریف
$X1_i$	اگر مرکز تولید i ایجاد شود ارزش آن ۱ و در غیر اینصورت صفر است
$X2_m$	اگر مرکز جمع‌آوری m ایجاد شود ارزش آن ۱ و در غیر اینصورت صفر است
$X3_s$	اگر مرکز تفکیک s ایجاد شود ارزش آن ۱ و در غیر اینصورت صفر است
$X4_p$	اگر مرکز پردازش p ایجاد شود ارزش آن ۱ و در غیر اینصورت صفر است
$X5_r$	اگر مرکز بازیافت r ایجاد شود ارزش آن ۱ و در غیر اینصورت صفر است
$X6_d$	اگر مرکز دفع d ایجاد شود ارزش آن ۱ و در غیر اینصورت صفر است
Km_{wvim}	مقدار پسماند حمل شده w توسط وسیله نقلیه v از نقطه تولید i به مرکز جمع‌آوری m
Ks_{wvms}	مقدار پسماند حمل شده w توسط وسیله نقلیه v از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تفکیک s
Kp_{wvsp}	مقدار پسماند حمل شده w توسط وسیله نقلیه v از مرکز تفکیک s به مرکز پردازش p
Kr_{wvpr}	مقدار پسماند حمل شده w توسط وسیله نقلیه v از مرکز پردازش p به مرکز بازیافت r
Kd_{wvpd}	مقدار پسماند حمل شده w توسط وسیله نقلیه v از مرکز پردازش p به مرکز دفع d
$Q1_{iw}$	مقدار پسماند w جمع‌آوری شده در نقطه ابتدایی i
$Q2_{mw}$	مقدار پسماند w جمع‌آوری شده در مرکز جمع‌آوری m
$Q3_{sw}$	مقدار پسماند w تفکیک شده در مرکز تفکیک s
$Q4_{pw}$	مقدار پسماند w پردازش شده در مرکز پردازش p
$Q5_{rw}$	مقدار پسماند w بازیافت شده در مرکز بازیافت r
$Q6_{dw}$	مقدار پسماند w دفع شده در مرکز دفع d
Nm_{wvim}	تعداد وسیله نقلیه v برای حمل پسماند w از نقطه تولید i به مرکز جمع‌آوری m
Ns_{wvms}	تعداد وسیله نقلیه v برای حمل پسماند w از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تفکیک s
Np_{wvsp}	تعداد وسیله نقلیه v برای حمل پسماند w از مرکز تفکیک s به مرکز پردازش p
Nr_{wvpr}	تعداد وسیله نقلیه v برای حمل پسماند w از مرکز پردازش p به مرکز بازیافت r
Nd_{wvpd}	تعداد وسیله نقلیه v برای حمل پسماند w از مرکز پردازش p به مرکز دفع d

- توابع هدف

$$\text{Min } Z_1 = \text{Tc} + \text{Fc} + \text{Oc} \quad (۱)$$

$$Tc = \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{i\in N}\sum_{m\in M} Cm_{wvim} \times Km_{wvim} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{m\in M}\sum_{s\in S} Cs_{wvms} \times Ks_{wvms} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{s\in S}\sum_{p\in P} Cp_{wvsp} \times Kp_{wvsp} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{r\in R} Cr_{wvpr} \times Kr_{wvpr} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{d\in D} Cd_{wvpd} \times Kd_{wvpd} \quad (۲)$$

$$Fc = \sum_{i\in N} f1_i \times X1_i + \sum_{m\in M} f2_m \times X2_m + \sum_{s\in S} f3_s \times X3_s + \sum_{p\in P} f4_p \times X4_p + \sum_{r\in R} f5_r \times X5_r + \sum_{d\in D} f6_d \times X6_d \quad (۳)$$

$$Oc = \sum_{w\in W}\sum_{m\in M} T1_{mw} \times Q2_{mw} + \sum_{w\in W}\sum_{s\in S} T2_{sw} \times Q3_{sw} + \sum_{w\in W}\sum_{p\in P} T3_{pw} \times Q4_{pw} + \sum_{w\in W}\sum_{r\in R} T4_{rw} \times Q5_{rw} + \sum_{w\in W}\sum_{d\in D} T5_{dw} \times Q6_{dw} \quad (۴)$$

$$\text{Min } Z_2 = PT + PO \quad (۵)$$

$$PT = \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{i\in N}\sum_{m\in M} em_{wvim} \times Nm_{wvim} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{m\in M}\sum_{s\in S} es_{wvms} \times Ns_{wvms} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{s\in S}\sum_{p\in P} ep_{wvsp} \times Np_{wvsp} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{r\in R} er_{wvpr} \times Nr_{wvpr} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{d\in D} ed_{wvpd} \times Nd_{wvpd} \quad (۶)$$

$$PO = \sum_{w\in W}\sum_{i\in N} B1_{iw} \times Q1_{iw} + \sum_{w\in W}\sum_{m\in M} B2_{mw} \times Q2_{mw} + \sum_{w\in W}\sum_{s\in S} B3_{sw} \times Q3_{sw} + \sum_{w\in W}\sum_{p\in P} B4_{pw} \times Q4_{pw} + \sum_{w\in W}\sum_{r\in R} B5_{rw} \times Q5_{rw} + \sum_{w\in W}\sum_{d\in D} B6_{dw} \times Q6_{dw} \quad (۷)$$

$$\text{Max } Z_3 = JC \quad (۸)$$

$$JC = \sum_{w\in W}\sum_{m\in M} H1_m \times Q2_{mw} + \sum_{w\in W}\sum_{s\in S} H2_s \times Q3_{sw} + \sum_{w\in W}\sum_{p\in P} H3_p \times Q4_{pw} + \sum_{w\in W}\sum_{r\in R} H4_r \times Q5_{rw} + \sum_{w\in W}\sum_{d\in D} H5_d \times Q6_{dw} \quad (۹)$$

- محدودیت‌ها

$$Q1_{iw} = \sum_{m\in M}\sum_{v\in V} Km_{wvim} \quad \forall\ i\in N\ .w\in W \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{v\in V} Km_{wvim} = Q2_{mw} \quad \forall\ m\in M\ .w\in W \quad (۱۱)$$

$$Q2_{mw} = \sum_{s\in S}\sum_{v\in V} Ks_{wvms} \quad \forall\ m\in M\ .w\in W \quad (۱۲)$$

$$\sum_{m\in M}\sum_{v\in V} Ks_{wvms} = Q3_{sw} \quad \forall\ s\in S\ .w\in W$$

(۱۳)

$$Q3_{sw} = \sum_{p\in P}\sum_{v\in V} Kp_{wvsp} \quad \forall\ s\in S.w\in W$$

(۱۴)

$$\sum_{s\in S}\sum_{v\in V} Kp_{wvsp} = Q4_{pw} \quad \forall\ p\in P.w\in W$$

(۱۵)

$$Q4_{pw} = \sum_{r\in R}\sum_{v\in V} Kr_{wvpr} + \sum_{d\in D}\sum_{v\in V} Kd_{wvpd} \quad \forall\ p\in P.w\in W$$

(۱۶)

$$\sum_{p\in P}\sum_{v\in V} Kr_{wvpr} = Q5_{rw} \quad \forall\ r\in R.w\in W$$

(۱۷)

$$\sum_{p\in P}\sum_{v\in V} Kd_{wvpd} = Q6_{dw} \quad \forall\ d\in D.w\in W$$

(۱۸)

$$\sum_{w\in W} Q1_{iw} \le U2_{iw}\times X1_i \quad \forall\ i\in N$$

(۱۹)

$$\sum_{w\in W} Q2_{mw} \le U3_{mw}\times X2_m \quad \forall\ m\in M$$

(۲۰)

$$\sum_{w\in W} Q3_{sw} \le U4_{sw}\times X3_s \quad \forall\ s\in S$$

(۲۱)

$$\sum_{w\in W} Q4_{pw} \le U5_{pw}\times X4_p \quad \forall\ p\in P$$

(۲۲)

$$\sum_{w\in W} Q5_{rw} \le U6_{rw}\times X5_r \quad \forall\ r\in R$$

(۲۳)

$$\sum_{w\in W} Q6_{dw} \le U7_{dw}\times X6_d \quad \forall\ d\in D$$

(۲۴)

$$Km_{wvim} \le \sum_{v\in V} U1_v \times Nm_{wvim} \quad \forall\ w\in W.i\in N.m\in M$$

(۲۵)

$$Ks_{wvms} \le \sum_{v\in V} U1_v \times Ns_{wvms} \quad \forall\ w\in W.m\in M.s\in S$$

(۲۶)

$$Kp_{wvsp} \le \sum_{v\in V} U1_v \times Np_{wvsp} \quad \forall\ w\in W.s\in S.p\in P$$

(۲۷)

$$Kr_{wvpr} \le \sum_{v\in V} U1_v \times Nr_{wvpr} \quad \forall\ w\in W.p\in P.r\in R$$

(۲۸)

$$Kd_{wvpd} \le \sum_{v\in V} U1_v \times Nd_{wvpd} \quad \forall\ w\in W.p\in P.d\in D$$

(۲۹)

$$\sum_{i\in N} X1_i \ge 1$$

(۳۰)

$$\sum_{m\in M} X2_m \ge 1$$

(۳۱)

$$\sum_{s\in S} X3_s \ge 1$$

(۳۲)

$$\sum_{p\in P} X4_p \ge 1$$

(۳۳)

$$\sum_{r\in R} X5_r \ge 1$$

(۳۴)

$$\sum_{d\in D} X6_d \ge 1$$

(۳۵)

$$Km_{wvim}.Ks_{wvms}.Kp_{wvsp}.Kr_{wvpr}.Kd_{wvpd}.Q1_{iw}.Q2_{mw}.Q3_{sw}.Q4_{pw}.Q5_{rw}.Q6_{dw} \geq 0 \quad \forall \ v \in V.w \in W.i \in N.m \in M.s \in S.p \in P.r \in R.d \in D$$

(۳۶)

$$Nm_{wvim}.Ns_{wvms}.Np_{wvsp}.Nr_{wvpr}.Nd_{wvpd} \in Z^{+} \quad \forall \quad v \in V.w \in W.i \in N.m \in M.s \in S.p \in P.r \in R.d \in D$$

(۳۷)

$$X1_{i}.X2_{m}.X3_{s}.X4_{p}.X5_{r}.X6_{d} \in \{0.1\} \quad \forall \quad i \in N.m \in M.s \in S.p \in P.r \in R.d \in D$$

(۳۸)

رابطه (۱) مربوط به هدف اول یعنی تابع هدف اقتصادی است که برای حداقل کردن هزینه‌های زنجیره تأمین که شامل هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز مختلف (Tc)، هزینه‌های ایجاد تأسیسات و مراکز (Fc) و هزینه‌های عملیاتی در مراکز (Oc) مختلف است، می‌شود.

رابطه (۲) مربوط به هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز است که عبارت اول هزینه حمل پسماند از نقطه تولید به مرکز جمع‌آوری، عبارت دوم هزینه حمل از مرکز جمع‌آوری به مرکز تفکیک، عبارت سوم هزینه حمل از مرکز تفکیک به مرکز پردازش و عبارت چهارم و پنجم هزینه‌های حمل پسماند از مرکز پردازش به مراکز بازیافت و دفع است.

رابطه (۳) هزینه‌های ایجاد تاسیسات را نشان می‌دهد که عبارت اول شامل هزینه ایجاد نقطه تولید، عبارت دوم هزینه ایجاد مرکز جمع‌آوری، عبارت سوم هزینه ایجاد مرکز پردازش و عبارت‌های چهار، پنج و شش به ترتیب برای هزینه‌های ایجاد مراکز پردازش، بازیافت و دفع است.

رابطه (۴) نشان‌دهنده هزینه‌های عملیاتی است که شامل هزینه‌های جمع‌آوری پسماند، تفکیک و جداسازی، پردازش، بازیافت و دفع پسماند در مراکز است.

رابطه (۵) هدف دوم مدل بعد زیست محیطی را نشان می‌دهد که برای حداقل کردن آلودگی‌های زیست محیطی سیستم است که عبارت است از کاهش آلودگی ناشی از حمل‌ونقل وسایل بین مراکز مختلف (PT) و کاهش آلودگی ناشی از فرایندهای صورت گرفته بر روی پسماند در مراکز مختلف (PO).

رابطه (۶) آلودگی‌های تولید شده ناشی از حمل و انتقال پسماند بین مراکز مختلف که شامل آلودگی تولید شده از حمل پسماند از نقطه تولید به مرکز جمع‌آوری، از مرکز جمع‌آوری به مرکز تفکیک، از تفکیک به پردازش و در آخر به مراکز بازیافت یا دفع می‌شود.

رابطه (۷) آلودگی‌های عملیاتی را نشان می‌دهد که عبارت اول آلودگی ناشی از تولید پسماند در نقطه تولید و به همین ترتیب آلودگی‌های تولید شده ناشی از جمع‌آوری، تفکیک، پردازش، بازیافت یا دفع پسماند در مرکز دفع را نشان می‌دهد.

رابطه (۸) هدف سوم مسئله بعد اجتماعی را نشان می‌دهد که با هدف ایجاد و افزایش شغل طراحی شده است (JC).

رابطه (۹) ایجاد شغل در مراکز مختلف شامل مرکز جمع‌آوری، تفکیک، پردازش، بازیافت و دفع را نشان می‌دهد که به مقدار پسماند موجود در هر مرکز بستگی دارد.

از رابطه (۱۰) تا (۱۸) تعادل جریان پسماند در زنجیره را بیان می‌کند به طوریکه در هر مرحله مقدار پسماندی که در یک مرکز موجود است برابر است با مقدار پسماندی که به مرکز بعد منتقل می‌شود یعنی تمام پسماند موجود در هر مرکز به مرکز بعدی منتقل می‌شود همچنین روابط (۱۹) تا (۲۴) مربوط به محدودیت ظرفیت مراکز است و این موضوع را نشان می‌دهد که میزان پسماند در هر مرکز نمی‌تواند بیشتر از ظرفیت آن مرکز باشد.

از رابطه (۲۵) تا (۲۹) مربوط به محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه و تعداد آن‌ها می‌باشد که بیان می‌کنند مقدار پسماندی که بین مراکز مختلف حمل می‌شود نمی‌تواند از ظرفیت وسیله نقلیه و تعداد وسایل برای برای حمل پسماند بین آن مراکز بیشتر باشد به طوریکه به ترتیب این روابط نشان می‌دهند که مقدار پسماند حمل شده توسط وسیله نقلیه از نقطه تولید به مرکز جمع‌آوری، از جمع‌آوری به تفکیک، از تفکیک به پردازش و از پردازش به بازیافت یا دفع نمی‌تواند از ظرفیت وسیله نقلیه و تعداد وسایل برای حمل آن‌ها تجاوز کند.

روابط (۳۰) تا (۳۵) محدودیت‌هایی هستند که نشان می‌دهند برای ایجاد و کامل شدن جریان زنجیره تأمین معکوس حداقل باید یک مرکز از هر کدام از نقطه تولید پسماند i، مرکز جمع‌آوری m، مرکز تفکیک s، مرکز پردازش p، مرکز بازیافت r و مرکز دفع d ایجاد شود.

در آخر روابط (۳۶) تا (۳۸) بیان‌کننده نوع متغیرهای استفاده شده در مدل زنجیره تأمین طراحی شده هستند که متغیرهای رابطه (۳۶) می‌توانند مقادیر گسسته یا پیوسته داشته باشند. متغیرهای رابطه (۳۷) به دلیل اینکه تعداد وسایل نقلیه حمل پسماند هستند از نوع اعداد صحیح مثبت هستند و نمی‌توانند منفی باشند و متغیرهای روابط (۳۸) از نوع متغیرهای باینری صفر و یک می‌باشند.

۳-۳- مدل‌سازی ریاضی در حالت عدم قطعیت

یکی از مناسب‌ترین و مقاوم‌ترین روش‌ها برای حل عدم قطعیت در مسائل زنجیره تأمین رویکرد بهینه‌سازی استوار است که در این روش می‌توان مسائل بهینه‌سازی که همراه با داده‌های غیرقطعی و نامعلوم هستند را مدیریت کرد و این روش می‌تواند راه‌حل‌های مقاوم و پایدار برای مسئله ارائه دهد که با در نظر گرفتن بدترین شرایط و سناریوهای ممکن، سیستم بتواند عملکرد قابل قبولی داشته باشد [۳۷]. همچنین در حالت عدم قطعیت و رویکرد بهینه‌سازی استوار مدل با استفاده از روش برتسیمس و سیم بازنویسی می‌شود. ابتدا در سال ۲۰۰۴، توسط برتسیمس و سیم روش جدیدتری برای بهینه‌سازی استوار ارائه شد که نسبت به روش‌های دیگر انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و مهمترین مزیت این روش نسبت به روش‌های قبلی وجود پارامتر گاما (Γ) است و نشان‌دهنده تعداد پارامترهای غیرقطعی مدل می‌باشد که با استفاده از این پارامتر می‌توان میزان بدبینانه بودن و سطح محافظه‌کاری مدل را کنترل کرد و در نتیجه باعث مدیریت درست هزینه‌ها می‌شود همچنین این روش مدل را به صورت خطی حل می‌کند که این مورد باعث ساده‌تر شدن نسبت به روش بنتال و نمیروفسکی می‌شود و برای مسائل در دنیای واقعی روش مناسب‌تری برای مقابله با عدم‌قطعیت است [۳۸].

• مدل برتسیمس‌وسیم

به عنوان مثال اگر یک مسئله با مدل اولیه زیر وجود داشته باشد:

$$Max\ Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$$

(۳۹)

$$s.t: \quad \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le b_i \qquad \forall \quad i = 1. \dots . m$$

(۴۰)

$$x_j \ge 0 \qquad \forall \quad j = 1. \dots . n$$

(۴۱)

و با توجه به اینکه در مدل طراحی شده، ضرایب متغیر تصمیم در تابع هدف غیرقطعی هستند بنابراین مدل اولیه به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$Max\ Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j - z_0 \Gamma_0 - \sum_{j=1}^{n} p_{0j}$$

(۴۲)

$$z_0 + p_{0j} \ge d_j y_j \qquad \forall \quad j = 1 . \dots . n$$

(۴۳)

$$-y_j \le x_j \le y_j \qquad \forall\ j = 1 . \dots . n$$

(۴۴)

$$p_{0j} \ge 0 \qquad \forall\ j = 1 . \dots . n$$

(۴۵)

$$x_j . y_j \ge 0 \qquad \forall\ j = 1 . \dots . n$$

(۴۶)

$$z_0 \ge 0$$

(۴۷)

• بازنویسی مدل در حالت عدم قطعیت

در این قسمت با در نظر گرفتن پارامترهای هزینه‌های حمل‌ونقل هر واحد پسماند w به نقاط مختلف به عنوان پارامتر غیرقطعی به دلیل امکان تغییر در هزینه‌ها، قیمت و میزان مصرف سوخت، تغییرات در مسیر و طولانی‌تر شدن آن مثلا به دلیل ترافیک، تغییرات در قوانین و مقررات، تغییرات در تقاضا یا تغییر در هزینه‌های نیروی کار در تابع هدف اقتصادی مربوط به هزینه‌های حمل‌ونقل (Tc)، یک بار دیگر به حل مدل می‌پردازیم که رویکرد حل با استفاده از روش برتسیمس و سیم است و در این جا علاوه بر پارامترها و متغیرهای مدل در حالت قبل، پارامتر و متغیرهای زیر نیز به مدل اضافه می‌شود.

جدول (۵): پارامترها و متغیرهای مدل در حالت عدم قطعیت

نماد	تعریف
Γ_0	پارمتر گاما که سطح استوار بودن تابع هدف را کنترل می‌کند
z_0	متغیر استواری
$A1_{wvim}$	متغیر استواری مربوط به هزینه حمل پسماند w از نقطه i به مرکز جمع‌آوری m
$A2_{wvms}$	متغیر استواری مربوط به هزینه حمل پسماند w از مرکز m به مرکز تفکیک s
$A3_{wvsp}$	متغیر استواری مربوط به هزینه حمل پسماند w از مرکز s به مرکز پردازش p
$A4_{wvpr}$	متغیر استواری مربوط به هزینه حمل پسماند w از مرکز p به مرکز بازیافت r
$A5_{wvpd}$	متغیر استواری مربوط به هزینه حمل پسماند w از مرکز p به مرکز دفع d
$d1_{wvim}$	مقدار حداکثر انحراف مربوط به پارامتر غیرقطعی Cm_{wvim}
$d2_{wvms}$	مقدار حداکثر انحراف مربوط به پارامتر غیرقطعی Cs_{wvms}
$d3_{wvsp}$	مقدار حداکثر انحراف مربوط به پارامتر غیرقطعی Cp_{wvsp}
$d4_{wvpr}$	مقدار حداکثر انحراف مربوط به پارامتر غیرقطعی Cr_{wvpr}
$d5_{wvpd}$	مقدار حداکثر انحراف مربوط به پارامتر غیرقطعی Cd_{wvpd}
$y1_{wvim}$	متغیر کمکی استوارساز مربوط به Cm_{wvim}
$y2_{wvms}$	متغیر کمکی استوارساز مربوط به Cs_{wvms}
$y3_{wvsp}$	متغیر کمکی استوارساز مربوط به Cp_{wvsp}
$y4_{wvpr}$	متغیر کمکی استوارساز مربوط به Cr_{wvpr}
$y5_{wvpd}$	متغیر کمکی استوارساز مربوط به Cd_{wvpd}

- **تابع هدف**

$$Min\ Tc = \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{i\in N}\sum_{m\in M} Cm_{wvim} \times Km_{wvim} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{m\in M}\sum_{s\in S} Cs_{wvms} \times Ks_{wvms} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{s\in S}\sum_{p\in P} Cp_{wvsp} \times Kp_{wvsp} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{r\in R} Cr_{wvpr} \times Kr_{wvpr} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{d\in D} Cd_{wvpd} \times Kd_{wvpd} + z_0 \times \Gamma_0 + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{i\in N}\sum_{m\in M} A1_{wvim} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{m\in M}\sum_{s\in S} A2_{wvms} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{s\in S}\sum_{p\in P} A3_{wvsp} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{r\in R} A4_{wvpr} +$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P}\sum_{d\in D} A5_{wvpd}$$

(۴۸)

• محدودیت‌ها

$$z_0 + A1_{wvim} \geq d1_{wvim} \times y1_{wvim} \; \forall w \in W.v \in V.i \in N.m \in M$$

(۴۹)

$$z_0 + A2_{wvms} \geq d2_{wvms} \times y2_{wvms} \forall w \in W.v \in V.m \in M.s \in S$$

(۵۰)

$$z_0 + A3_{wvsp} \geq d3_{wvsp} \times y3_{wvsp} \quad \forall w \in W.v \in V.s \in S.p \in P$$

(۵۱)

$$z_0 + A4_{wvpr} \geq d4_{wvpr} \times y4_{wvpr} \quad \forall w \in W.v \in V.p \in P.r \in R$$

(۵۲)

$$z_0 + A5_{wvpd} \geq d5_{wvpd} \times y5_{wvpd} \forall w \in W.v \in V.p \in P.d \in D$$

(۵۳)

$$-y1_{wvim} \leq Km_{wvim} \leq y1_{wvim} \; \forall \; w \in W.v \in V.i \in N.m \in M$$

(۵۴)

$$-y2_{wvms} \leq Ks_{wvms} \leq y2_{wvms} \; \forall \; w \in W.v \in V.m \in M.s \in S$$

(۵۵)

$$-y3_{wvsp} \leq Kp_{wvsp} \leq y3_{wvsp} \quad \forall \; w \in W.v \in V.s \in S.p \in P$$

(۵۶)

$$-y4_{wvpr} \leq Kr_{wvpr} \leq y4_{wvpr} \quad \forall \; w \in W.v \in V.p \in P.r \in R$$

(۵۷)

$$-y5_{wvpd} \leq Kd_{wvpd} \leq y5_{wvpd} \quad \forall \; w \in W.v \in V.p \in P.d \in D$$

(۵۸)

$$A1_{wvim} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.i \in N.m \in M$$

(۵۹)

$$A2_{wvms} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.m \in M.s \in S$$

(۶۰)

$$A3_{wvsp} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.s \in S.p \in P$$

(۶۱)

$$A4_{wvpr} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.p \in P.r \in R$$

(۶۲)

$$A5_{wvpd} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.p \in P.d \in D$$

(۶۳)

$$Km_{wvim}.y1_{wvim} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.i \in N.m \in M$$

(۶۴)

$$Ks_{wvms}.y2_{wvms} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.m \in M.s \in S$$

(۶۵)

$$Kp_{wvsp}.y3_{wvsp} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.s \in S.p \in P$$

(۶۶)

$$Kr_{wvpr}.y4_{wvpr} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.p \in P.r \in R$$

(۶۷)

$$Kd_{wvpd}.y5_{wvpd} \geq 0 \quad \forall \quad w \in W.v \in V.p \in P.d \in D$$

(۶۸)

$$z_0 \geq 0$$

(۶۹)

۳-۴- روش محدودیت اپسیلون برای حل مدل

در مسائل مدل‌سازی ریاضی چندهدفه برای حل مدل ابتدا باید مدل را به صورت تک‌هدفه تبدیل کرد و بعد به حل مدل پرداخت که روش‌های مختلفی برای این کار مانند روش وزن‌دهی، LP-METRIC و محدودیت اپسیلون می‌باشد که در بین این روش‌ها یکی از قدیمی‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌ها محدودیت اپسیلون است که در این روش مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو به‌دست می‌آید و می‌توان بهترین جواب ممکن را انتخاب کرد. این روش به این صورت است که شامل چند مرحله می‌شود که به ترتیب در هر مرحله ابتدا یکی از اهداف مدل را به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته و هدف‌های دیگر را به صورت محدودیت در مسئله قرار می‌دهیم و در تکرارهای بعدی تابع هدف دیگر به عنوان هدف اصلی و اهداف دیگر به عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت با تغییر دادن مقادیر محدودیت‌ها جواب بهینه پارتو به دست می‌آید که این جواب‌های پارتو بین اهداف مسئله تعادل ایجاد می‌کنند و نشان‌دهنده جواب‌های موثر برای اهداف مختلف مدل هستند [۱۷].

مدل طراحی شده در این پژوهش شامل سه تابع هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی می‌باشد که تابع هدف اول و دوم یعنی اقتصادی و زیست محیطی از نوع حداقل کردن و هدف سوم یعنی اجتماعی از نوع حداکثر کردن است که برای حل این مدل با استفاده از محدودیت اپسیلون در ابتدا هدف اول را به عنوان هدف اصلی و اهداف زیست محیطی و اجتماعی را به صورت محدودیت با مقدار اپسیلون (ϵ) در نظر گرفته و به محدودیت‌های مدل به صورت زیر اضافه می‌شود.

$$\text{Min } Z_1 \quad (۷۰)$$

s.t

$$Z_2 \leq \epsilon_2 \quad (۷۱)$$

$$Z_3 \geq \epsilon_3 \quad (۷۲)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج مدل در حالت قطعی

در این پژوهش هدف اصلی طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار با در نظر گرفتن همزمان سه هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی و ایجاد تعادل بین این سه هدف و همچنین بررسی تاثیرات در نظر گرفتن عدم قطعیت بر روی این شبکه زنجیره تأمین برای مدیریت بهتر پسماند و تغییراتی که پارامترهای غیرقطعی بر روی هر کدام از توابع هدف می‌گذارد است. در ادامه با بررسی نتایج عددی به دست آمده از نرم‌افزار می‌توان رابطه بین هر کدام از توابع هدف با یکدیگر را بررسی کرده و به اطلاعات مفیدی در جهت مدیریت و تصمیم‌گیری‌های بهتر برای مدیریت پسماند و مقادیر بهینه برای هزینه‌ها، میزان آلودگی و تعداد مشاغل ایجاد شده، دست پیدا کرد.

در این پژوهش برای کدنویسی مدل چندهدفه زنجیره تأمین پایدار از نرم‌افزار گمز ۲۴,۱,۲ نسخه ۶۴ بیتی و سیستم شخصی با رم ۴ گیگ استفاده شده و بعد از به دست آوردن نتایج عددی و مقادیر توابع هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی، به تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

در این قسمت با انجام تکرارهای مختلف و تغییر در مقادیر اپسیلون می‌توان به جواب‌های بهینه پارتو برای هر یک از توابع هدف رسید که هر کدام از این جواب‌های پارتو می‌توانند یک جواب بهینه باشند و با انجام تکرارهای مختلف می‌توان روابط بین هر کدام از توابع هدف با یکدیگر را بهتر درک کرد و به نتایج و تصمیم‌گیری‌های بهتری رسید که در ادامه در جدول (۶) این نتایج آورده شده است.

جدول (۶): نتایج بهینه توابع هدف حاصل از نرم‌افزار Gams

مقادیر بهینه توابع هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی			
ردیف	Z1 (اقتصادی)	Z2 (زیست محیطی)	Z3 (اجتماعی)
۱	۴۸۹۸۵۰	۶۸/۱	۲۷۰
۲	۷۷۰۳۵۰	۹۵/۱	۴۵۰
۳	۱۶۲۷۴۳۳	۱۹۹/۲	۱۰۰۰
۴	۳۳۴۱۶۰۰	۳۶۴/۲	۲۱۰۰
۵	۴۷۴۴۱۰۰	۴۹۹/۲	۳۰۰۰
۶	۷۸۶۰۷۶۶	۷۹۹/۲	۵۰۰۰
۷	۱۱۶۰۰۷۶۶	۱۱۵۹/۲	۷۴۰۰
۸	۱۵۰۲۹۱۰۰	۱۴۸۹/۲	۹۶۰۰

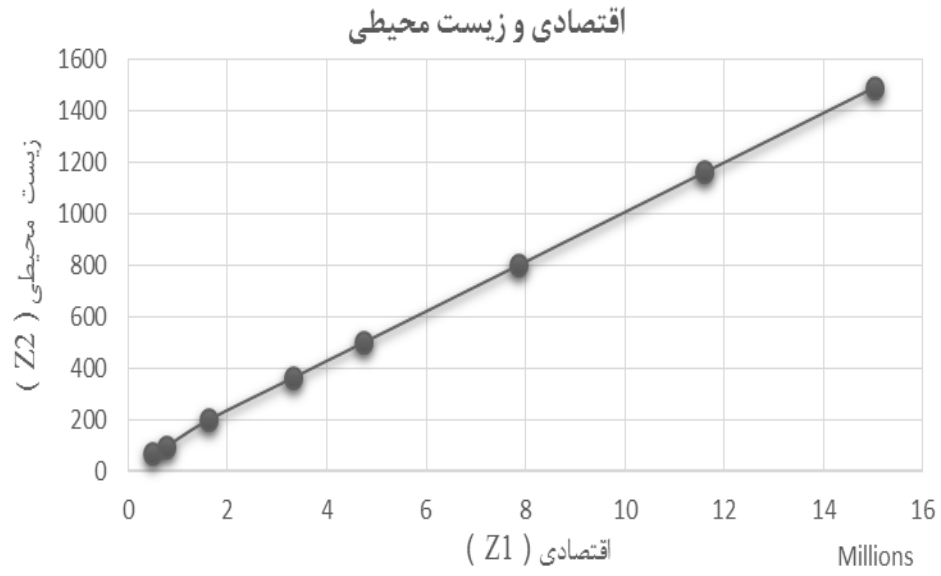
طبق نتایج به دست آمده می‌توان گفت که اهداف اقتصادی یعنی کاهش هزینه‌های سیستم و اهداف زیست محیطی شامل کاهش آلودگی‌ها در یکسو هستند ولی در عین حال با اهداف اجتماعی در تضاد هستند به دلیل اینکه هدف تابع اجتماعی در این پژوهش افزایش شغل است و در هر تکرار برای اینکه بتوان تعداد مشاغل را افزایش داد در نتیجه این مسئله به طور مستقیم با هزینه‌های سیستم در ارتباط است و باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود همچنین از طرفی به دلیل اینکه متغیر مربوط به هدف اجتماعی، مقدار پسماند موجود در مراکز و مقدار پسماند بازیافت شده و دفع شده در مراکز بازیافت و دفع می‌باشد و برای اینکه بتوان شغل‌های بیشتری ایجاد کرد باید این مقادیر پسماند موجود در مراکز بیشتر باشد که این موضوع باعث افزایش آلودگی‌های تولید شده نیز می‌شود و در ادامه باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. از آنجایی که هدف این پژوهش کاهش هزینه‌ها و کاهش آلودگی‌ها و افزایش شغل می‌باشد بنابراین این نتایج نشان می‌دهد که اهداف اقتصادی و زیست محیطی با هم رابطه مستقیم ولی با اهداف اجتماعی رابطه عکس دارند و با هم در تضاد هستند و یعنی اینکه اگر تصمیم‌گیرنده یا مدیران بخواهند به جنبه‌های اجتماعی بیشتر توجه کنند باید هزینه‌های بیشتری را پرداخت کنند ولی این اقدام ممکن است در نهایت باعث افزایش سود در زنجیره تأمین شود که این

موضوع می‌تواند زمان‌بر باشد و باید با گذشت زمان این مورد را بررسی کرد. حال برای اینکه بتوان روابط توابع هدف را بهتر نشان داد و آن را بهتر درک و تفسیر کرد، می‌توان از نمودارهای پارتو استفاده کرد که به صورت دو به دو رابطه هر تابع هدف با یکی دیگر از توابع هدف طبق نمودارهای زیر را نشان می‌دهد.

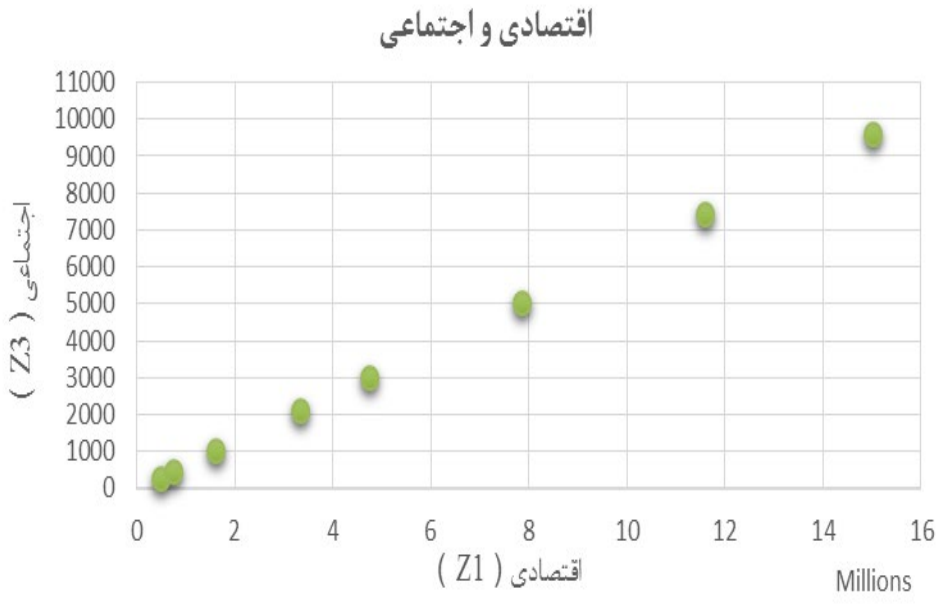
با توجه به نمودار (۱) همانطور که توضیح داده شد و از آنجایی که دو تابع اقتصادی و زیست محیطی از نوع کمینه هستند و به دلیل اینکه نمودار به صورت افزایشی است پس نتیجه می‌شود که این دو تابع با هم رابطه مستقیم دارند. طبق نمودار نقاط مشخص شده هر کدام یک جواب پارتو هستند یعنی جواب بهینه‌ای که هیچ جواب ممکن بهتری برای این توابع هدف وجود ندارد و از بین این جواب‌ها طبق نمودار چون می‌خواهیم هزینه‌ها و آلودگی‌ها کمتر باشد پس نقاطی که نزدیک به مبدأ نمودار قرار دارند نسبت به دیگر جواب‌ها بهتر هستند چون هر دو تابع در کمترین میزان خود هستند ولی در عمل ممکن است نتوان به صورت همزمان هر دو تابع را به کمترین مقدار خود رساند و به همین دلیل باید براساس میزان اهمیت و تصمیم مدیران یک نقطه تعادلی بین توابع هدف انتخاب کرد. رابطه مستقیم این دو تابع هدف به این دلیل است که اگر هزینه‌ها افزایش یابد که این‌ها شامل مواردی مانند سرمایه‌گذاری‌های بیشتر در ایجاد تاسیسات یا تجهیزات به کار برده شده در زنجیره مدیریت پسماند همچنین افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل برای اینکه بتوان مقدار پسماند بیشتری را به مراکز جابه‌جا کرد در نتیجه این موارد باعث افزایش آلودگی نیز می‌شود و بالعکس کاهش هزینه‌ها مثلا کاهش ایجاد تاسیسات یا زیرساخت‌ها می‌تواند باعث کاهش آلودگی‌ها شود.

با توجه به اینکه هدف از تابع اقتصادی در این پژوهش کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین یعنی کمینه می‌باشد و از طرفی هدف از تابع اجتماعی افزایش شغل می‌باشد و طبق نمودار (۲) مشخص می‌شود که این دو تابع با هم در تضاد هستند و به طور مستقیم بر یکدیگر تاثیر می‌گذارند به این معنی که با افزایش شغل هزینه‌های زنجیره افزایش می‌یابد و اگر قرار باشد هزینه‌های کمتری پرداخت شود در نتیجه تعداد مشاغل کمتر می‌شود و این مورد باید بر اساس اهیمت و اولویت‌های سازمان بررسی شود که اگر قرار باشد به مسائل اجتماعی بیشتر توجه شود باید هزینه‌های بیشتری را متحمل شد

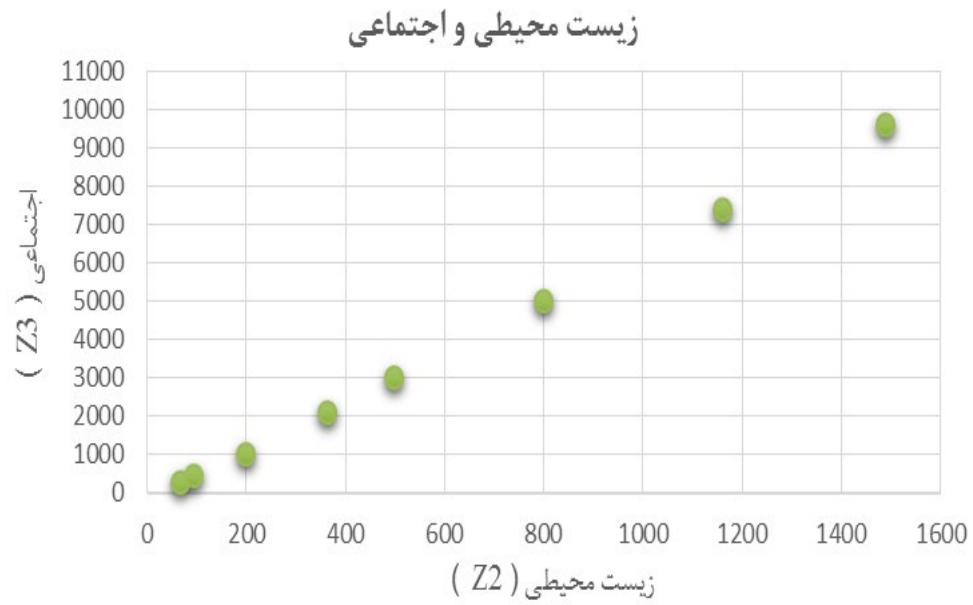
و در آخر در نمودار (۳) جواب‌های پارتو بین توابع زیست محیطی و اجتماعی و رابطه آن‌ها با هم نشان داده شده است. همانطور که بیان شد هدف تابع زیست محیطی، کاهش آلودگی‌های زنجیره تأمین و تابع اجتماعی افزایش شغل می‌باشد پس یکی از نوع کمینه و دیگری از نوع بیشینه می‌باشد. با توجه به هدف هر دو تابع و مقادیر به دست آمده مشخص است که این دو تابع نیز با یکدیگر در تضاد هستند به دلیل اینکه با افزایش آلودگی میزان شغل افزایش می‌یابد و از نظر اجتماعی بهتر است ولی آلودگی‌های تولید شده بیشتر می‌شود. این امر به این خاطر است که هر چه میزان پسماندهای موجود در مراکز بیشتر باشد به وسایل نقلیه بیشتر برای حمل پسماند نیاز است و پسماندهای حمل‌ونقل شده نیز بیشتر می‌شود در نتیجه آلودگی بیشتر شده و همچنین برای مدیریت بهتر این پسماندها به نیروی بیشتری نیاز داریم پس تعداد شغل نیز افزایش می‌یابد و بالعکس اگر میزان پسماندها کمتر باشد آلودگی تولید شده کمتر می‌شود ولی از طرفی تعداد شغل‌ها نیز کاهش می‌یابد.



نمودار (۱): جواب‌های پارتو بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی



نمودار (۲): جواب‌های پارتو بین اهداف اقتصادی و اجتماعی



نمودار (۳): جواب‌های پارتو بین اهداف زیست محیطی و اجتماعی

با توجه به جدول (۶) و نمودارهای پارتو می‌توان نتیجه گرفت که در ردیف اول میزان هزینه‌ها و آلودگی‌های تولید شده در بهترین وضعیت خود هستند ولی تعداد شغل‌های ایجاد شده در کمترین حالت است و همچنین در ردیف آخر میزان شغل‌های ایجاد شده در بهترین حالت است ولی میزان هزینه‌ها و آلودگی‌های تولید شده بیشترین مقدار است ولی با توجه به این سه جنبه و جواب‌های موثری که به دست آمده، انتخاب هر کدام از این جواب‌ها بر اساس تصمیم نهایی تصمیم‌گیرنده می‌باشد.

۴-۲- نتایج مدل در حالت عدم قطعیت

همانطور که بیان شد یکی از اهداف اصلی این پژوهش طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار و در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی در مدیریت پسماند و بررسی تاثیر آن بر روی توابع هدف نسبت به حالت قطعی است. همچنین از آنجایی که در دنیای واقعی بسیاری از عوامل مانند هزینه‌های حمل‌ونقل غیرقطعی هستند و برای اینکه مدل طراحی شده کاربردی‌تر و موثرتر باشد و تصمیم‌گیرندگان و مدیران بتوانند انتخاب‌های

بهتری برای مدیریت پسماند داشته باشند، در نظر گرفتن عدم قطعیت امری بسیار مهم است.

در ادامه، هزینه‌های حمل‌ونقل به عنوان پارامتر غیرقطعی در نظر گرفته می‌شوند. به این منظور از رویکرد استوار برتسیمس‌وسیم استفاده شده است.

• تاثیر پارامتر گاما بر توابع هدف

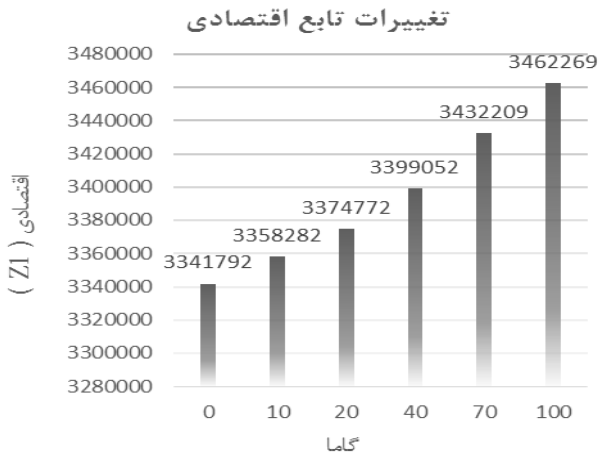
در روش برتسیمس‌وسیم یک پارامتر گاما تعریف می‌شود که با استفاده از این پارامتر می‌توان میزان بدبینانه بودن مدل و جواب‌ها را کنترل کرد و مقادیر این پارامتر در بازه صفر تا تعداد پارامترهای غیرقطعی موجود در تمام حالات مختلف اندیس‌های مختلف بین مراکز می‌باشد. در این جا در تکرارهای مختلف با افزایش مقدار این پارامتر به بررسی میزان تغییرات و تاثیر آن بر هر کدام از جواب‌های به دست آمده برای توابع هدف پراخته می‌شود که نتایج آن در جدول (۷) آمده است.

جدول (۷): تاثیر پارامتر گاما بر توابع هدف

ردیف	Γ_0	Z1 (اقتصادی)	Z2 (زیست محیطی)	Z3 (اجتماعی)
۱	۰	۳۳۴۱۷۹۲	۳۶۴/۲	۲۱۰۰
۲	۱۰	۳۳۵۸۲۸۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۳	۲۰	۳۳۷۴۷۷۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۴	۴۰	۳۳۹۹۰۵۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۵	۷۰	۳۴۳۲۲۰۹	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۶	۱۰۰	۳۴۶۲۲۶۹	۳۴۲/۶	۲۱۰۰

بر اساس نتایج به دست آمده در جدول (۷) می‌توان نتیجه گرفت که اگر مقدار گاما صفر باشد نتایج به دست آمده برای توابع هدف در حالت عدم قطعیت با حالت قطعیت تفاوتی ندارد زیرا مدل مدل سطح بدبینی را صفر در نظر گرفته و پارامتر غیرقطعی تاثیری در جواب‌ها ندارد چون مدل بهترین حالت را در نظر می‌گیرد.

ولی در تکرارهای مختلف هر چه مقدار گاما را افزایش می‌دهیم مقدار تابع هدف اقتصادی افزایش می‌یابد زیرا سطح بدبینانه بودن مدل بیشتر شده و پارامترهای غیرقطعی هزینه‌های حمل‌ونقل بدتر نظر گرفته شده و باعث افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و در نتیجه افزایش هزینه‌های کلی زنجیره تأمین می‌شوند. میزان تغییر در تابع زیست محیطی با افزایش گاما همانطور که بین تکرارهای ۱ و ۲ مشاهده می‌شود در ابتدا با افزایش این گاما که در نتیجه آن باعث افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود، مقداری از میزان آلودگی را نسبت به حالت قطعی کاهش می‌دهد که این موضوع به دلیل این است که میزان بدبینانه بودن بیشتر شده و از آنجایی که هزینه‌های حمل‌ونقل بیشتر شده و این به دلیل افزایش میزان پسماند حمل‌ونقل شده می‌باشد به همین خاطر مدل طراحی شده برای اینکه تابع زیست محیطی را مینیمم کند و همچنین مقدار هزینه‌های حمل‌ونقل و در نتیجه آن هزینه‌های زنجیره تأمین که هدف از این تابع هم کمینه کردن هزینه‌ها است و از حالت بیهنه خود خارج نشود، در نتیجه مدل میزان حمل‌ونقل پسماند توسط وسایل نقلیه بین مراکز را کاهش داده که در ادامه این موضوع باعث کاهش میزان پسماندهای موجود در مراکز شده و همچنین تعداد وسایل نقلیه برای حمل پسماند را کاهش می‌دهد که این موارد در نهایت باعث کاهش آلودگی در زنجیره و در نتیجه کاهش تابع زیست محیطی می‌شود نسبت به حل مدل در حالت قطعی می‌شود ولی در ادامه با افزایش تکرارها هر چه مقدار پارامتر گاما را افزایش می‌دهیم دیگر تاثیری در تابع زیست محیطی ندارد و در همان جواب بهینه اول بدون تغییر باقی نگه می‌دارد زیرا هر چه مقدار زیست محیطی کاهش پیدا کند یعنی میزان پسماند منتقل شده و در نتیجه پسماند در مراکز کاهش پیدا می‌کند که همین امر در نهایت باعث کاهش تابع اجتماعی و کاهش شغل می‌شود که باعث خارج شدن تابع اجتماعی از حالت بهینه خود می‌شود و چون در مدل‌های چندهدفه باید بین اهداف مختلف تعادل ایجاد شود به همین خاطر با افزایش گاما مقدار تابع زیست محیطی در حالت بهینه اولیه خود دیگر تغییر نمی‌کند. همچنین با افزایش پارامتر گاما تغییری در تابع اجتماعی و شغل‌های ایجاد شده نمی‌شود زیرا افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و بدبینانه شدن مدل نسبت به این پارامتر به صورت مستقیم تاثیری در ایجاد شغل و تابع اجتماعی نمی‌گذارد و مقدار تابع اجتماعی در حالت عدم قطعیت در همان مقدار اولیه بهینه خود باقی می‌ماند.



نمودار(۴): تاثیر تغییرات گاما بر تابع اقتصادی

همانطور که در نمودار (۴) مشخص است و بر اساس مقادیر به دست آمده تابع هدف اقتصادی حالت قطعی در $\Gamma_0 = 0$، مقدار به دست آمده در دو حالت قطعی و عدم قطعیت با هم برابر هستند.

• نتایج توابع هدف در حالت عدم قطعیت

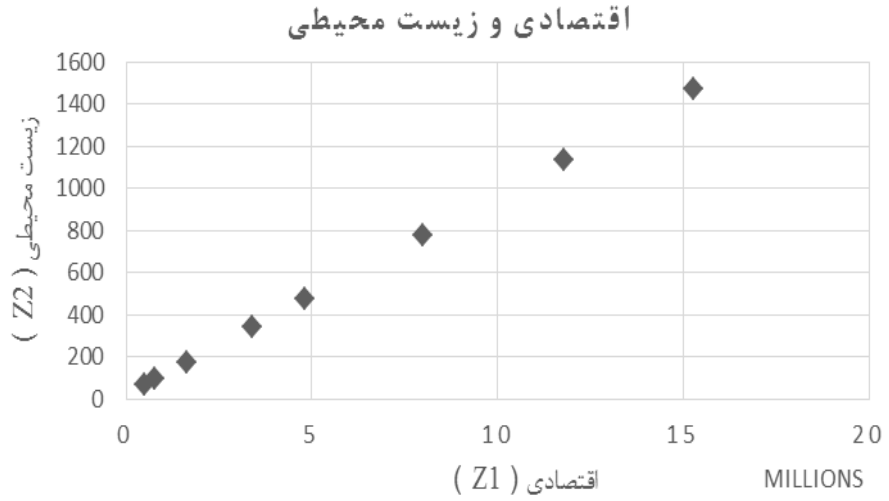
در این‌جا مانند حالت قطعی، با در نظر گرفتن یک مقدار برای پارامتر گاما که میزان سخت‌گیری و بدبینانه بودن مدل را خیلی بالا نبرد که مقدار آن ۴۰ در نظر گرفته شده است و انجام تغییرات در مقادیر اپسیلون در تکرارهای مختلف (مانند همان تکرارهای مختلف در حالت قطعی) می‌توان به جواب‌های بهینه پارتو در حالت عدم قطعیت با در نظر گرفتن پارامتر غیرقطعی رسید که نتایج آن در جدول (۸) آمده است.

جدول (۸): نتایج بهینه توابع هدف در حالت عدم قطعیت حاصل از نرم‌افزار Gams

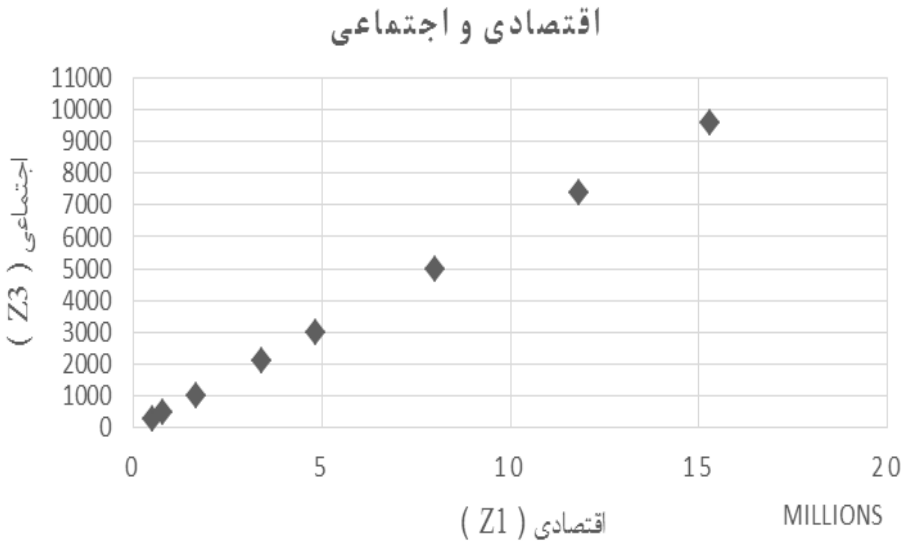
مقادیر بهینه توابع هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در حالت عدم‌قطعیت				
ردیف	گاما	Z1 (اقتصادی)	Z2 (زیست محیطی)	Z3 (اجتماعی)
۱	۴۰	۴۹۶۴۱۲	۶۸/۱	۲۷۰
۲	۴۰	۷۸۱۰۵۲	۹۵/۱	۴۵۰
۳	۴۰	۱۶۵۳۷۱۸	۱۷۷/۶	۱۰۰۰
۴	۴۰	۳۳۹۹۰۵۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۵	۴۰	۴۸۲۷۰۵۲	۴۷۷/۶	۳۰۰۰
۶	۴۰	۸۰۰۰۳۸۵	۷۷۷/۶	۵۰۰۰
۷	۴۰	۱۱۸۰۸۳۸۵	۱۱۳۷/۶	۷۴۰۰
۸	۴۰	۱۵۲۹۹۰۵۲	۱۴۶۷/۶	۹۶۰۰

طبق جدول (۸) مقادیر به دست آمده در حالت عدم قطعیت مانند حالت قطعی و به این صورت است که هر چه میزان آلودگی افزایش یابد که این مورد به دلیل افزایش پسماند منتقل شده به مراکز، افزایش وسایل نقلیه برای حمل‌ونقل و همچنین افزایش مقدار پسماند در نقطه تولید، مراکز جمع‌آوری، تفکیک، پردازش، بازیافت و دفع می‌باشد که هر کدام از این موارد باعث افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های عملیاتی و در نتیجه هزینه‌های کلی زنجیره تأمین می‌شود از طرفی با افزایش این مقدار پسماندها در مراکز نیاز به نیروی کار بیشتر در مراکز می‌باشد که باعث افزایش شغل می‌شود. ولی از آنجایی که ماهیت توابع اقتصادی و زیست محیطی از نوع کمینه و تابع اجتماعی از نوع بیشینه است، طبق نتایج به دست آمده توابع اقتصادی و زیست محیطی با هم رابطه مستقیم دارند ولی با تابع اجتماعی در تضاد هستند به طوریکه هر چه میزان تابع زیست محیطی یعنی آلودگی‌ها کمتر باشد متغیرهای میزان پسماند حمل‌ونقل شده، وسایل نقلیه و در نتیجه آلودگی‌های عملیاتی در مراکز کمتر شده که باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های عملیاتی می‌شود پس هر دو تابع بهینه می‌شوند ولی از طرفی به نیروی کار کمتری برای مدیریت پسماند در مراکز لازم است و تعداد شغل‌ها کاهش یافته و چون از نوع بیشینه است پس مقدارش بدتر می‌شود و طبق جدول هر چه بخواهیم شغل بیشتری ایجاد کنیم باعث افزایش آلودگی و همچنین افزایش هزینه‌ها می‌شود که مقدار تابع اجتماعی بهتر شده ولی توابع اقتصادی و زیست محیطی بدتر می‌شوند.

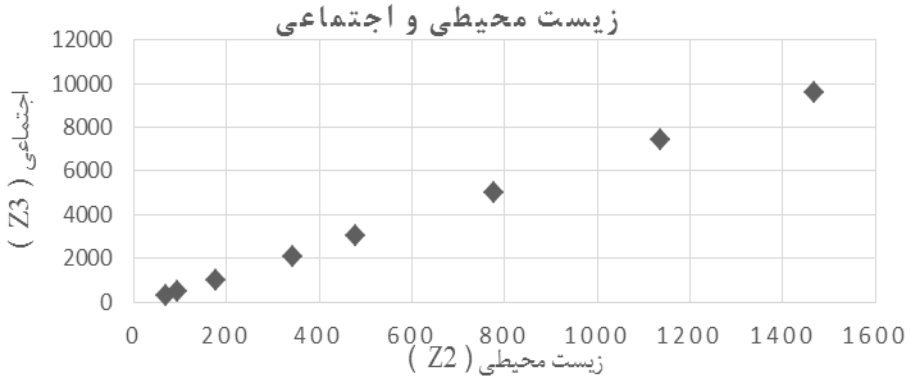
در ادامه نتایج به دست آمده توابع هدف برای نشان دادن فضای پارتو و جواب‌های بهینه در نمودارهای پارتو (۵)، (۶) و (۷) نشان داده می‌شود.



نمودار (۵): جواب‌های پارتو بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی



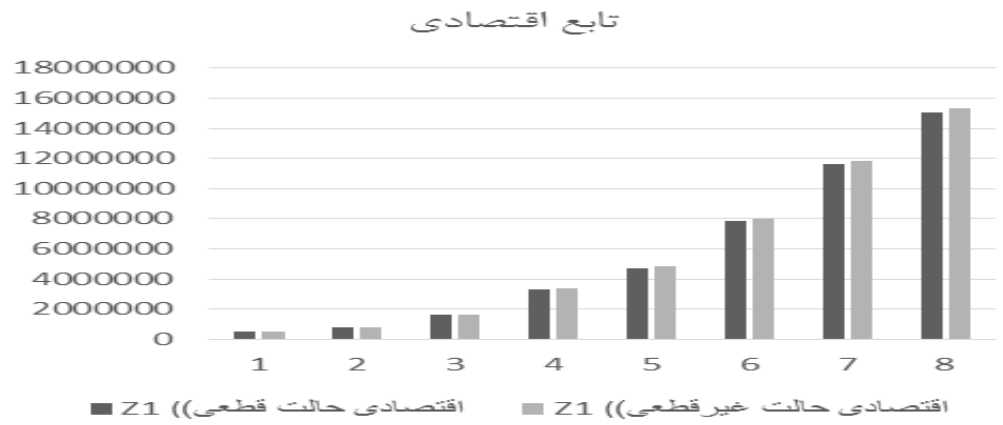
نمودار (۶: جواب‌های پارتو بین اهداف اقتصادی و اجتماعی



نمودار (۷): جواب‌های پارتو بین اهداف زیست محیطی و اجتماعی

• مقایسه توابع اقتصادی در حالت قطعی و عدم قطعیت

همانطور که در نمودار (۸) مشخص است، مقادیر هزینه‌ها در حالت عدم قطعیت نسبت به حالت قطعی افزایش یافته است و بر اساس این نمودار می‌توان میزان افزایش تابع اقتصادی را مشاهده کرد.



نمودار(۸): مقادیر تابع اقتصادی در حالت قطعیت و عدم قطعیت

۴-۳- تحلیل حساسیت

در مدل‌های بهینه‌سازی تحلیل حساسیت یکی از موارد بسیار مهم می‌باشد به دلیل اینکه با استفاده از این مسئله پژوهشگران و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند که تاثیر تغییرات در پارامترهای مدل را بر هر کدام از توابع هدف و نتایج نهایی بهتر درک کنند و باعث شناخت پارامترهایی می‌شود که بیشترین تاثیر را بر عملکرد زنجیره تأمین می‌گذارند. در نهایت این اطلاعات به مدیران و تصمیم‌گیرندگان می‌تواند کمک کند تا بر روی این پارامترها بیشتر تمرکز کرده و تصمیمات بهتری را در خصوص این پارامترها بگیرند. همچنین با استفاده از تحلیل حساسیت در حالت عدم قطعیت می‌توان متوجه شد که آیا علاوه بر پارامترهای غیرقطعی، مدل بهینه‌سازی استوار به تغییرات در این پارامترهای کلیدی حساس است یا خیر و در آخر این بررسی به بهبود تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و بهتر شدن عملکرد زنجیره تأمین معکوس برای مدیریت پسماند کمک می‌کند.

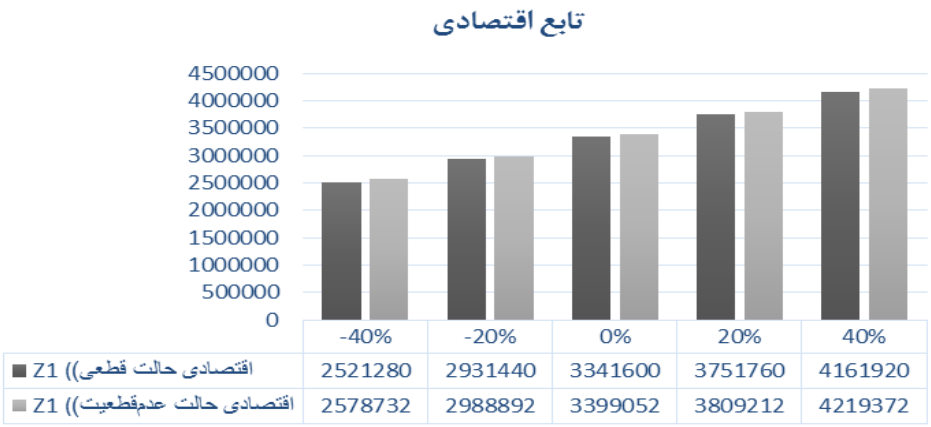
• پارامترهای هزینه‌های عملیاتی

در ابتدا به بررسی تغییرات پارامترهای هزینه‌های عملیاتی و میزان تاثیر تغییرات این پارامترها بر روی توابع هدف در حالت قطعی و عدم قطعیت پرداخته می‌شود. برای این کار مقادیر پارامترهای عملیاتی را به اندازه ۲۰ تا ۴۰ درصد کم و زیاد می‌کنیم تا بتوان نتیجه تغییرات در توابع هدف را بهتر متوجه شد که در ادامه نتایج آن در جدول(۹) آمده است.

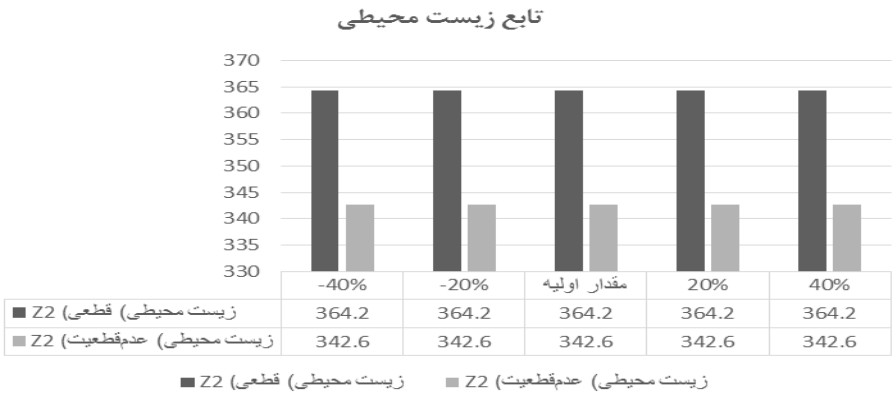
جدول (۹): تاثیر تغییر هزینه‌های عملیاتی بر توابع هدف

		حالت قطعی			حالت عدم‌قطعیت		
تکرار	درصد تغییر	Z1 (اقتصادی)	Z2 (زیست محیطی)	Z3 (اجتماعی)	Z1 (اقتصادی)	Z2 (زیست محیطی)	Z3 (اجتماعی)
۱	-٪۴۰	۲۵۲۱۲۸۰	۳۶۴/۲	۲۱۰۰	۲۵۷۸۷۳۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۲	-٪۲۰	۲۹۳۱۴۴۰	۳۶۴/۲	۲۱۰۰	۲۹۸۸۸۹۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۳	مقدار اولیه	۳۳۴۱۶۰۰	۳۶۴/۲	۲۱۰۰	۳۳۹۹۰۵۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۴	+٪۲۰	۳۷۵۱۷۶۰	۳۶۴/۲	۲۱۰۰	۳۸۰۹۲۱۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰
۵	+٪۴۰	۴۱۶۱۹۲۰	۳۶۴/۲	۲۱۰۰	۴۲۱۹۳۷۲	۳۴۲/۶	۲۱۰۰

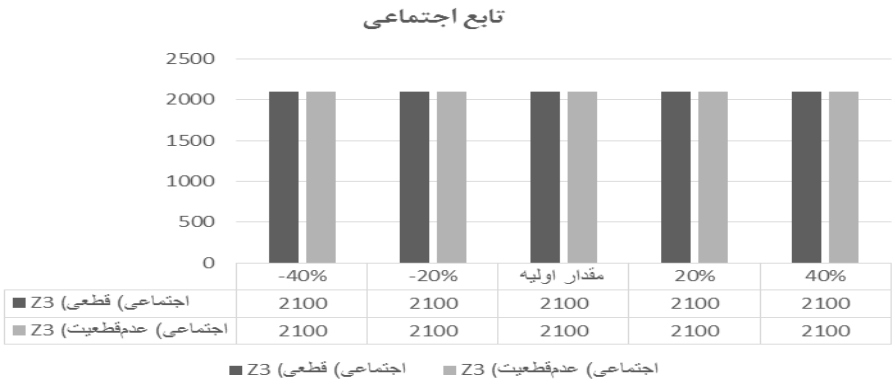
همانطور که در جدول (۹) مشخص است تابع هدف اقتصادی به تغییر در پارامتر هزینه‌های عملیاتی در مراکز حساس است و با کاهش در مقدار اولیه مقدار تابع کاهش پیدا کرده و با افزایش آن، مقدار تابع اقتصادی هم در حالت قطعی و هم در حالت عدم قطعیت افزایش می‌یابد چون تابع اقتصادی به طور مستقیم با این پارامتر در ارتباط می‌باشد ولی توابع زیست محیطی و اجتماعی با تغییر این پارامتر تغییر نمی‌کنند و مقدارشان ثابت باقی می‌ماند که برای درک بهتر میزان تغییر تابع اقتصادی نسبت به تغییرات هزینه‌های عملیاتی در نمودار (۹) نشان داده شده است.



نمودار (۹): تاثیر هزینه‌های عملیاتی بر تابع اقتصادی



نمودار (۱۰): تاثیر هزینه‌های عملیاتی بر تابع زیست محیطی



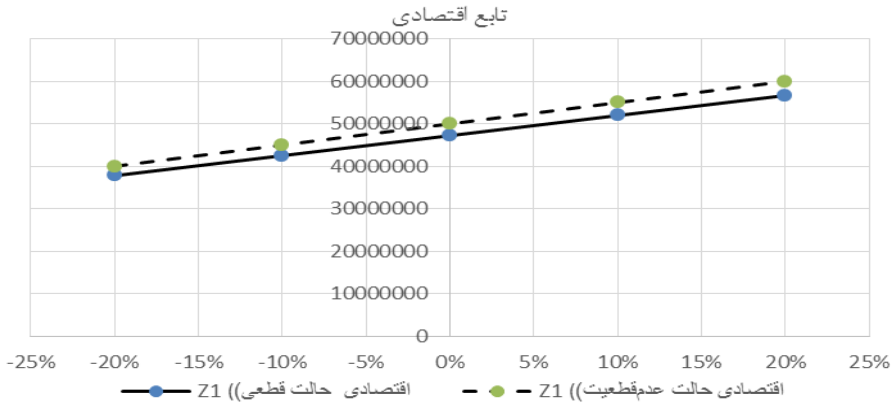
نمودار (۱۱): تاثیر هزینه‌های عملیاتی بر تابع اجتماعی

همانطور که در نمودار (۹) مشخص است، با کم یا زیاد کردن پارامتر هزینه‌های عملیاتی به اندازه ۲۰ درصد، تابع هدف اقتصادی در حالت قطعی به میزان ۱۲/۲۸ درصد و در حالت عدم قطعیت، ۱۲/۰۶ درصد تغییر می‌کند. با تغییر پارامتر غیرقطعی به میزان ۴۰ درصد، تابع اقتصادی در حالت قطعی به اندازه ۲۴/۵۴ درصد و در حالت عدم قطعیت نیز به میزان ۲۴/۱۳ درصد تغییر می‌کند.

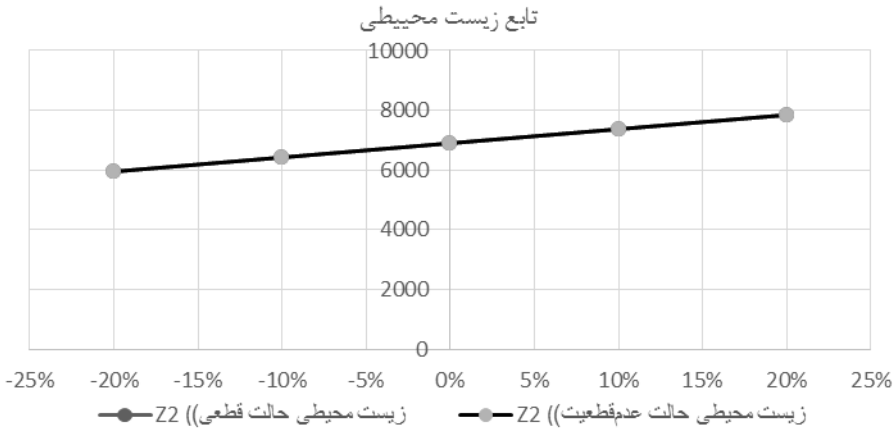
در عین حال همانطور که در نمودارهای (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود، با تغییر در پارامتر هزینه‌های عملیاتی تغییری در مقادیر تابع زیست محیطی و اجتماعی ایجاد نمی‌شود و تاثیری بر این اهداف ندارد.

- **پارامترهای ظرفیت وسیله نقلیه و مراکز**

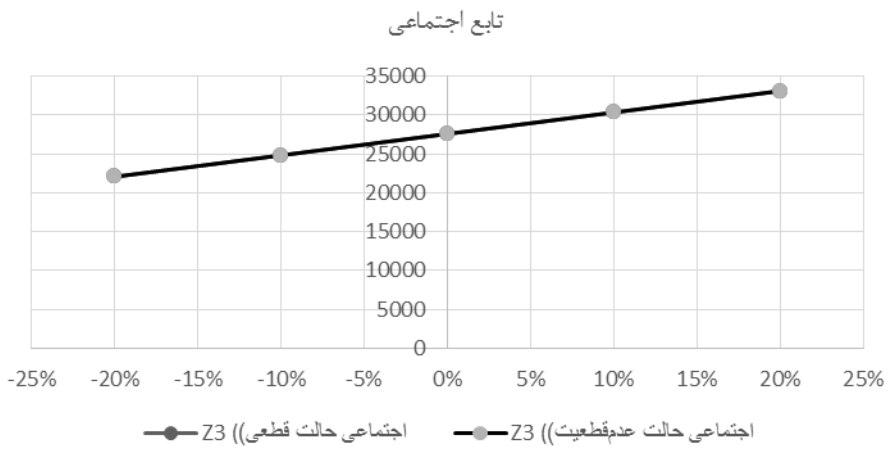
برای بررسی تاثیر پارامترهای ظرفیت بر توابع هدف، جواب‌های توابع هدف در حالت بیشینه بررسی شده است که بتوان میزان حساسیت به این پارامترها را بهتر درک کرد. با افزایش ظرفیت وسایل و مراکز هر سه تابع هدف مقدارشان افزایش پیدا می‌کند و یعنی یکی از پارامترهای مهم در مدل طراحی شده پارامترهای ظرفیت می‌باشد. زمانیکه ظرفیت وسایل و مراکز بیشتر می‌شود باعث می‌شود که مقدار پسماند بیشتری به مراکز منتقل شده و همچنین تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز بیشتر می‌شود که در ادامه مقدار پسماند موجود در مراکز افزایش پیدا کرده که این موارد باعث افزایش آلودگی‌های منتشر شده و بیشتر شدن تابع زیست محیطی می‌شود و در ادامه هزینه‌های زنجیره شامل هزینه‌های انتقال پسماند و هزینه‌های عملیاتی بیشتر شده که افزایش تابع اقتصادی را به همراه دارد همچنین با افزایش مقدار پسماند در مراکز به نیروی کار بیشتر برای مدیریت بهتر پسماند نیاز است که موجب بیشتر شدن تابع اجتماعی نیز می‌شود پس میزان حساسیت توابع به ظرفیت‌ها بالا است. برای درک بهتر روند تغییرات تابع اقتصادی در نمودار (۱۲)، تابع زیست محیطی در نمودار (۱۳) و تابع اجتماعی در نمودار (۱۴) می‌توان استفاده کرد.



نمودار (۱۲): تاثیر پارامترهای ظرفیت بر تابع اقتصادی



نمودار (۱۳): تاثیر پارامترهای ظرفیت بر تابع زیست محیطی



نمودار (۱۴): تاثیر پارامترهای ظرفیت بر تابع اجتماعی

برای بررسی میزان تاثیر پارامتر ظرفیت وسایل نقلیه و مراکز بر تابع اقتصادی با توجه به نمودار (۱۲)، تغییر این پارامتر به میزان ۱۰ درصد، مقدار هزینه‌ها در حالت قطعی و عدم قطعیت ۹/۹۹ تغییر می‌کند. تغییر پارامتر ظرفیت به میزان ۲۰ درصد، هزینه‌ها به میزان ۱۹/۹۸ درصد تغییر می‌کنند. بر اساس نمودار (۱۳) و (۱۴) تغییر پارامتر ظرفیت به میزان ۱۰ درصد، تابع هدف زیست محیطی به میزان ۶/۸۶ و تابع هدف اجتماعی به میزان ۱۰ درصد تغییر می‌کنند. همچنین با تغییر پارامتر ظرفیت به میزان ۲۰ درصد، تابع زیست محیطی به میزان ۱۳/۷۳ درصد و تابع هدف اجتماعی به میزان ۲۰ درصد تغییر می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل ریاضی چندهدفه، چندسطحی و تک‌دوره برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین معکوس پایدار که شامل سه هدف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی می‌باشد، ارائه شده ماست. در پاسخ به سوال اول تحقیق همان‌گونه که در مدل ریاضی نشان داده شده است، در تابع هدف اقتصادی هزینه‌های زنجیره از جمله هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های ایجاد تاسیسات لحاظ شده‌اند. در تابع هدف زیست محیطی کاهش آلودگی‌های ناشی از حمل‌ونقل و کاهش آلودگی‌های عملیاتی ناشی از فرایندهای مختلف در مراکز مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت تابع هدف اجتماعی با هدف افزایش میزان اشتغال توسعه داده شده است. سطوح مختلف این زنجیره شامل مراکز جمع‌آوری، تفکیک، پردازش، بازیافت و دفع پسماند می‌باشند. در پاسخ به سوال دوم نیز باید به این نکته اشاره کرد که به‌منظور مدیریت پسماند در زنجیره تأمین پارامترهای مختلفی مانند هزینه‌ها، میزان آلودگی‌های منتشر شده ناشی از حمل‌ونقل یا تقاضا را می‌توان به عنوان پارامتر غیرقطعی در نظر گرفت که در این پژوهش هزینه‌های حمل‌ونقل پسماند به دلیل وابسته بودن به شرایط مسیر، قیمت سوخت و ترافیک، به عنوان پارامتر غیر قطعی در نظر گرفته شده و در ادامه برای در نظر گرفتن عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده و مدل با استفاده از روش برتسیمس‌وسیم بازنویسی شد تا بتواند در برابر تغییرات مقادیر پارامترها مقاوم باشد و در آخر برای به دست آوردن جواب‌های پارتو از روش محدودیت اپسیلون استفاده شد.

نتایج به دست آمده نشان داد که با استفاده از مدل طراحی شده می‌توان هزینه‌های زنجیره تأمین مدیریت پسماند را کاهش داد که این کاهش هزینه‌ها در طول زمان می‌تواند به بهبود شرایط اقتصادی سازمان‌های مدیریت پسماند کمک کند و در نتیجه، تصمیمات بهتری برای سایر بخش‌های جامعه اتخاذ شود. همچنین می‌توان آلودگی‌های محیطی را با کاهش انتقال پسماند و کاهش تعداد وسایل نقلیه برای انتقال آن‌ها کم کرد. همچنین، کاهش آلودگی به کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین نیز کمک می‌کند. علاوه بر این، افزایش نسبت پسماند بازیافت شده به دفع شده، نه تنها به کاهش آلودگی و هزینه‌ها کمک می‌کند، بلکه استفاده از منابع اولیه را نیز کاهش داده و به حفظ محیط زیست یاری می‌رساند.

در نهایت، با استفاده از این مدل می‌توان فرصت‌های شغلی را افزایش داد که در نتیجه باعث بهبود وضعیت اقتصادی جامعه و افزایش رضایت می‌شود. همچنین باید به این نکته اشاره کرد که در این پژوهش در نظر گرفتن عدم قطعیت و استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار باعث می‌شود تا بتوان در شرایط بدبینانه و شرایطی که امکان تغییر در مقدار پارامترها وجود دارد، این موارد را به طور درست مدیریت کرد تا در حالت‌های مختلف اقتصادی و احتمال تغییر هزینه‌ها، به نتایج بهینه و قابل اعتمادی دست پیدا کرد و برای شرایط دنیای واقعی مناسب می‌باشد.

یکی از نکات مهم در این مدل چندهدفه تضاد بین اهداف می‌باشد به عنوان مثال کاهش هزینه‌ها و آلودگی می‌تواند فرصت‌های شغلی را نیز کاهش دهد پس هدف اصلی این مدل ایجاد تعادل بین اهداف و به دست آوردن بهترین جواب‌ها برای هر یک از آن‌ها است که بر اساس اولویت‌های هر سازمان می‌تواند متفاوت باشد.

از جمله محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به اینکه مدل طراحی شده برای یک دوره بررسی شده و تغییرات در دوره‌های مختلف در نظر گرفته نشده است همچنین پسماند جامد به طور کلی لحاظ شده و پسماندهای خطرناک مانند پسماندهای بیمارستانی یا الکترونیکی به صورت جدا در نظر گرفته نشده است همچنین فقط پارامترهای هزینه‌های حمل‌ونقل به عنوان پارامتر غیرقطعی بررسی شده ولی پارامترهای دیگری مانند میزان آلودگی تولید شده یا هزینه‌های عملیاتی را نیز می‌توان غیرقطعی در نظر گرفت، اشاره کرد.

به همین دلیل پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مواردی مانند تقاضا یا سایر هزینه‌ها نیز به عنوان غیرقطعی بررسی شده تا بتوان به تصمیم‌گیری‌های بهتری دست پیدا کرد همچنین می‌توان هزینه‌هایی مانند هزینه‌های استفاده از تجهیزات و فناوری‌های پاک‌تر یا پیشرفته‌تر برای حمل‌ونقل یا در مراکز را در تابع اقتصادی در نظر گرفت و به مدل اضافه کرد و تاثیر استفاده از این فناوری‌ها در کاهش آلودگی را به طور مستقیم در تابع زیست محیطی نشان داد و مدل را در دوره‌های مختلف بررسی کرد.

به دلیل کاربردی بودن مدل می‌توان پیشنهادهایی از جمله استفاده از تجهیزات پاک‌تر در مراکز برای کاهش آلودگی، استفاده از وسایل نقلیه برقی برای حمل پسماند به جای وسایل نقلیه با سوخت بنزینی که تاثیر زیادی در کاهش آلودگی‌های حمل‌ونقل دارد، توسعه زیرساخت‌های لازم برای تفکیک زباله در مبدأ که باعث کاهش هزینه‌ها در مراکز تفکیک شده و همچنین ایجاد امکانات بیشتر در مراکز بازیافت برای افزایش بازیافت پسماند نسبت به دفع، اشاره کرد.

۶- مراجع

[1] S. Amirian, M. Amiri, and M. T. Taghavifard, "Designing a Sustainable and Reliable Supply Chain Network Under Uncertainty (Case Study: West of Carton)," Sci. J. Supply Chain Manag., vol. 25, no. 4, 2024. DOR:20.1001.1.20089198.1402.25.81.6.4.(In Persian)

[2]B. KIPROP NGETICH, N. NURYAKIN, and I. N. QAMARI, "How research in sustainable energy supply chain distribution is evolving: Bibliometric review," J. Distrib. Sci., vol. 20, no. 7, pp. 47–56, 2022. https://doi.org/10.15722/jds.20.07.202207.47

[3] H. Eghbali, J. Arkat, and R. Tavakkoli-Moghaddam, "Sustainable supply chain network design for municipal solid waste management: A case study," J. Clean. Prod., vol. 381, p. 135211, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135211

[4] S. Sadeghi Ahangar, A. Sadati, and M. Rabbani, "Sustainable design of a municipal solid waste management system in an integrated closed-loop supply chain network using a fuzzy approach: a case study," J. Ind. Prod. Eng., vol. 38, no. 5, pp. 323–340, 2021. https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1891146

[5] Z. Xu, A. Elomri, S. Pokharel, Q. Zhang, X. G. Ming, and W. Liu, "Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint," Waste Manag., vol. 64, pp. 358–370, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.024

[6] A. Kumar and K. Kumar, "An uncertain sustainable supply chain network design for regulating greenhouse gas emission and supply chain cost," Clean. Logist. Supply Chain, vol. 10, p. 100142, 2024, doi: 10.1016/j.clscn.2024.100142. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100142

[7] S. Seuring, "A review of modeling approaches for sustainable supply chain management," Decis. Support Syst., vol. 54, no. 4, pp. 1513–1520, 2013. https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053

[8] Musa Khaleghi, "Benefits and Achievements of Reverse Logistics in Supply Chain," presented at the International Conference on Logistics and Supply Chain (Fifth National Conference and Third International Conference).2012,[Online].Available: https://sid.ir/paper/874702/fa.(In Persian)

[9] K. Govindan, M. Fattahi, and E. Keyvanshokooh, "Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions," Eur. J. Oper. Res., vol. 263, no. 1, pp. 108–141, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009

[10] C. Prahinski and C. Kocabasoglu, "Empirical research opportunities in reverse supply chains," Omega, vol. 34, no. 6, pp. 519–532, 2006. https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.003

[11] M. Eskandarpour, P. Dejax, J. Miemczyk, and O. Péton, "Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review," Omega, vol. 54, pp. 11–32, 2015. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006

[12] N. Kazemi, N. M. Modak, and K. Govindan, "A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: a bibliometric and content analysis," Int. J. Prod. Res., vol. 57, no. 15–16, pp. 4937–4960, 2019, https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471244

[13] S. A. Raza, "A systematic literature review of closed-loop supply chains," Benchmarking An Int. J., vol. 27, no. 6, pp. 1765–1798, 2020. https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2019-0464

[14] D. D. Nirmal, K. Nageswara Reddy, and S. K. Singh, "Application of fuzzy methods in green and sustainable supply chains: critical insights from a systematic review and bibliometric analysis," Benchmarking An Int. J., vol. 31, no. 5, pp. 1700–1748, 2024. https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2022-0563

[15] B. Mota, M. I. Gomes, A. Carvalho, and A. P. Barbosa-Povoa, "Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning," J. Clean. Prod., vol. 105, pp. 14–27, 2015, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052

[16] S. Seuring and M. Müller, "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management," J. Clean. Prod., vol. 16, no. 15, pp. 1699–1710, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020

[17] M. Arab Momeni, V. Jain, and M. Bagheri, "A Multi-Objective Model for Designing a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Logistics Network," Logistics, vol. 8, no. 1, p. 29, 2024. https://doi.org/10.3390/logistics8010029

[18] Y. Hong, W. Yan, and Q. Ge, "Designing sustainable logistics networks for classified municipal solid wastes collection and transferring with multi-compartment vehicles," Sustain. Cities Soc., vol. 99, p. 104921, 2023. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104921

[19] G. Abbasi, F. Khoshalhan, and S. Javad Hosseininezhad, "Municipal solid waste management and energy production: A multi-objective optimization approach to incineration and biogas waste-to-energy supply chain," Sustain. Energy Technol. Assessments, vol. 54, p. 102809, 2022. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102809

[20] X. Yang, X. Guo, and K. Yang, "Redesigning the municipal solid waste supply chain considering the classified collection and disposal: A case study of incinerable waste in Beijing," Sustain., vol. 13, no. 17, p. 9855, 2021. https://doi.org/10.3390/su13179855

[21] S. Sajedi, A. H. Sarfaraz, S. Bamdad, and K. Khalili-Damghani, "Designing a sustainable reverse logistics network considering the conditional value at risk and uncertainty of demand under different quality and market scenarios," Int. J. Eng., vol. 33, no. 11, pp. 2252–2271, 2020. https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.11b.17

[22] N. Ayvaz-Cavdaroglu, A. Coban, and I. Firtina-Ertis, "Municipal solid waste management via mathematical modeling: A case study in İstanbul, Turkey," J. Environ. Manage., vol. 244, pp. 362–369, 2019 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.065

[23] M. Mohammadi, S.-L. Jämsä-Jounela, and I. Harjunkoski, "Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network," Comput. Chem. Eng., vol. 123, pp. 155–169, 2019. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.12.022

[24] L. Truc Doan, Y. Amer, S.-H. Lee, and P. Ky Phuc, "Optimizing the total cost of an e-waste reverse supply chain considering transportation risk," Oper. Supply Chain Manag. An Int. J., vol. 11, no. 3, pp. 151–160, 2018. http://doi.org/10.31387/oscm0320211

[25]A. Schreiber and J. Yang, "Multi-echelon logistics and disposal optimisation model for municipal solid waste management in Beijing," Int. J. Environ. Waste Manag., vol. 22, no. 1–4, pp. 307–327, 2018. https://doi.org/10.1504/IJEWM.2018.094119

[26] M.Shabangiz, I. Heydari, S. A. Hashemi Foroushani, and A. Goli. Presenting a Multi-Objective Mathematical Model to Design a Green Reverse Logistics System Considering Energy Recovery. Industrial Innovations, 1(4):387-408,2024. https://doi.org/10.61186/jii.1.4.387.(In Persian)

[27] H. Firouzi, J. Rezaeian, M. M. Movahedi, and A. Rashidi Komijan, "Multi-Objective Modeling of the Supply Chain of the Hospital Waste Management Considering the Dimensions of Sustainability Accompanied by Fuzzy Set Theory," Ind. Manag. Stud., vol. 21, no. 71, pp. 177–223, 2023. https://doi.org/10.22054/jims.2023.72812.2850.(In Persian)

[28] M.Safari, M.Fallah, and H.Kazemipoor. Presenting a Mathematical Model for the Collection and Reproduction of Depreciated Products in a Closed Loop Supply Chain Using the GameTheory. Supply Chain Management, 24(74):47-60,2022. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1401.24.74.4.1.(In Persian)

[29] S. G. Mousavian, M. Zeinalnezhad. Reverse Supply Chain Design in the Fast Fashion Industry for Customer Relationship Management Using Data Mining and Mathematical Modeling. Supply Chain Management, 24(76):35-57,2023. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1401.24.76.3.4.(In Persian)

[30] M.Nikzamir, V. baradaran, Y. Panahi . A Supply Chain Network Design for Managing Hospital Solid Waste. Industrial Management Studies,19(60): 85-120, 2021. https://doi.org/10.22054/jims.2021.40574.2283.(In Persian)

[31] S. J. Hosseini dehshiri, M. aghaei. Identifying and prioritizing solutions to overcome obstacles of the implementation of reverse logistics with a hybrid approach: Fuzzy Delphi, SWARA and WASPAS In the paper industry. Supply Chain Management,21(64):85-98, 2019. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1398.21.64.6.2.(In Persian)

[32] N.Manavizadeh, S.aghamohamadi-bosjin, , P.Karimi-Ashtiani. Solving a Location-Routing-Inventory Problem of Hazardeous Waste Collection Network Considering Domestic and Foreign Transportation Fleets. Industrial Management Studies,18(58):215-245, 2020. https://doi.org/10.22054/jims.2019.44492.2346.(In Persian)

[33] Y.esmaeelzadeh, H. sahebi. A reverse logistics supply chain network design for municipal solid waste Case Study: Shiraz City. Journal of Modeling in Engineering, 17(56):313-325,2019. https://doi.org/10.22075/jme.2018.14255.1401.(In Persian)

[34] .M.Paydar,A.Yousefibabadi,andA.Davoudi. Designing an Integrated Direct and Reverse Logistic Robust Optimization Model under Uncertainty. Supply Chain Management, 17(47): 4-15, 2015. (In Persian)

[35] Q. Yuchi, Z. He, Z. Yang, and N. Wang, "A Location-Inventory- Routing Problem in Forward and Reverse Logistics Network Design," Discret. Dyn. Nat. Soc., vol. 2016,no.1,p.3475369,2016. https://doi.org/10.1155/2016/3475369

[36] A. Tayebi Abolhasani. Introduction to Research Methodology: Standard procedures for qualitative data analysis. Science and Technology Policy Letters,09(2):67-96,2019. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24767220.1398.09.2.5.1 (In Persian)

[37] A. Ben-Tal, L. haoui, and A. Nemirovski, Robust Optimization. 2021.

[38] D. Bertsimas and M. Sim, "The price of robustness," Oper. Res., vol. 52, no. 1, pp. 35–53, 2004. https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065

۷- پیوست

در این قسمت مقادیر ورودی در نرم‌افزار شامل اندیس‌ها و پارامترها بیان می‌شود.

جدول (۱۰): مقادیر ورودی اندیس‌ها

نماد	تعداد
i	2
v	6
w	2
m	2
s	2
p	2
r	1
d	1

جدول (۱۱): مقادیر ورودی پارامترها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Cm_{wvim}	850	ed_{wvpd}	0/1
Cs_{wvms}	900	$B1_{iw}$	0/1
Cp_{wvsp}	1000	$B2_{mw}$	0/2
Cr_{wvpr}	800	$B3_{sw}$	0/1
Cd_{wvpd}	1100	$B4_{pw}$	0/2
$T1_{mw}$	1500	$B5_{rw}$	0/3
$T2_{sw}$	1400	$B6_{dw}$	0/4
$T3_{pw}$	1600	$H1_{m}$	2
$T4_{rw}$	1300	$H2_{s}$	1
$T5_{dw}$	1200	$H3_{p}$	1
$f1_{i}$	2200	$H4_{r}$	2
$f2_{m}$	2400	$H5_{d}$	1
$f3_{s}$	3000	$U1_{v}$	1000
$f4_{p}$	2500	$U2_{iw}$	1500
$f5_{r}$	3500	$U3_{mw}$	1450
$f6_{d}$	3200	$U4_{sw}$	1400
em_{wvim}	0/1	$U5_{pw}$	1400
es_{wvms}	0/1	$U6_{rw}$	1300
ep_{wvsp}	0/1	$U7_{dw}$	1200
er_{wvpr}	0/2		

جدول (۱۲): مقادیر حداکثر انحراف در حالت عدم قطعیت

پارامتر	مقدار
$d1_{wvim}$	$Cm_{wvim} \times 15\%$
$d2_{wvms}$	$Cs_{wvms} \times 15\%$
$d3_{wvsp}$	$Cp_{wvsp} \times 15\%$
$d4_{wvpr}$	$Cr_{wvpr} \times 15\%$
$d5_{wvpd}$	$Cd_{wvpd} \times 15\%$