

Designing a Sustainable Closed-Loop Logistics Network Considering the Multi-Mode Demand in Uncertain Environment

Ali Mahmoodirad 

Associate Professor, Department of Mathematics, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

Ali Tahmasebi Notareki 

Master of Industrial Engineering, Masjed-Soleiman Branch, Islamic Azad University, Masjed-Soleiman, Iran

Sadegh Niroomand *

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Firouzabad Institute of Higher Education, Firouzabad, Fars, Iran

Abstract

The closed-loop supply chain is used in practice for several reasons. Firstly, returning products to the production cycle is important for its operation. Secondly, sustainability in the supply chain is a topic of interest for researchers, as the environmental impacts of industries are significant. In this paper, a multi-objective integer fuzzy mathematical programming model is presented to design a sustainable closed-loop supply chain under uncertain conditions. The proposed model aims to maximize profit and social impacts, while minimizing gas emissions into the environment. Since decision makers face uncertainty and doubt, trapezoidal intuitionistic fuzzy numbers are employed to determine the parameter values in the model. To convert the objective functions and model constraints into crisp forms, the expected value and the intuitionistic credibility measure are developed for the objectives and constraints, respectively. Finally, an interactive fuzzy programming approach is utilized to solve the crisp multi-objective problem. Three numerical examples are designed and solved to validate the model and assess the efficiency of the proposed solution method.

* Corresponding Author: niroomand59@gmail.com

How to Cite: Mahmoodirad, A., Tahmasebi Notareki, A., Niroomand, S. (2023). Designing a Sustainable Closed-Loop Logistics Network Considering the Multi-Mode Demand in Uncertain Environment, *Industrial Management Studies*, 21(68), 189-232.

Introduction

Supply chain management encompasses techniques aimed at coordinating all aspects of the supply chain, from raw material procurement to product delivery or recovery, with the objective of minimizing total costs while addressing conflicts among chain partners. Once raw materials have traversed the forward chain and been transformed into products or services, they may require repair, transformation, or proper disposal, which occurs within the reverse chain. The integration of forward and reverse supply chain methods gives rise to a closed-loop supply chain.

Today, one of the primary concerns for organizational managers in supply chain network design is the presence of uncertainties, such as disruptions and uncertain input parameters. Uncertainties can have adverse effects on supply chain performance and decision-making at various network levels, including tactical, strategic, and operational decisions. As probabilistic planning necessitates historical data, which may not always be available or accurate, the theory of fuzzy sets can serve as a suitable option for expressing ambiguity and lack of certainty in parameters. In recent years, environmental factors have received increasing attention. There has been a growing recognition of the importance of environmental effects and the need to incorporate these effects alongside traditional indicators in supply chain design. Environmental considerations are crucial not only for compliance with government regulations but also for improving the organization's social standing from the customers' perspective. Moreover, with the rise of global warming and the accumulation of waste (both renewable and non-renewable, as well as electronic waste and ozone-depleting gases), the importance of managing and controlling these factors has become even more prominent. Despite the significance of environmental issues, there remains a noticeable gap in the supply chain literature concerning the provision of mathematical models based on real-world conditions and efficient solution methods for this problem. This paper focuses on the design of a sustainable closed-loop logistics network that aims to maximize profitability and social factors while minimizing environmental factors. The proposed integrated network considers multi-product and multi-state customer demand under conditions of uncertainty. The significance of this research lies in simultaneously addressing economic, environmental, and social considerations in the modeling process, as previous studies have mostly focused on single or dual objectives. Another innovative aspect of this article is the consideration of parameters in the form of intuitive fuzzy numbers for the design of a sustainable supply chain network.

Materials and Methods

In this research, a comprehensive model addressing the problem of

sustainable closed-loop supply chain under intuitionistic fuzzy uncertainty is selected through library studies and internet research. Subsequently, the model is transformed into a deterministic multi-objective model utilizing the intuitionistic credibility measure. Recognizing that decision makers face not only uncertainty but also doubts, trapezoidal intuitionistic fuzzy numbers are employed to determine parameter values within the proposed model. To convert the objective functions and model constraints into their crisp equivalents, the expected value and intuitionistic credibility measure are respectively developed for the objective functions and constraints.

Findings

Based on the selected confidence levels and numerical examples, the following observations can be made: In numerical example 1, the first objective function demonstrated that the ABS, SO, and TH methods performed best, respectively. However, in the second objective function, the order shifted to SO, ABS, and TH. Interestingly, all three methods performed equally in the third objective function. The performance of the solution methods in numerical example 2 mirrored that of numerical example 1. Moving on to numerical example 3, the first objective function indicated that the SO, TH, and ABS methods were the most effective, respectively. The order remained similar in the second objective function, and once again, all three methods performed equally in the third objective function. These results indicate the relative superiority of the SO solution method compared to the other methods employed. Additionally, concerning the execution time of the solution methods, numerical examples 1 and 2 exhibited nearly equal execution times for the methods. However, in numerical example 3, the SO, TH, and ABS methods displayed the best performance in terms of execution time, respectively. These findings further emphasize the relative superiority of the SO solution method compared to the others in terms of execution time. It is worth noting that the execution time of each method alone increases significantly with the problem's dimensions across all numerical examples.

Conclusions

This paper presents a multi-objective fuzzy optimization model for the design problem of a sustainable closed-loop supply chain. The model takes into account the concept of sustainability and aims to maximize the income and minimize the costs of the entire supply chain, while also minimizing environmental effects and maximizing social effects. The parameters are considered uncertain and are represented by intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers. To handle this uncertainty, the model is transformed into a deterministic multi-objective optimization model using the expected value

definition and a chance constraint based on the size of intuitionistic. The obtained deterministic multi-objective model is then solved using the interactive fuzzy mathematical programming method.

Keywords: Closed Loop Supply Chain Network Design, Trapezoidal Intuitionistic Fuzzy Numbers, Interactive Fuzzy Mathematical Programming, Multi-Objective Problem.






طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن تقاضای چند حالت در شرایط عدم قطعیت

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۵/۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۳

ISSN: 2251/8029

eISSN: 2476-602X

- دانشیار، گروه ریاضی کاربردی، واحد آیت ... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل،
ایران  **علی محمودی راد**
- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی،
مسجدسلیمان، ایران  **علی طهماسبی نو ترکی**
- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، مرکز آموزش عالی فیروزآباد، فیروزآباد، فارس،
ایران  **صادق نیرومند***

چکیده

توجه به بازگرداندن محصولات به چرخه تولید نیاز استفاده از زنجیره تأمین حلقه بسته را بالا برده و همچنین اثرات زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و پیشرفت صنایع، احساس نیاز و علاقه‌مندی پژوهشگران را به طراحی زنجیره تأمین پایدار با توجه به مسائل اقتصادی، زیست محیطی و مسائل اجتماعی بیش از پیش به خود جلب کرده است. بدین منظور، این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی عدد صحیح چند هدفه برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار تحت شرایط عدم قطعیت ارائه می‌کند. مدل ارائه شده سعی می‌کند تا میزان سود و همچنین تأثیرات اجتماعی را بیشینه و میزان ورود گازهای آلاینده به محیط را کمینه کند. همچنین از آنجایی که علاوه بر عدم قطعیت، شک و تردید نیز تصمیم‌گیرنده را دچار چالش می‌کند، برای تعیین مقادیر پارامترها، از اعداد فازی ذوزنقه‌ای شهودی استفاده شده است. برای قطعی سازی توابع هدف و محدودیت‌های مدل به ترتیب از روش امید ریاضی و اندازه اعتبار شهودی توسعه داده شده است. سرانجام برای حل مسئله چند هدفه قطعی به دست آمده، از روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی استفاده شده است. به منظور کارایی و اعتبار سنجی مدل و روش حل پیشنهادی، سه مثال عددی در ابعاد مختلف طراحی و حل شده است.

کلیدواژه‌ها: طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، اعداد فازی شهودی دوزنقه‌ای، برنامه‌ریزی ریاضی فازی تعاملی، مسئله چند هدفه.



مقدمه

طی دهه‌ها، تمرکز مدیریت زنجیره تأمین بر راه‌های مؤثر مدیریت جریان در شبکه‌های پیچیده تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مشتریان بوده است؛ اما اهمیت تولید مجدد و بازیافت محصولات طی دهه گذشته به‌طوری چشمگیر افزایش یافته است. مدیریت لجستیک معکوس فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل مؤثر و کارای جریان مواد اولیه و موجودی در جریان و محصولات نهایی و اطلاعات مرتبط با آن از سوی مصرف‌کنندگان تا منشأ اصلی آن است که با هدف کسب مجدد ارزش اقلام یا انهدام مناسب آن‌ها انجام می‌شود.

مواد اولیه پس از طی کردن زنجیره روبه‌جلو و تبدیل به خدمت و یا ارزش و پس از اتمام عمر نیاز به تعمیر، تبدیل و یا حتی دفع مناسب دارند که در زنجیره معکوس صورت می‌گیرد. ادغام دو روش زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس تشکیل زنجیره تأمین را می‌دهد که زنجیره تأمین حلقه بسته نامیده می‌شود. زیربنای اصلی فرآیندهای لجستیک مستقیم، تولید، توزیع و پخش می‌باشد و متعاقباً لجستیک معکوس، امکان خروج و یا عدم خروج کالاهای مختلف را در انتهای زنجیره تأمین فراهم می‌کند.

یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته می‌تواند شامل سطوح مختلفی از تسهیلات مانند: تأمین‌کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری و کارخانه‌های بازیافت باشد. امروزه، یکی از بزرگ‌ترین نگرانی‌های مدیران سازمان‌ها در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین وجود عدم قطعیت‌هایی همچون وقوع اختلالات و عدم قطعیت پارامترهای ورودی مسائل می‌باشد. عدم قطعیت‌ها می‌توانند اثرات سوء بر عملکرد زنجیره‌های تأمین و تصمیمات اتخاذشده از جمله تاکتیکی، استراتژیک و عملیاتی در سطوح مختلف شبکه، داشته باشند. با توجه به اینکه استفاده از برنامه‌ریزی احتمالی، نیازمند وجود داده‌های تاریخی است و از طرفی ممکن است این داده‌ها موجود نباشند یا به‌دقت معلوم نباشند، بنابراین تئوری مجموعه‌های فازی می‌تواند گزینه مناسبی برای بیان ابهام و نبود قطعیت در پارامترها باشد.

نظریه مجموعه‌های فازی در مدل‌سازی برخی از مسائلی که با عدم قطعیت مواجه هستند موفق بوده است. با توجه به این موفقیت، استفاده از آن نیز در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. با اینکه سطح دانش منطق فازی و همچنین استفاده

از آن به میزان چشمگیری افزایش یافته، اما نمی‌توان از نقاط ضعف آن نیز چشم‌پوشی کرد. برای استفاده از نظریه فازی معمولی، برای هر مشخصه باید یک تابع عضویت قطعی تعیین کنیم. وقتی در منطق فازی از عدم قطعیت صحبت می‌شود، داشتن تابع عضویت قطعی تا حدی می‌تواند غیرقابل‌پذیرش و از نقاط ضعف آن باشد. دیگر آنکه منطق فازی تفاوتی بین مقوله‌ای که هیچ دانش و اطلاعاتی از آن در دست نیست و مقوله‌ای که اطلاعاتی از آن در دست هست و یا دلایلی هرچند موافق و یا مخالف علیه آن وجود دارد، نمی‌گذارد. مشکل دیگر در منطق فازی معمولی با کمبود اطلاعات مرتبط با موضوع رخ می‌دهد. به همین دلیل منطق فازی برای مسائلی که در آن داده‌ها نامرتب هستند و یا در مواقعی که تعریف کردن درجات عضویت مشکل و پیچیده باشد توصیه نمی‌شود. در مقابل، منطق فازی شهودی این امکان را فراهم می‌آورد تا مفاهیمی که دارای شک و تردید هستند، توصیف و مدل‌سازی شوند. منطق فازی شهودی علاوه بر اعمال تابع عضویت، امکان تشکیل تابع عدم عضویت را نیز می‌دهد؛ یعنی همان‌طور که شدن را مدنظر دارد، نشدن را فراموش نخواهد کرد. همچنین با توجه به اینکه در ابتدا منطق فازی مطرح گردید و سال‌ها بعد منطق فازی شهودی مطرح شد ولی منطق فازی معمولی را می‌توان جزئی از منطق فازی شهودی دانست.

یکی از موضوعاتی که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است، عوامل زیست‌محیطی است. در دو دهه اخیر، توجه روزافزونی به اهمیت اثرات زیست‌محیطی و در نظر گرفتن این اثرات در کنار شاخص‌های سنتی در طراحی زنجیره تأمین صورت گرفته است. یکی از دلایل اصلی توجه به اثرات زیست‌محیطی آن است که توجه به مسائل زیست‌محیطی، نه تنها باعث رعایت قوانین دولتی می‌گردد بلکه سبب بهبود وجه اجتماعی سازمان از دیدگاه مشتریان نیز می‌گردد. از طرفی با توجه پدیده گرم شدن کره زمین و ورود زباله‌های (تجدید پذیر، تجدید ناپذیر، الکترونیکی، گازهای مخرب لایه اوزون و...) در سال‌های اخیر اهمیت مهار و کنترل این عوامل را بیش‌ازپیش بالا برده است. با وجود اهمیت فراوان مسائل زیست‌محیطی، خلأ محسوسی در ادبیات زنجیره تأمین در ارائه مدل‌های ریاضی مبتنی بر شرایط دنیای واقعی و روش‌های حل کارا برای مسئله احساس می‌شود.

این مقاله به طراحی یک شبکه لجستیک حلقه بسته پایدار که سود و عوامل اجتماعی را ماکزیمم و عوامل زیست محیطی را مینیمم می کند، می پردازد. این شبکه یکپارچه به صورت چند محصولی و چند حالت تقاضای مشتری در شرایط عدم قطعیت ارائه گردیده است. اهمیت این موضوع از آنجایی است که در ادبیات کمتر به طور هم زمان به این ملاحظات اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در مدل سازی مورد توجه قرار گرفته است و غالب پژوهش ها تک یا دو هدفه بوده اند. نکته دیگری که باعث متمایز شدن این مقاله از نقطه نظر نوآوری از مقالات قبلی شده است، در نظر گرفتن پارامترها به صورت اعداد فازی شهودی در طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار است. لذا مهم ترین نوآوری این پژوهش را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار در محیط فازی شهودی.
- بهینه سازی هزینه های کلی زنجیره با استفاده از برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط.
- استفاده از امید ریاضی برای توابع هدف و اندازه اعتبار شهودی برای محدودیت ها به منظور تبدیل مسئله چندهدفه عدم قطعیت پیشنهادی به شکل یک مسئله چندهدفه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار قطعی.
- استفاده از روش برنامه ریزی ریاضی فازی به منظور حل مدل ریاضی چندهدفه. ساختار مقاله به این شرح است که در ادامه بیان می گردد. در بخش دوم مروری بر ادبیات مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته انجام شده است. در بخش سوم تعاریف و مفاهیم مورد نیاز مجموعه فازی شهودی که در این مقاله مورد نیاز است آمده است. مدل ریاضی پیشنهادی مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار تحت شرایط عدم قطعیت در بخش چهارم آمده است. در بخش پنجم به حل مدل ریاضی چند هدفه قطعی می پردازیم و نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت در بخش ششم آمده است. سرانجام در بخش هفتم نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها ارائه می گردد.

پیشینه پژوهش

غالب کارهای انجام شده در زمینه طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین شامل مدل‌های مختلف مکان‌یابی تسهیلات بر پایه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته است. طراحی شبکه‌ی حلقه بسته برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ شروع شد (Fleischmann et al., 2001)، آن‌ها نشان دادند که طراحی شبکه‌ی لجستیک به‌طور یکپارچه و هم‌زمان موجب کاهش هزینه‌ها نسبت به رویکرد سنتی می‌شود. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در حالت چند محصولی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و عدم قطعیت در تقاضا و تعداد محصول برگشتی توسط Salema et al. (2007) پیشنهاد شد. Üster et al. (2007) یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کردند و برای حل آن از روش تجزیه بندرز استفاده کردند. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برای یکپارچه‌سازی شبکه‌های لجستیک روبه‌جلو / عقب ارائه دادند که این مدل به‌صورت حلقه بسته، تک‌محصولی و هدف آن محاسبه سود/هزینه بوده است. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱) مدل دو هدفه به‌منظور کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن سطح پاسخ‌دهی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد کردند. پیشوایی و ترابی (۲۰۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی دو هدفه برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته معرفی کردند. در این مدل یک روش حل فازی تعاملی با ترکیب چند روش برای حل مدل پیشنهاد شده است. Wang and Hsu (2010) یک مدل لجستیک حلقه بسته با الگوریتم ژنتیک مبتنی بر پوشش درخت ارائه دادند که این مدل به‌صورت تک‌محصولی و هدف آن محاسبه سود/هزینه بوده است. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱) مدل بهینه‌سازی استوار برای طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته در حالت تک‌محصولی پیشنهاد کردند. حسن‌زاده امین و ژانگ (۲۰۱۲) یک مدل یکپارچه برای پیکربندی زنجیره تأمین حلقه بسته و انتخاب تأمین‌کننده با رویکرد چند هدفه ارائه دادند که این مدل به‌صورت حلقه بسته، چند محصولی و هدف آن علاوه بر محاسبه سود/هزینه، مزایای زیست‌محیطی نیز بوده است. حسن‌زاده امین و ژانگ (۲۰۱۲) مدل ریاضی مکان‌یابی چندمنظوره برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت تقاضای عدم

قطعیته ارائه دادند که این مدل به صورت چند محصولی و هدف آن علاوه بر محاسبه سود/هزینه، مزایای زیست محیطی نیز بوده است. غائب لو و تارخ (۲۰۱۴) یک مدل طراحی زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس سازگار با محیط زیست ارائه دادند که این مدل به صورت حلقه بسته، چند محصولی و هدف آن علاوه بر محاسبه سود/هزینه، سبز بودن قطعه و محصول نیز بوده است. (Jindal and Sangwan (2017) یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت فازی باهدف مسائل اقتصادی و زیست محیطی پیشنهاد داده اند. آن ها پس از فازی زدایی مدل پیشنهادی، با روش اپسیلون محدودیت این مسئله چند هدفه قطعی را حل کردند.

Tsao et al. (2018) مدل برنامه ریزی عدد صحیح چند هدفه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار جهت کمینه سازی هزینه کل زنجیره تأمین و کاهش آلودگی زیست محیطی و بیشینه سازی مسئولیت اجتماعی تحت شرایط عدم قطعیت پیشنهاد کرده اند و برای حل این مسئله عدم قطعیت، از یک روش تعاملی بر اساس برنامه ریزی تصادفی چند هدفه و برنامه ریزی چند هدفه احتمالی فازی استفاده کردند. فتح اللهی فرد و حاجی آقایی کشتلی (۲۰۱۸) یک مدل چند هدفه تصادفی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن شرایط محیطی پیشنهاد کرده اند. آن ها به منظور حل این مسئله چند هدفه از چندین روش فراابتکاری استفاده کرده اند. دهقان و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل ریاضی چند هدفه برای طراحی مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت روغن خوراکی ارائه دادند. در مدل پیشنهادی دو نوع عدم قطعیت در پارامترهای مسئله وجود داشت و یک روش برنامه ریزی امکانی-تصادفی استوار برای حل آن پیشنهاد نمودند. جوزدانی و همکاران (۲۰۱۸) مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین استواری با در نظر گرفتن چندین محصول، چندین حالت حمل و عدم قطعیت در هزینه ها، تقاضاها و مقادیر عرضه در صنایع لبنی پیشنهاد کردند. محمودی راد و نیرومند (۲۰۲۰) مسئله زنجیره تأمین دو مرحله ای و دو هدفه که پارامترهای آن از نوع عدم قطعیت مبتنی بر نظریه باور هستند، توسعه دادند. فصیحی و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل ریاضی دو هدفه و چند دوره ای برای مسئله زنجیره

تأمین حلقه بسته ماهی پیشنهاد کردند و به منظور حل مدل ریاضی چند هدفه از روش‌های فراابتکاری استفاده نمودند. صالحی امیری و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار در صنعت گردو پیشنهاد نمودند و به منظور حل مدل پیشنهادی، از روش‌های دقیق و فراابتکاری استفاده نموده‌اند. صالحی امیری و همکاران (۲۰۲۲) یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و اجتماعی، برای صنعت آواکادو طراحی کردند و برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی واقعی را در کشور مکزیک مورد بررسی قرار دادند. ابراهیمی و باقری (۲۰۲۲) شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته‌ای را برای صنعت بطری‌های پلاستیکی در شرایط قطعی پیشنهاد کردند و به دنبال آن یک مدل ریاضی چند هدفه با در نظر گرفتن چندین فرضیه ارائه نمودند. کرم پور و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی دوهدفه با هدف ماکزیمم نمودن سود موجودی و مینیمم کردن انتشار کربن حمل‌ونقل در یک شبکه زنجیره تأمین پیشنهاد داده‌اند. آن‌ها به منظور حل مدل ریاضی پیشنهادی خود از روش‌های فراابتکاری استفاده نمودند. به منظور راحتی خوانندگان، برخی از مطالعات مهم که در سال‌های اخیر در حوزه مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته، انجام شده در جدول ۱ طبقه‌بندی شده است.

جدول ۱. ادبیات طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در محیط عدم قطعیت.

روش حل		عدم قطعیت			تقاضا		تابع هدف			نویسندگان	
فراابتکاری	دقیق	باور	تصادفی	فازی شهودی	فازی	چندحالتی	تک‌حالتی	اجتماعی	محیطی		اقتصادی
-	✓	-	-	-	✓	-	✓	-	-	✓	Dehghan et al. (2018)
✓	-	✓	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	Fathollahi-Fard and Hajiaghaei-Keshteli (2018)
-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓	Jouzdani et al. (2018)
-	✓	-	-	-	✓	✓	-	-	-	✓	Mamoodirad et al. (2020)
-	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	✓	✓	Mamoodirad and Niroomand (2020)

نویسندگان	تابع هدف			تقاضا			عدم قطعیت			روش حل	
	اقتصادی	محیطی	اجتماعی	تک حالتی	چند حالتی	فازی	فازی شهودی	تصادفی	باور	دقیق	فراابتکاری
Fasihi et al. (2021)	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
Salehi-Amiri et al. (2021)	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓
Salehi-Amiri et al. (2022)	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-
Ebrahimi and Bagheri (2022)	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-
Karampour et al. (2022)	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
Liu et al. (2022)	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-
مطالعه حاضر	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	-

مجموعه فازی شهودی

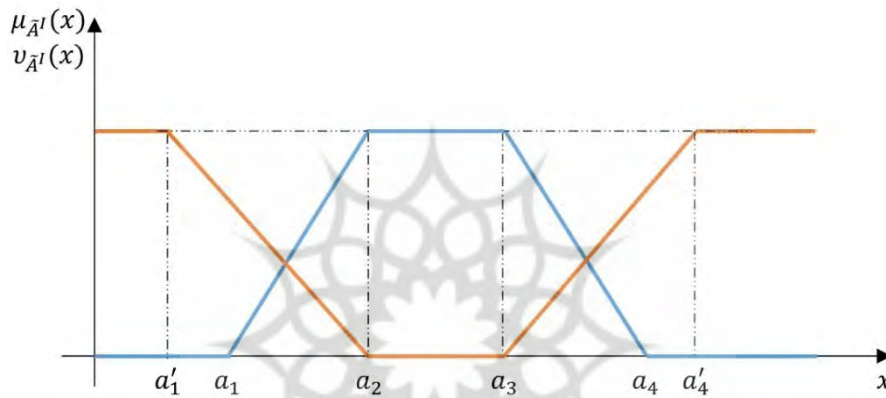
در این بخش به برخی تعاریف و مفاهیم پایه از مجموعه فازی شهودی که در این مقاله مورد نیاز است، پرداخته می شود.

تعریف ۱ فرض کنید $a'_1 \leq a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4 \leq a'_4$. یک عدد فازی شهودی دوزنقه‌ای، \tilde{A}' ، یک مجموعه فازی شهودی در \square می باشد و با $\tilde{A}' = (a_1, a_2, a_3, a_4; a'_1, a_2, a_3, a'_4)$ نشان می دهیم که تابع عضویت $(\mu_{\tilde{A}'}(x))$ و عدم عضویتی $(\nu_{\tilde{A}'}(x))$ به صورت زیر دارد (شکل ۱ را ببینید) (Singh & Yadav, 2017).

$$\mu_{\tilde{A}'}(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1 & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0 & a_4 < x \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{\tilde{A}^I}(x) = \begin{cases} \frac{a_2 - x}{a_2 - a'_1} & a'_1 \leq x \leq a_2 \\ 0 & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{x - a_3}{a'_4 - a_3} & a_3 \leq x \leq a'_4 \\ 1 & o.w \end{cases} \quad (2)$$

شکل ۱. توابع عضویت و عدم عضویت عدد فازی دوزنقه‌ای.



در عدد فازی شهودی دوزنقه‌ای $\tilde{A}^I = (a_1, a_2, a_3, a_4; a'_1, a_2, a_3, a'_4)$ با فرض اینکه $a_2 = a_3$ عدد فازی شهودی دوزنقه‌ای به عدد فازی شهودی مثلثی تبدیل خواهد شد.

تعریف ۲ (Chakraborty et al., 2014). اگر $\tilde{A}^I = (a_1, a_2, a_3, a_4; a'_1, a_2, a_3, a'_4)$ و $\tilde{B}^I = (b_1, b_2, b_3, b_4; b'_1, b_2, b_3, b'_4)$ دو عدد فازی شهودی دوزنقه‌ای و r یک عدد حقیقی باشد، در حالت $Cr_\mu\{\tilde{A}^I \geq r\} \geq \alpha$ و $Cr_\nu\{\tilde{A}^I \geq r\} \leq \beta$ که $0 \leq \alpha + \beta \leq 1$ خواهیم داشت:

$$\frac{a_4 - r}{2(a_4 - a_3)} \geq \alpha \Leftrightarrow r \leq (1 - 2\alpha)a_4 + 2\alpha a_3 \quad \alpha \in \left[0, \frac{1}{2}\right) \quad (3)$$

$$\frac{2a_2 - r - a_1}{2(a_2 - a_1)} \geq \alpha \Leftrightarrow r \leq (2 - 2\alpha)a_2 + (2\alpha - 1)a_1 \quad \alpha \in \left[\frac{1}{2}, 1\right] \quad (۴)$$

$$\frac{r - a_1'}{2(a_2 - a_1')} \leq \beta \Leftrightarrow r \leq 2\beta a_2 + (1 - 2\beta)a_1' \quad \beta \in \left[0, \frac{1}{2}\right] \quad (۵)$$

$$\frac{r - 2a_3 + a_4'}{2(a_4' - a_3)} \leq \beta \Leftrightarrow r \leq (2\beta - 1)a_4' + (2 - 2\beta)a_3 \quad \beta \in \left[\frac{1}{2}, 1\right] \quad (۶)$$

در حالت $Cr_\mu\{\tilde{A}' \leq r\} \geq \alpha$ و $Cr_\nu\{\tilde{A}' \leq r\} \leq \beta$ که $0 \leq \alpha + \beta \leq 1$ خواهیم داشت:

$$\frac{r - a_1}{2(a_2 - a_1)} \geq \alpha \Leftrightarrow r \geq (1 - 2\alpha)a_1 + 2\alpha a_2 \quad \alpha \in \left[0, \frac{1}{2}\right] \quad (۷)$$

$$\frac{a_4 - 2a_3 + r}{2(a_4 - a_3)} \geq \alpha \Leftrightarrow r \geq (2\alpha - 1)a_4 + (2 - 2\alpha)a_3 \quad \alpha \in \left[\frac{1}{2}, 1\right] \quad (۸)$$

$$\frac{a_4' - r}{2(a_4' - a_3)} \leq \beta \Leftrightarrow r \geq (1 - 2\beta)a_4' + 2\beta a_3 \quad \beta \in \left[0, \frac{1}{2}\right] \quad (۹)$$

$$\frac{2a_2 - r - a_1'}{2(a_2 - a_1')} \leq \beta \Leftrightarrow r \geq (2 - 2\beta)a_2 + (\beta + 1)a_1' \quad \beta \in \left[\frac{1}{2}, 1\right] \quad (۱۰)$$

معادلات (۷) - (۱۰) را می توان برای قطعی کردن محدودیت هایی که فازی هستند، استفاده کرد.

با توجه به جزئیات بیان شده در مورد اندازه اعتبار شهودی، روشی یا فرمول بندی در برخورد با محدودیت تساوی وجود ندارد. لذا در ادامه تعریفی برای مواجهه با محدودیت تساوی برای اعداد فازی شهودی پیشنهاد می شود. اگر $a_2 \leq \tilde{A}' \leq a_3$ ، آنگاه $Cr_\nu\{\tilde{A}' \leq r\} = 0.5$ و $Cr_\mu\{\tilde{A}' \geq r\} = 0.5$ ، $Cr_\mu\{\tilde{A}' \leq r\} = 0.5$ و $Cr_\nu\{\tilde{A}' \geq r\} = 0.5$. در این حالت می توان گفت که r و \tilde{A}' به طور تقریبی با هم برابرند.

تعریف ۳. عدد حقیقی r و عدد فازی شهودی ذوزنقه ای \tilde{A}' به طور تقریب با هم برابرند اگر و فقط اگر $a_2 \leq \tilde{A}' \leq a_3$.

تعریف ۴ (Chakraborty et al., 2014). اگر $\tilde{A}^t = (a_1, a_2, a_3, a_4; a_5, a_2, a_3, a_6)$ یک عدد فازی شهودی ذوزنقه‌ای باشد، مقدار مورد انتظار عدد فازی شهودی \tilde{A}^t یعنی $E(\tilde{A}^t)$ عبارت است از:

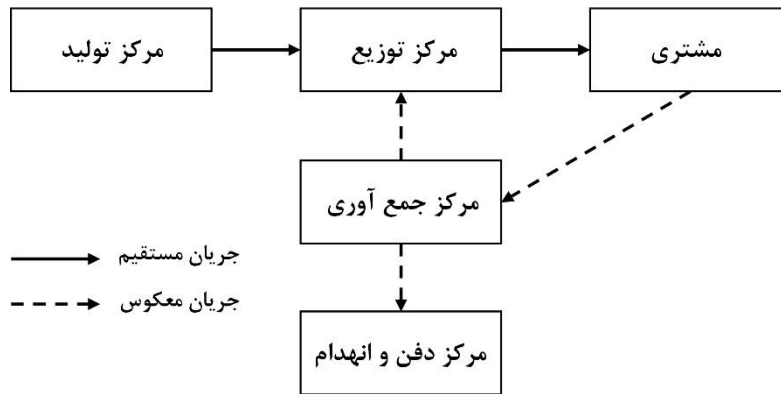
$$E(\tilde{A}^t) = \frac{a_1 + 2a_2 + 2a_3 + a_4 + a_5 + a_6}{8}$$

بیان مسئله

مسئله اصلی که در این مقاله تحت شرایط عدم قطعیت به آن پرداخته می‌شود، شامل تعیین کردن تعداد مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری و دفع و همچنین مقادیر جریان مواد بین تسهیلات مختلف با توجه به سه تابع هدف متضاد و در تناقض با یکدیگر است. این سه تابع هدف شامل ۱. جنبه‌های اقتصادی با حداکثر سازی سود کل زنجیره تأمین ۲. جنبه زیست‌محیطی به حداقل رساندن اثرات ناسازگار با محیط زندگی ۳. جنبه‌های اجتماعی با به حداکثر رساندن تأثیرات اجتماعی؛ بنابراین، بهینه‌سازی پیکربندی استراتژیک این شبکه زنجیره تأمین شامل یک تعامل منطقی بین این سه هدف است. شکل (۲) چنین زنجیره تأمین حلقه بسته‌ای را نشان می‌دهد.

عواملی مثل هزینه را نمی‌توان به صورت قطعی به دست آورد، همچنین ظرفیت مراکز به دلایل مختلفی همچون خرابی دستگاه، کم‌کاری توسط اپراتور، مرخصی، نبود برق، حوادث قابل پیش‌بینی و غیرقابل پیش‌بینی، نمی‌توان به صورت قطعی بیان کرد. علاوه بر عوامل بالا تعداد فرصت‌های شغلی و میزان تولید گازهای آلاینده توسط وسایل حمل‌ونقل و مراکز مختلف دارای قطعیت نیستند. بنا به شرایطی که توضیح داده شد، در این مقاله پارامترهایی که دارای عدم قطعیت هستند به‌عنوان پارامترهای فازی شهودی ذوزنقه‌ای مطرح می‌شوند. مدل غیرقطعی ارائه شده در ادامه معرفی و توضیح داده می‌شود.

شکل ۲. شکل یک زنجیره تأمین حلقه بسته.



مدل ریاضی مسئله

به منظور ایجاد مدل ریاضی مسئله ابتدا نیاز است تا به معرفی اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم استفاده شده در مدل بپردازیم. در این مقاله علامت \square بیانگر فازی بودن پارامتر است و برای اختصار از لفظ فازی در معرفی پارامتر مورد نظر خودداری شده است. این اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم عبارت‌اند از:

اندیس‌ها

J	مجموعه مراکز بالقوه تولید ($j \in J$)
K	مجموعه مراکز بالقوه توزیع ($k \in K$)
L	مجموعه نقاط استقرار مشتریان ($l \in L$)
I	مجموعه مراکز بالقوه جمع‌آوری و تعمیر ($i \in I$)
N	مجموعه مراکز بالقوه دفع ($n \in N$)
S	مجموعه محصولات ($s \in S$)
P	مجموعه حالت‌های حمل ($p \in P$)
G	مجموعه‌ی حالت‌های تقاضا ($g \in G$)

پارامترها

هزینه ثابت احداث مرکز تولید j	$\tilde{f}_j^{(1)}$
هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k	$\tilde{f}_k^{(2)}$
هزینه ثابت احداث مرکز جمع آوری و تعمیر i	$\tilde{f}_i^{(3)}$
هزینه ثابت احداث مرکز دفع n	$\tilde{f}_n^{(4)}$
هزینه حمل و نقل یک واحد محصول s از مرکز تولید j به مرکز توزیع k با حالت حمل p	$\tilde{c}_{sjkp}^{(1)}$
هزینه حمل و نقل یک واحد محصول s از مرکز توزیع k به مشتری l با حالت حمل p	$\tilde{c}_{sklp}^{(2)}$
هزینه حمل و نقل یک واحد محصول s از مشتری l به مرکز جمع آوری i با حالت حمل p	$\tilde{c}_{slip}^{(3)}$
هزینه حمل و نقل یک واحد محصول s از مرکز جمع آوری i به مرکز توزیع k با حالت حمل p	$\tilde{c}_{sikp}^{(4)}$
هزینه حمل و نقل یک واحد محصول s از مرکز جمع آوری i به مرکز دفع n با حالت حمل p	$\tilde{c}_{sinp}^{(5)}$
هزینه تولید محصول s در مرکز تولید j	$\tilde{c}_{sj}^{(6)}$
هزینه انبار محصول s در مرکز توزیع k	$\tilde{c}_{sk}^{(7)}$
هزینه بازیابی و تعمیر محصول s در مرکز جمع آوری i	$\tilde{c}_{si}^{(8)}$
هزینه انهدام محصول s در مرکز دفع n	$\tilde{c}_{sn}^{(9)}$
ظرفیت مرکز تولید j برای تولید محصول s	$\tilde{c}p_{js}$
ظرفیت مرکز توزیع k برای تولید محصول s	$\tilde{c}d_{ks}$
ظرفیت مرکز جمع آوری و تعمیر i برای محصول s	$\tilde{c}f_{is}$
ظرفیت مرکز دفع n برای محصول s	$\tilde{c}h_{ns}$
تقاضای مشتری l برای محصول s در حالت تقاضای g	\tilde{d}_{1sg}

درصدی از محصولات برگشتی که از مشتریان به مراکز جمع‌آوری فرستاده می‌شود. ρ

درصدی از محصولات برگشتی که از مراکز جمع‌آوری به مراکز دفع فرستاده می‌شود. α

قیمت محصول s در حالت تقاضای g $\tilde{p}r_{sg}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول s از مرکز تولید j به مرکز توزیع k با حالت حمل p $\tilde{m}_{sjkp}^{(1)}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول s در مرکز تولید j $\tilde{m}_{sj}^{(2)}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول s از مرکز توزیع k به مشتری l با حالت حمل p $\tilde{m}_{sklp}^{(3)}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول s از مشتری l به مرکز جمع‌آوری i با حالت حمل p $\tilde{m}_{slip}^{(4)}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول s از مرکز جمع‌آوری i به مرکز توزیع k با حالت حمل p $\tilde{m}_{sikp}^{(5)}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول بازیابی شده s در مرکز جمع‌آوری و تعمیر i $\tilde{m}_{si}^{(6)}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول s از مرکز جمع‌آوری i به مرکز دفع n با حالت حمل و نقل p $\tilde{m}_{sinp}^{(7)}$

میزان انتشار گاز CO₂ برای هر واحد محصول منهدم شده s در مرکز دفع n $\tilde{m}_{sn}^{(8)}$

فاکتور وزن از کل تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده ε

تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده در مرکز تولید j $\tilde{E}_j^{(1)}$

تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده در مرکز توزیع k $\tilde{E}_k^{(2)}$

تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده در مرکز جمع‌آوری i $\tilde{E}_i^{(3)}$

تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده در مرکز دفع n $\tilde{E}_n^{(4)}$

متغیرهای تصمیم

برابر ۱ است اگر یک مرکز تولید در سایت z احداث شود، در غیر این صورت صفر.	U_j
برابر ۱ است اگر یک مرکز توزیع در سایت k احداث شود، در غیر این صورت صفر.	W_k
برابر ۱ است اگر تقاضای مشتری l برای محصول s در حالت g برآورده شود و در غیر این صورت صفر.	R_{lsg}
برابر ۱ است اگر یک مرکز جمع آوری و تعمیر در سایت i احداث شود، در غیر این صورت صفر.	V_i
برابر ۱ است اگر یک مرکز دفع در مکان n احداث شود، در غیر این صورت صفر.	Z_n
مقدار محصول s که از کارخانه z به مرکز توزیع k با حالت حمل p ارسال می شود.	$X_{sjkp}^{(1)}$
مقدار محصول s که از مرکز توزیع k به مشتری l با حالت حمل p ارسال می شود.	$X_{sklp}^{(2)}$
مقدار محصول تعمیر شده s که از مرکز توزیع k به مشتری l با حالت حمل p ارسال می شود.	$XX_{sklp}^{(2)}$
مقدار محصول s که از مشتری l به مرکز جمع آوری و تعمیر i با حالت حمل p ارسال می شود.	$X_{slip}^{(3)}$
مقدار محصول s که از مرکز جمع آوری i به مرکز توزیع k با حالت حمل p ارسال می شود.	$X_{sikp}^{(4)}$
مقدار محصول s که از مرکز جمع آوری i به مرکز دفع n با حالت حمل p ارسال می شود.	$X_{sinp}^{(5)}$

با توجه به اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم تعریف شده در بالا مدل ریاضی پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \max Z_1 = & \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S \sum_{g=1}^G \tilde{p}r_{sg} \tilde{d}_{lsg} R_{lsg} - \sum_{j=1}^J \tilde{f}_j^1 U_j - \sum_{k=1}^K \tilde{f}_k^2 W_k - \sum_{i=1}^I \tilde{f}_i^3 V_i - \sum_{n=1}^N \tilde{f}_n^4 Z_n \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (\tilde{c}_{sj}^{(6)} + \tilde{c}_{sjkp}^{(1)}) X_{sjkp}^{(1)} - \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P (\tilde{c}_{sk}^{(7)} + \tilde{c}_{sklp}^{(2)}) (X_{sklp}^{(2)} + XX_{sklp}^{(2)}) \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \tilde{c}_{slip}^{(3)} X_{slip}^{(3)} - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (\tilde{c}_{si}^{(8)} + \tilde{c}_{sikp}^{(4)}) X_{sikp}^{(4)} \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P (\tilde{c}_{sn}^{(9)} + \tilde{c}_{sinp}^{(5)}) X_{sinp}^{(5)} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (\tilde{m}_{sjkp}^{(1)} + \tilde{m}_{sj}^{(2)}) X_{sjkp}^{(1)} + \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \tilde{m}_{sklp}^{(3)} (X_{sklp}^{(2)} + XX_{sklp}^{(2)}) \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \tilde{m}_{slip}^{(4)} X_{slip}^{(3)} + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (\tilde{m}_{sikp}^{(5)} + \tilde{m}_{si}^{(6)}) X_{sikp}^{(4)} \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P (\tilde{m}_{sinp}^{(7)} + \tilde{m}_{sn}^{(8)}) X_{sinp}^{(5)} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\max Z_3 = \varepsilon \left(\sum_{j=1}^J E_j^{(1)} U_j + \sum_{k=1}^K E_k^{(2)} W_k + \sum_{i=1}^I E_i^{(3)} V_i + \sum_n E_n^{(4)} Z_n \right) \quad (25)$$

subject to:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} \leq \tilde{c}p_{js} U_j \quad \forall j, s \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sikp}^{(4)} \leq \tilde{c}d_{ks} W_k \quad \forall k, s \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{sklp}^{(2)} \quad \forall k, s \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sikp}^{(4)} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P XX_{sklp}^{(2)} \quad \forall k, s \quad (29)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sklp}^{(2)} + \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P XX_{sklp}^{(2)} = \sum_{g=1}^G \tilde{d}_{lsg} R_{lsg} \quad \forall l, s \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} = \rho \sum_{g=1}^G \tilde{d}_{lsg} R_{lsg} \quad \forall l, s \quad (31)$$

$$\sum_{g=1}^G R_{lsg} = 1 \quad \forall s, l \quad (32)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} \leq \tilde{c} f_{is} V_i \quad \forall s, i \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sinp}^{(5)} \leq \tilde{c} h_{ns} Z_n \quad \forall s, n \quad (34)$$

$$(1 - \alpha) \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sikp}^{(4)} \quad \forall s, i \quad (35)$$

$$\alpha \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} = \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P X_{sinp}^{(5)} \quad \forall s, i \quad (36)$$

$$U_j, W_k, R_{lsg}, V_{is}, Z_n \in \{0, 1\} \quad \forall j, l, i, p, k, g, n, s \quad (37)$$

$$X_{sjkp}^{(1)}, X_{sklp}^{(2)}, X_{sklp}^{(2)}, X_{slip}^{(3)}, X_{sikp}^{(4)}, X_{sinp}^{(5)} \geq 0 \quad \forall j, l, i, p, k, g, n, s \quad (38)$$

تابع هدف (۲۳) سعی بر آن دارد تا میزان سود حاصل از سیستم را تا بالاترین حد خود برساند. این تابع هدف جمع هزینه‌های ثابت ایجاد مراکز مختلف (تولید، توزیع، جمع‌آوری و دفع)، هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات بین مراکز مختلف و هزینه‌های تولید، توزیع، بازیابی محصولات و دفع آن‌ها را از میزان فروش محصولات کسر می‌کند تا بتوان به بیشترین میزان سود سیستم دست پیدا کند. تابع هدف (۲۴) میزان انتشار گازهای آلاینده توسط تمامی مراکزی که ایجاد گاز می‌کنند (مراکز تولید، جمع‌آوری و دفع) و همچنین انتشار گازهای آلاینده توسط وسایل حمل‌ونقل که محصولات را بین مراکز مختلف این شبکه جابجا می‌کنند را کمینه می‌نماید. در کارخانجاتی که دارای دستگاه‌های منتشرکننده گازهای آلاینده می‌باشند، به‌طور معمول میزان آلاینده‌گی هر دستگاه به‌صورت لیتر گاز آلاینده در واحد زمان توسط سازنده آن دستگاه مشخص می‌شود. علاوه بر در نظر گرفتن جنبه‌ی اقتصادی و زیست‌محیطی نمی‌توان از جنبه‌های اجتماعی غافل شد. جنبه‌های اجتماعی که در این مسئله مورد استفاده قرار گرفته به این صورت است که تعداد فرصت‌های شغلی در مراکز مختلف را در بر می‌گیرد. پس با این توضیحات باید گفت که تابع

هدف (۲۵) سعی بر آن دارد تا میزان ایجاد فرصت‌های شغلی در مراکز مختلف شبکه را به بیشترین میزان خود برساند.

دسته محدودیت (۲۶) بیان می‌کنند که مقدار محصولاتی که از مرکز تولید به مرکز توزیع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند کوچک‌تر و یا مساوی ظرفیت مرکز تولید می‌باشد. درواقع یعنی مرکز تولید توان و ظرفیت تولید این را دارد تا مقدار محصولات موردنیاز مرکز توزیع را بدون تأخیر و کاستی در زمان و مقدار معین تولید نماید.

دسته محدودیت (۲۷) بیان می‌کنند که جمع مقدار محصولاتی که از مرکز تولید به مرکز توزیع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند و مقدار محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری به مرکز توزیع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند همواره کوچک‌تر و یا مساوی ظرفیت مرکز توزیع می‌باشد. درواقع به این معنی است که مراکز توزیع توانایی توزیع تمامی محصولات و محصولات تعمیری را که از مراکز تولید و جمع‌آوری دریافت می‌کنند، برای ارسال به بازار و استفاده مشتریان دارند.

دسته محدودیت (۲۸) بر این نکته اشاره می‌کند که مقدار محصولاتی که از مرکز تولید به مرکز توزیع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند برابر است با مقدار محصولاتی که از مرکز توزیع به مشتریان با حالت حمل خاص ارسال می‌گردند؛ یعنی تمامی محصولاتی که از مرکز تولید به مرکز توزیع وارد می‌شوند به‌طور کامل از مرکز توزیع برای دسترسی و استفاده مشتریان فرستاده می‌شوند.

دسته محدودیت (۲۹) بیان می‌کنند که مقدار محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری و بازیابی به مرکز توزیع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند همواره با مقدار محصولات تعمیر شده‌ای که از مرکز توزیع برای مشتریان ارسال می‌شوند برابر هستند؛ یعنی تمامی محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری وارد مراکز توزیع می‌شوند به‌طور کامل تحت عنوان محصولات تعمیری برای استفاده مجدد مشتریان ارسال می‌گردند.

دسته محدودیت (۳۰) بیان می‌کنند که مجموع مقدار محصولاتی که از مرکز توزیع برای استفاده مشتریان ارسال می‌گردند (مجموع محصولات و محصولات تعمیر شده) با

تقاضای مشتریان برای آن محصولات برابر است. به بیان دیگر یعنی تمام تقاضای مشتریان توسط مرکز توزیع برآورده می‌شود.

دسته محدودیت (۳۱) نیز تضمین می‌کنند که درصد خاصی از مقدار محصولاتی که از مشتریان به مرکز جمع‌آوری و تعمیر با حالت حمل خاص حمل می‌شوند برابر است با مقدار محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری به مرکز توزیع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند. در واقع یعنی درصد خاصی از محصولات در مرکز جمع‌آوری به مرکز توزیع جهت استفاده مجدد به عنوان محصول تعمیری حمل می‌شوند.

دسته محدودیت (۳۲) بیان می‌کنند که برای هر مشتری فقط یک حالت تقاضا می‌تواند انتخاب شود. دسته محدودیت (۳۳) نشان می‌دهند که مقدار محصولاتی که از مشتریان بنا بر هر دلیلی برگشت داده می‌شود و به مرکز جمع‌آوری و تعمیر با حالت حمل خاص حمل می‌شوند، همواره کوچک‌تر و یا مساوی ظرفیت مرکز جمع‌آوری و تعمیر می‌باشد. در واقع به این معنی است که مرکز جمع‌آوری و تعمیر توانایی و ظرفیت این را دارد تا تمامی محصولات برگشتی از سوی مشتریان را بررسی نماید.

دسته محدودیت (۳۴) تضمین می‌کنند که مقدار محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری و تعمیر به مرکز دفع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند همواره کوچک‌تر و یا مساوی ظرفیت مرکز دفع باشد. در واقع یعنی مرکز دفع توانایی و ظرفیت از بین بردن تمامی محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری و بازیابی دریافت می‌کند را دارد.

دسته محدودیت (۳۵) بیان می‌کنند که درصد خاصی از مقدار محصولاتی که از مشتریان به مرکز جمع‌آوری و تعمیر با حالت حمل خاص حمل می‌شوند برابر است با مقدار محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری به مرکز توزیع (محصول تعمیری) با حالت حمل خاص حمل می‌شوند؛ یعنی درصد خاصی از محصولات موجود در مرکز جمع‌آوری قابل تعمیر و استفاده مجدد بوده و به مرکز توزیع فرستاده می‌شوند.

دسته محدودیت (۳۶) نشان می‌دهند که درصد خاصی از مقدار محصولاتی که از مشتریان به مرکز جمع‌آوری و تعمیر با حالت حمل خاص حمل می‌شوند برابر است با

مقدار محصولاتی که از مرکز جمع‌آوری به مرکز دفع با حالت حمل خاص حمل می‌شوند. این بدان معنی است که درصد خاصی از محصولات موجود در مرکز جمع‌آوری بدون کاربرد بوده و قابلیت استفاده به منظور محصول تعمیراتی را ندارند و باید با روش‌های موجود منهدم گردد. دسته محدودیت‌های (۳۷) و (۳۸) نشان‌دهنده‌ی علامت محدودیت برای متغیرها هستند.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل فوق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح چند هدفه در محیط فازی است، برای تبدیل مدل در حالت عدم قطعیت به مدل قطعی مراحل مختلفی باید صورت گیرد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد. پس از آن مدل قطعی به دست آمده با روش‌های بهینه‌سازی چند هدفی دقیق برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط قابل حل می‌باشد. شایان ذکر است برای حل مسئله در ابعاد بالا می‌توان از روش‌های فراابتکاری و یا برخی از روش‌های دقیق مانند تجزیه بندرز و یا روش آزادسازی لاگرانژ استفاده کرد.

حل مدل ریاضی

در این مقاله به منظور حل مدل ریاضی پیشنهادی بخش قبل، یک روش دوفازی ارائه می‌شود. در فاز اول با استفاده از فرمول‌های امید ریاضی و اندازه اعتبار شهودی بیان شده در بخش سوم، توابع هدف و محدودیت‌ها را به شکل قطعی تبدیل می‌کنیم و در فاز دوم با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی جواب کارایی برای مسئله چند هدفه به دست می‌آوریم.

فاز ۱: مدل چند هدفه قطعی

در مدل ریاضی چند هدفه (۲۳) - (۳۸)، توابع هدف (۲۳) - (۲۵) توابع هدفی از نوع فازی شهودی هستند. روش‌های مختلفی برای قطعی کردن این توابع هدف وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از امید ریاضی یا مقدار مورد انتظار است (پیشوایی و همکاران ۲۰۱۲). با توجه به ویژگی خطی امید ریاضی و با استفاده از تعریف (۱۱) می‌توان هر کدام از توابع

هدف را به شکل قطعی تبدیل کرد. برای قطع کردن محدودیت‌های مدل ریاضی از اندازه اعتبار شهودی استفاده می‌کنیم؛ بنابراین با استفاده از امید ریاضی برای توابع هدف، تابع هدف (۲۳) - (۲۵) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} \max E[Z_1] = & \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S \sum_{g=1}^G E[\tilde{p}r_{sg} \tilde{d}_{lsg}] R_{lsg} - \sum_{j=1}^J E[f_j^{(1)}] U_j - \sum_{k=1}^K E[f_k^{(2)}] W_k \\ & - \sum_{i=1}^I E[f_i^{(3)}] V_i - \sum_{n=1}^N E[f_n^{(4)}] Z_n - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (E[\tilde{c}_{sj}^{(6)}] + E[\tilde{c}_{sjkp}^{(1)}]) X_{sjkp}^{(1)} \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P (E[\tilde{c}_{sk}^{(7)}] + E[\tilde{c}_{sklp}^{(2)}]) X_{sklp}^{(2)} - \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P E[\tilde{c}_{slip}^{(3)}] X_{slip}^{(3)} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (E[\tilde{c}_{si}^{(8)}] + E[\tilde{c}_{sikp}^{(4)}]) X_{sikp}^{(4)} \\ & - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P (E[\tilde{c}_{sn}^{(9)}] + E[\tilde{c}_{sinp}^{(5)}]) X_{sinp}^{(5)} \\ \min E[Z_2] = & \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (E[\tilde{m}_{sjkp}^{(1)}] + E[\tilde{m}_{sj}^{(2)}]) X_{sjkp}^{(1)} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P E[\tilde{m}_{sklp}^{(3)}] X_{sklp}^{(2)} + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (E[\tilde{m}_{sikp}^{(5)}] + E[\tilde{m}_{si}^{(6)}]) X_{sikp}^{(4)} \\ & + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P (E[\tilde{m}_{sinp}^{(7)}] + E[\tilde{m}_{sn}^{(8)}]) X_{sinp}^{(5)} + \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P E[\tilde{m}_{slip}^{(4)}] X_{slip}^{(3)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \max E[Z_3] = & \varepsilon \left(\sum_{j=1}^J E[E_j^{(1)}] U_j + \sum_{k=1}^K E[E_k^{(2)}] W_k + \sum_{i=1}^I E[E_i^{(3)}] V_i + \right. \\ & \left. + \sum_n E[E_n^{(4)}] Z_n \right) \end{aligned} \quad (41)$$

با در نظر گرفتن تعریف (۱۱)، تابع هدف (۳۹) - (۴۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \max Z_1 = & \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S \sum_{g=1}^G \left(\frac{pr_{lsg,1} d_{lsg,1} + 2pr_{lsg,2} d_{lsg,2} + 2pr_{lsg,3} d_{lsg,3} + pr_{lsg,4} d_{lsg,4} + pr_{lsg,5} d_{lsg,5} + pr_{lsg,6} d_{lsg,6}}{8} \right) R_{lsg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{j=1}^J \left(\frac{f_{j,1}^{(1)} + 2f_{j,2}^{(1)} + 2f_{j,3}^{(1)} + f_{j,4}^{(1)} + f_{j,5}^{(1)} + f_{j,6}^{(1)}}{8} \right) U_j \\
 & - \sum_{k=1}^K \left(\frac{f_{k,1}^{(2)} + 2f_{k,2}^{(2)} + 2f_{k,3}^{(2)} + f_{k,4}^{(2)} + f_{k,5}^{(2)} + f_{k,6}^{(2)}}{8} \right) W_k \\
 & - \sum_{i=1}^I \left(\frac{f_{i,1}^{(3)} + 2f_{i,2}^{(3)} + 2f_{i,3}^{(3)} + f_{i,4}^{(3)} + f_{i,5}^{(3)} + f_{i,6}^{(3)}}{8} \right) V_i \\
 & - \sum_{n=1}^N \left(\frac{f_{n,1}^{(4)} + 2f_{n,2}^{(4)} + 2f_{n,3}^{(4)} + f_{n,4}^{(4)} + f_{n,5}^{(4)} + f_{n,6}^{(4)}}{8} \right) Z_n \\
 & - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \left(\frac{c_{sjkp,1}^{(6)} + 2c_{sjkp,2}^{(6)} + 2c_{sjkp,3}^{(6)} + c_{sjkp,4}^{(6)} + c_{sjkp,5}^{(6)} + c_{sjkp,6}^{(6)}}{8} \right) + \\
 & \left(\frac{c_{sjkp,1}^{(1)} + 2c_{sjkp,2}^{(1)} + 2c_{sjkp,3}^{(1)} + c_{sjkp,4}^{(1)} + c_{sjkp,5}^{(1)} + c_{sjkp,6}^{(1)}}{8} \right) X_{sjkp}^{(1)} \\
 & - \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \left(\frac{c_{sklp,1}^{(7)} + 2c_{sklp,2}^{(7)} + 2c_{sklp,3}^{(7)} + c_{sklp,4}^{(7)} + c_{sklp,5}^{(7)} + c_{sklp,6}^{(7)}}{8} \right) + \\
 & \left(\frac{c_{sklp,1}^{(2)} + 2c_{sklp,2}^{(2)} + 2c_{sklp,3}^{(2)} + c_{sklp,4}^{(2)} + c_{sklp,5}^{(2)} + c_{sklp,6}^{(2)}}{8} \right) X_{sklp}^{(2)} \\
 & - \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \left(\frac{c_{slip,1}^{(3)} + 2c_{slip,2}^{(3)} + 2c_{slip,3}^{(3)} + c_{slip,4}^{(3)} + c_{slip,5}^{(3)} + c_{slip,6}^{(3)}}{8} \right) X_{slip}^{(3)} \\
 & - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \left(\frac{c_{sikp,1}^{(8)} + 2c_{sikp,2}^{(8)} + 2c_{sikp,3}^{(8)} + c_{sikp,4}^{(8)} + c_{sikp,5}^{(8)} + c_{sikp,6}^{(8)}}{8} \right) + \\
 & \left(\frac{c_{sikp,1}^{(4)} + 2c_{sikp,2}^{(4)} + 2c_{sikp,3}^{(4)} + c_{sikp,4}^{(4)} + c_{sikp,5}^{(4)} + c_{sikp,6}^{(4)}}{8} \right) X_{sikp}^{(4)} \\
 & - \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \left(\frac{c_{sin p,1}^{(9)} + 2c_{sin p,2}^{(9)} + 2c_{sin p,3}^{(9)} + c_{sin p,4}^{(9)} + c_{sin p,5}^{(9)} + c_{sin p,6}^{(9)}}{8} \right) + \\
 & \left(\frac{c_{sin p,1}^{(5)} + 2c_{sin p,2}^{(5)} + 2c_{sin p,3}^{(5)} + c_{sin p,4}^{(5)} + c_{sin p,5}^{(5)} + c_{sin p,6}^{(5)}}{8} \right) X_{sin p}^{(5)}
 \end{aligned} \tag{۴۲}$$

$\min Z_2 =$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \left(\frac{m_{sjkp,1}^{(1)} + m_{sjkp,1}^{(2)} + 2m_{sjkp,2}^{(1)} + 2m_{sjkp,2}^{(2)} + 2m_{sjkp,3}^{(1)} + 2m_{sjkp,3}^{(2)} + m_{sjkp,4}^{(1)} + m_{sjkp,4}^{(2)} + m_{sjkp,5}^{(1)} + m_{sjkp,5}^{(2)} + m_{sjkp,6}^{(1)} + m_{sjkp,6}^{(2)}}{8} \right) X_{sjkp}^{(1)}$$

$$+ \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \left(\frac{m_{sklp,1}^{(3)} + 2m_{sklp,2}^{(3)} + 2m_{sklp,3}^{(3)} + m_{sklp,4}^{(3)} + m_{sklp,5}^{(3)} + m_{sklp,6}^{(3)}}{8} \right) X_{sklp}^{(2)} + \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \left(\frac{m_{slip,1}^{(4)} + 2m_{slip,2}^{(4)} + 2m_{slip,3}^{(4)} + m_{slip,4}^{(4)} + m_{slip,5}^{(4)} + m_{slip,6}^{(4)}}{8} \right) X_{slip}^{(3)}$$

$$+ \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \left(\frac{m_1^{(5)} + m_1^{(6)} + 2m_2^{(5)} + 2m_2^{(6)} + 2m_3^{(5)} + 2m_3^{(6)} + m_4^{(5)} + m_4^{(6)} + m_5^{(5)} + m_5^{(6)} + m_6^{(5)} + m_6^{(6)}}{8} \right) X_{sikp}^{(4)}$$

$$+ \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \left(\frac{m_{sinp,1}^{(7)} + m_{sn,1}^{(8)} + 2m_{sinp,2}^{(7)} + 2m_{sn,2}^{(8)} + 2m_{sinp,3}^{(7)} + 2m_{sn,3}^{(8)} + m_{sinp,4}^{(7)} + m_{sn,4}^{(8)} + m_{sinp,5}^{(7)} + m_{sn,5}^{(8)} + m_{sinp,6}^{(7)} + m_{sn,6}^{(8)}}{8} \right) X_{sinp}^{(5)}$$

$$\max Z_3 = \varepsilon \left(\sum_{j=1}^J \left(\frac{E_{j,1}^{(1)} + 2E_{j,2}^{(1)} + 2E_{j,3}^{(1)} + E_{j,4}^{(1)} + E_{j,5}^{(1)} + E_{j,6}^{(1)}}{8} \right) U_j + \sum_{k=1}^K \left(\frac{E_{k,1}^{(2)} + 2E_{k,2}^{(2)} + 2E_{k,3}^{(2)} + E_{k,4}^{(2)} + E_{k,5}^{(2)} + E_{k,6}^{(2)}}{8} \right) W_k \right) \quad (44)$$

$$+ \varepsilon \left(\sum_{i=1}^I \left(\frac{E_{i,1}^{(3)} + 2E_{i,2}^{(3)} + 2E_{i,3}^{(3)} + E_{i,4}^{(3)} + E_{i,5}^{(3)} + E_{i,6}^{(3)}}{8} \right) V_i + \sum_{n=1}^N \left(\frac{E_{n,1}^{(4)} + 2E_{n,2}^{(4)} + 2E_{n,3}^{(4)} + E_{n,4}^{(4)} + E_{n,5}^{(4)} + E_{n,6}^{(4)}}{8} \right) Z_n \right)$$

با در نظر گرفتن اندازه اعتبار شهودی برای محدودیت‌ها، محدودیت‌های (۲۶) - (۳۸) به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$Cr_{\mu} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} \leq \tilde{c} p_{js} U_j \right\} \geq \lambda_{js} \quad \forall j, s$$

$$Cr_{\nu} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} \leq \tilde{c} p_{js} U_j \right\} \leq \gamma_{js} \quad \forall j, s \quad (45)$$

$$Cr_{\mu} \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sikp}^{(4)} \leq \tilde{c}d_{ks} W_k \right\} \geq \beta_{ks} \quad \forall k, s \quad (46)$$

$$Cr_{\nu} \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sikp}^{(4)} \leq \tilde{c}d_{ks} W_k \right\} \leq \sigma_{ks} \quad \forall k, s$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sklp}^{(2)} + \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sklp}^{(2)} = \sum_{g=1}^G \tilde{d}_{lsg} R_{lsg} \quad \forall l, s \quad (47)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} = \rho \sum_{g=1}^G \tilde{d}_{lsg} R_{lsg} \quad \forall l, s \quad (48)$$

$$Cr_{\mu} \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} \leq \tilde{c}f_{is} V_i \right\} \geq \theta_{si} \quad \forall s, i \quad (49)$$

$$Cr_{\nu} \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} \leq \tilde{c}f_{is} V_i \right\} \leq \omega_{si} \quad \forall s, i$$

$$Cr_{\mu} \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sinp}^{(5)} \leq \tilde{c}h_{ns} Z_n \right\} \geq \mu_{ns} \quad \forall s, n \quad (50)$$

$$Cr_{\nu} \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sinp}^{(5)} \leq \tilde{c}h_{ns} Z_n \right\} \leq \phi_{ns} \quad \forall s, n$$

$$(28), (29), (32), (35), (36), (37), (38) \quad (51)$$

طبق اندازه اعتبار شهودی بیان شده در بخش ۳ و با فرض اینکه $\lambda_{js}, \beta_{ks}, \theta_{si}, \mu_{ns} > 0.5$

محدودیت‌های (۴۵) - (۵۱) به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} \leq U_j \left((2 - 2\lambda_{js})cp_{js2} + (2\lambda_{js} - 1)cp_{js1} \right) \quad \forall j, s \quad (52)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} \leq U_j \left(2\gamma_{js}cp_{js2} + (1 - 2\gamma_{js})cp_{js5} \right) \quad \forall j, s \quad (53)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sikp}^{(4)} \leq W_k \left((2 - 2\beta_{ks})cd_{ks2} + (2\beta_{ks} - 1)cd_{ks1} \right) \quad \forall k, s \quad (54)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{sjkp}^{(1)} + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sikp}^{(4)} \leq W_k \left(2\sigma_{ks}cd_{ks2} + (1 - 2\sigma_{ks})cd_{ks5} \right) \quad \forall k, s \quad (55)$$

$$\sum_{g=1}^G d_{ls g 2} R_{ls g} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X_{sklp}^{(2)} + \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P X X_{sklp}^{(2)} \leq \sum_{g=1}^G d_{ls g 3} R_{ls g} \quad \forall l, s \quad (56)$$

$$\rho \sum_{g=1}^G d_{ls g}^2 R_{ls g} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} \leq \rho \sum_{g=1}^G d_{ls g}^3 R_{ls g} \quad \forall l, s \quad (57)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} \leq V_i ((2 - 2\theta_{is})cf_{is2} + (2\theta_{is} - 1)cf_{is1}) \quad \forall s, i \quad (58)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P X_{slip}^{(3)} \leq V_i (2\omega_{is}cf_{is2} + (1 - 2\omega_{is})cf_{is5}) \quad \forall s, i \quad (59)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sinp}^{(5)} \leq Z_n ((2 - 2\mu_{ns})ch_{ns2} + (2\mu_{ns} - 1)ch_{ns1}) \quad \forall s, n \quad (60)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{sinp}^{(5)} \leq Z_n (2\phi_{ns}ch_{ns2} + (1 - 2\phi_{ns})ch_{ns5}) \quad \forall s, n \quad (61)$$

$$(28), (29), (32), (35), (36), (37), (38) \quad (62)$$

در حالت‌های دیگر که $\lambda_{js}, \beta_{ks}, \theta_{si}, \mu_{ns} < 0.5$ و $\gamma_{js}, \sigma_{ks}, \omega_{si}, \phi_{ns} > 0.5$ یا $\lambda_{js}, \beta_{ks}, \theta_{si}, \mu_{ns} < 0.5$ و $\gamma_{js}, \sigma_{ks}, \omega_{si}, \phi_{ns} < 0.5$ فرمول‌ها و روابط مشابهی به دست می‌آیند که به دلیل تشابه با حالت بیان‌شده، از آوردن آن خودداری شده است.

فاز ۲: روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی

به منظور حل مسئله چندهدفه (۴۸) - (۶۲) روش‌های حل مختلفی مانند روش معیار جامع، روش وزن‌دار، روش برنامه‌ریزی آرمانی، روش ϵ -محدودیت، برنامه‌ریزی فازی و غیره در ادبیات مسئله چندهدفه پیشنهاد شده است (Steuer 1986). در این بخش روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی را برای حل مسئله چندهدفه بکار می‌گیریم. تصمیم‌گیری فازی و برنامه‌ریزی فازی دو روشی هستند که به ترتیب توسط بلمن و زاده (۱۹۷۰) و Zimmermann (1978) به منظور حل مسئله چندهدفه پیشنهاد شده است. هر دو روش تمایل به دست آوردن جواب ایدئال مثبت (PIS) و جواب ایدئال منفی (NIS) همه توابع هدف متناظر دارند. این مقادیر می‌توانند هم توسط تصمیم‌گیرنده تعیین شوند و هم اینکه

از بهترین و بدترین مقادیر توابع هدف متناظرشان به دست آیند. گام‌های حل مسئله چند هدفه با روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی عبارت است از:

گام ۱. مینیمم سطح اطمینان یعنی

$$\text{تعیین کنید.} \quad (0 \leq \lambda_{js} + \gamma_{js} \leq 1, 0 \leq \beta_{ks} + \sigma_{ks} \leq 1, 0 \leq \theta_{si} + \omega_{si} \leq 1, 0 \leq \mu_{ns} + \phi_{ns} \leq 1)$$

گام ۲. جواب ایدئال مثبت (PIS) و جواب ایدئال منفی (NIS) برای توابع هدف (۴۲) تا (۴۴) را طبق روابط زیر به دست آورید.

$$\begin{cases} F_1^{PIS} = \max Z_1 \\ \text{subject to} \\ \text{Constraints (51)-(61)}. \end{cases} \quad (63)$$

$$\begin{cases} F_1^{NIS} = \min Z_1 \\ \text{subject to} \\ \text{Constraints (51)-(61)}. \end{cases} \quad (64)$$

$$\begin{cases} F_2^{PIS} = \min Z_2 \\ \text{subject to} \\ \text{Constraints (51)-(61)}. \end{cases} \quad (65)$$

$$\begin{cases} F_2^{NIS} = \max Z_2 \\ \text{subject to} \\ \text{Constraints (51)-(61)}. \end{cases} \quad (66)$$

$$\begin{cases} F_3^{PIS} = \max Z_3 \\ \text{subject to} \\ \text{Constraints (51)-(61)}. \end{cases} \quad (67)$$

$$\begin{cases} F_3^{NIS} = \min Z_3 \\ \text{subject to} \\ \text{Constraints (51)-(61)}. \end{cases} \quad (68)$$

گام ۳. تابع عضویت خطی متناظر با هر تابع هدف را به شکل توابع عضویت خطی (۶۹) و (۷۰) بنویسید.

$$\mu_i(F_i) = \begin{cases} 0, & F_i < F_i^{NIS} \\ \frac{F_i - F_i^{NIS}}{F_i^{PIS} - F_i^{NIS}}, & F_i^{NIS} \leq F_i \leq F_i^{PIS} \\ 1, & F_i > F_i^{PIS} \end{cases} \quad i=1,3 \quad (69)$$

$$\mu_2(F_2) = \begin{cases} 0, & F_2 < F_2^{PIS} \\ \frac{F_2^{NIS} - F_2}{F_2^{NIS} - F_2^{PIS}}, & F_2^{PIS} \leq F_2 \leq F_2^{NIS} \\ 1, & F_2 > F_2^{NIS} \end{cases} \quad (70)$$

در معادلات (۶۹) و (۷۰)، $\mu_i(F_i)$ تابع عضویت خطی i امین تابع هدف را نشان می‌دهد.

گام ۴. با استفاده از روش پیشنهادی ترابی و هسینی (۲۰۰۸)، علوی دوست و همکاران (۲۰۱۶) و سلیم و اوزهارکان (۲۰۰۸) مدل چند هدفه (۴۲) - (۴۴) و (۵۲) - (۶۲) را به یک مدل تک هدفه (۷۱) - (۷۳) تبدیل کنید.
روش پیشنهادی ترابی و هسینی (TH):

$$\max w = \gamma \lambda + (1 - \gamma) \sum_{h=1}^3 \theta_h \mu_h(x)$$

Subject to

$$\lambda \leq \mu_h(x) \quad h=1, 2, 3, \quad (71)$$

Constraints (52)-(62).
 $\lambda, \gamma \in [0, 1]$

روش پیشنهادی علوی دوست و همکاران (ABS):

$$\max w = \lambda + \delta \sum_{h=1}^3 \theta_h \lambda_h$$

Subject to

$$\theta_h \lambda + \lambda_h \leq \mu_h(x) \quad h=1, 2, 3, \quad (72)$$

Constraints (52)-(62).

$$\lambda \in [0,1]$$

روش پیشنهادی (SO) Selim and Ozkarahan (2008):

$$\max w = \gamma\lambda + (1-\gamma)\sum_{h=1}^3 \theta_h \lambda_h$$

Subject to

$$\lambda + \lambda_h \leq \mu_h(x) \quad h = 1, 2, 3, \quad (73)$$

Constraints (52)-(62).

$$\lambda \in [0,1]$$

در (۷۱) - (۷۳)، λ مینیمم درجه رضایت توابع هدف را نشان می‌دهد، یعنی $\lambda = \min_h \{\mu_h(x)\}$ و θ_h نشان‌دهنده اهمیت تابع هدف h ام که $\sum_{h=1}^3 \theta_h = 1$ ، $\delta = 0.01$ و γ ضریب تعادل است.

گام ۵. اهمیت اهداف فازی یعنی (θ_h) و ضریب تعادل یعنی γ را تعیین کنید و مسئله تک هدفه (۷۱) - (۷۳) را حل کنید. اگر تصمیم‌گیرنده نسبت به جواب کارای به دست آمده رضایت داشت، توقف کنید و جواب به دست آمده را به عنوان جواب کارا برای مسئله چند هدفه معرفی کنید و در غیر این صورت به گام ۱ رفته و سطح اعتبار را تغییر داده و مجدداً مسئله را حل کنید.

نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت

طراحی آزمایش‌ها

به منظور تحلیل و بررسی مدل پیشنهادی و روش حل آن، در این مقاله سه اندازه مسئله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. مشخصات مسئله آزمایشی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. ابعاد مسئله آزمایشی.

شماره مسئله آزمایشی	تعداد مراکز تولید پتانسیل	تعداد مراکز توزیع پتانسیل	تعداد مشتری	تعداد حالت تقاضا	تعداد محصولات	تعداد حالت حمل	تعداد مراکز جمع آوری و بازیابی پتانسیل	تعداد مراکز دفع پتانسیل
۱	۴	۵	۷	۲	۲	۲	۳	۲
۲	۸	۱۰	۱۴	۲	۲	۲	۶	۴
۳	۲۰	۲۵	۳۵	۳	۳	۳	۱۵	۱۰

فرض شده همه پارامترهای موردنیاز برای مسئله آزمایشی یک عدد فازی شهودی دوزنقه‌ای باشند. مدل به همراه روش حل پیشنهادی در نرم‌افزار گمز کد شده است و روی کامپیوتری با مشخصات core i7 و رم ۸ گیگابایتی اجرا شده است. برای هر مسئله سطح اطمینان مختلفی در نظر گرفته شده است. در همه این مسائل فرض شده است که $\alpha = 0.3, \rho = 0.4, \varepsilon = 0.7$. نتایج به دست آمده برای جواب ایدئال مثبت (PIS) و جواب ایدئال منفی (NIS) (گام ۲ از روش حل) برای سطوح اطمینان مختلف در جدول ۲ آمده است. قابل ذکر است که ضریب تعادل یعنی γ در همه روش‌ها برابر ۰٫۴ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. جواب‌های ایدئال مثبت و منفی مسائل آزمایشی.

شماره مسئله	سطح اطمینان عضویت	سطح اطمینان عدم عضویت	OF_1^{PIS}	OF_1^{NIS}	OF_2^{PIS}	OF_2^{NIS}	OF_3^{PIS}	OF_3^{NIS}
۱	۰٫۶	۰٫۲	۸۷۸۵۱۳/۰۸	۴۷۷۸۱۹/۳۶	۴۸۹۰۹۷	۸۴۰۸۱۵/۹۷	۲۲۳۷/۹۹	۵۷۱/۷۲
۲	۰٫۵۵	۰٫۴	۱۷۸۲۰۳۵/۴۷	۱۰۱۱۱۱۳/۴۹	۹۱۷۶۱۶	۱۶۷۰۰۵۱/۴۸	۴۴۵۱/۱۲	۵۶۹/۸
۳	۰٫۹	۰٫۱	۶۶۹۱۷۳۵/۴۷	۳۵۹۴۵۴۹/۲۹	۳۶۱۲۱۸۵/۶	۶۴۸۴۷۵۴/۷۲	۱۱۱۹۳/۸۷	۹۴۰

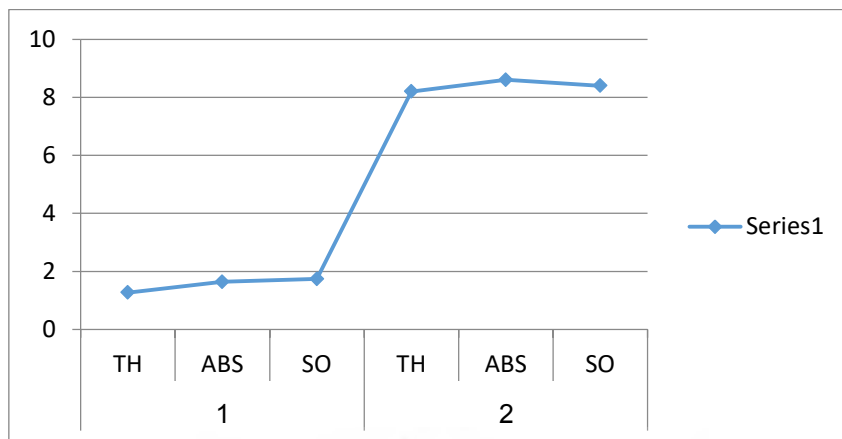
نتایج نهایی (جواب‌های کارا شامل مقادیر تابع هدف و زمان اجرا) برای همه مسائل آزمایشی در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳. جواب پاراتو به دست آمده برای مسئله آزمایشی.

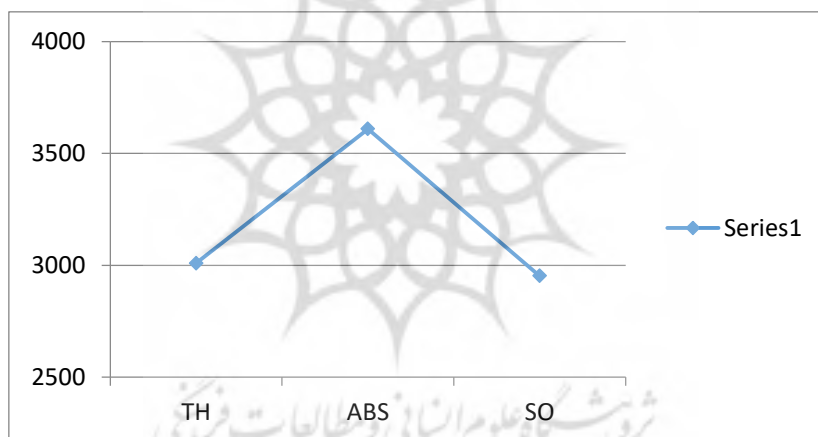
شماره مسئله	نوع روش	سطح اطمینان عضویت	سطح اطمینان عدم عضویت	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	تابع هدف سوم	زمان اجرا (ثانیه)
۱	TH	۰/۶	۰/۲	۷۸۵۷۹۹/۹۷	۵۱۳۹۷۷/۵۴	۲۲۳۷/۹۹	۱/۲۷
	ABS	۰/۶	۰/۲	۸۰۵۶۴۳/۶۶	۴۹۶۵۵۹/۲۴	۲۲۳۷/۹۹	۱/۶۴
	SO	۰/۶	۰/۲	۸۰۴۲۰۰/۴۸	۴۹۲۱۶۹/۹۹	۲۲۳۷/۹۹	۱/۷۴
۲	TH	۰/۵۵	۰/۴	۱۵۹۰۸۲۹/۵	۱۰۳۸۷۱۱/۵	۴۴۵۱/۱۲	۸/۲
	ABS	۰/۵۵	۰/۴	۱۶۲۹۸۰۵/۰۸	۱۰۰۵۱۹۳/۷	۴۴۵۱/۱۲	۸/۶
	SO	۰/۵۵	۰/۴	۱۶۲۰۴۱۵/۸۶	۹۹۳۱۴۸/۰۶	۴۴۵۱/۱۲	۸/۴
۳	TH	۰/۹	۰/۱	۵۹۸۴۴۲۴/۷۶	۳۸۵۰۰۰۹/۸۳	۱۱۱۹۳/۸۷	۳۰۰۹/۱
	ABS	۰/۹	۰/۱	۵۹۴۸۱۲۵/۱۹	۳۹۸۶۱۱۱/۸	۱۱۱۹۳/۸۷	۳۶۰۹/۵
	SO	۰/۹	۰/۱	۶۰۹۵۱۵۸	۳۶۷۳۱۹۴/۹۹	۱۱۱۹۳/۸۷	۲۹۵۲/۸

با توجه به مسائل آزمایشی و سطوح اطمینان در نظر گرفته شده، جدول ۳ نشان دهنده عملکرد روش های حل مورد استفاده می باشد. در مورد مسئله آزمایشی ۱، در تابع هدف اول روش های ABS، SO و TH به ترتیب دارای بهترین عملکرد بوده اند در حالی که در مورد تابع هدف دوم این ترتیب به SO، ABS و TH تغییر کرده و در نهایت در تابع هدف سوم هر سه روش عملکرد یکسانی دارند. عملکرد روش های حل ذکر شده در مسئله آزمایشی ۲ دقیقاً مشابه مسئله آزمایشی ۱ می باشد. در مورد مسئله آزمایشی ۳، در تابع هدف اول روش های SO، TH و ABS به ترتیب دارای بهترین عملکرد بوده اند در حالی که در مورد تابع هدف دوم نیز ترتیب به صورت مشابه بوده است و در نهایت در تابع هدف سوم هر سه روش عملکرد یکسانی دارند. این نتایج نشان دهنده برتری نسبی روش حل SO نسبت به دیگر روش های مورد استفاده می باشد.

شکل ۳. زمان اجرا مسائل آزمایشی ۱ و ۲.



شکل ۴. زمان اجرا مسئله آزمایشی ۳.



در مورد زمان اجرای روش‌های حل، به طوری که از جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد، در مسائل آزمایشی ۱ و ۲ روش‌های حل دارای زمان اجرای تقریباً برابر بوده در حالی که بهترین عملکرد در مسئله آزمایشی ۳ به ترتیب مربوط به روش‌های TH، ABS و SO می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده برتری نسبی روش حل SO نسبت به دیگر روش‌های مورد استفاده از منظر زمان اجرا می‌باشد. شایان ذکر است که زمان اجرای هر روش به تنهایی با در نظر گرفتن همه مسائل آزمایشی، با افزایش ابعاد مسئله به طور چشمگیری افزایش می‌-

یابد. شکل (۳) و (۴) زمان اجرای مسائل آزمایشی را با هر یک از سه روش بیان شده نشان می دهند.

تحلیل حساسیت

در این بخش تحلیل حساسیت را در حالت‌های جدول ۴ برای مسئله آزمایشی ۱ مورد بررسی قرار می دهیم. از آنجایی که پارامتر تقاضا در مسائل زنجیره تأمین نقش اساسی دارد، لذا روند تغییرات توابع هدف مدل ارائه شده با افزایش تقاضای مشتریان، میزان انتشار گاز کربن دی اکسید و تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز تولید، بررسی شده است. نتایج این بررسی در جدول ۵ نشان داده شده است. درصد تغییرات هر تابع هدف در هر سناریو نسبت به همان تابع هدف در سناریوی اصلی ۱ نیز در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نمایش داده شده است.

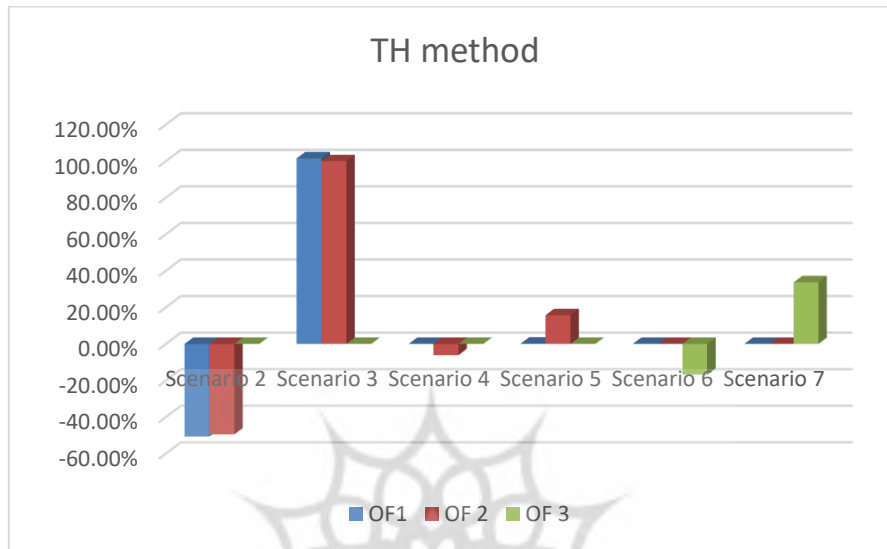
جدول ۴. توضیحات سناریو تعریف شده برای مسئله آزمایشی.

شماره سناریو	توضیحات
سناریو ۱	همه پارامترها همان داده‌های فازی شهودی مثال عددی بخش ۶-۱ هستند.
سناریو ۲	همه پارامترها همان داده‌های سناریو ۱ به جز تقاضای مشتری برای محصول در عدد ۰/۵ ضرب شده است.
سناریو ۳	همه پارامترها همان داده‌های سناریو ۱ به جز تقاضای مشتری برای محصول در عدد ۲ ضرب شده است.
سناریو ۴	همه پارامترها همان داده‌های سناریو ۱ به جز میزان انتشار گاز CO ₂ برای هر واحد محصول از مرکز تولید به مرکز توزیع در عدد ۰/۵ ضرب شده است.
سناریو ۵	همه پارامترها همان داده‌های سناریو ۱ به جز میزان انتشار گاز CO ₂ برای هر واحد محصول از مرکز تولید به مرکز توزیع در عدد ۲ ضرب شده است.
سناریو ۶	همه پارامترها همان داده‌های سناریو ۱ به جز تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز تولید در عدد ۰/۵ ضرب شده است.
سناریو ۷	همه پارامترها همان داده‌های سناریو ۱ به جز تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مرکز تولید در عدد ۲ ضرب شده است.

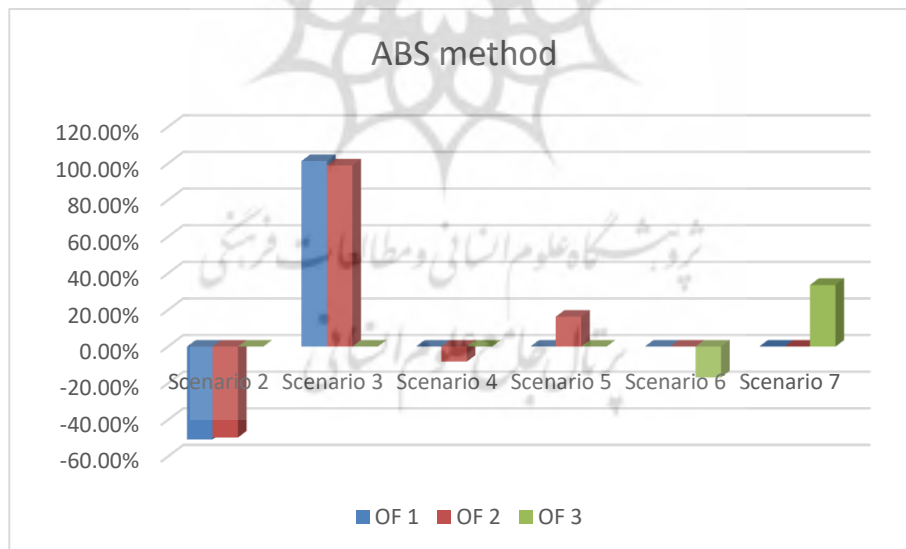
جدول ۵. نتایج به دست آمده از سناریوهای مختلف برای مسئله آزمایشی ۱.

شماره سناریو	نوع روش	سطح اطمینان عضویت	سطح اطمینان عدم عضویت	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	تابع هدف سوم
۱	TH	۰/۶	۰/۲	۷۸۵۷۹۹/۹۷	۵۱۳۹۷۷/۵۴	۲۲۳۷/۹۹
	ABS	۰/۶	۰/۲	۸۰۵۶۴۳/۶۶	۴۹۶۵۵۹/۲۴	۲۲۳۷/۹۹
	SO	۰/۶	۰/۲	۸۰۴۲۰۰/۴۸	۴۹۲۱۶۹/۹۹	۲۲۳۷/۹۹
۲	TH	۰/۶	۰/۲	۳۸۷۶۰۳/۳۶	۲۵۹۶۴۴/۷۴	۲۲۳۷/۹۹
	ABS	۰/۶	۰/۲	۳۹۷۳۱۵/۹۱	۲۴۹۹۱۷/۳۱	۲۲۳۷/۹۹
	SO	۰/۶	۰/۲	۳۹۶۱۶۹/۶۷	۲۴۶۰۸۴/۹۹	۲۲۳۷/۹۹
۳	TH	۰/۶	۰/۲	۱۵۸۳۳۸۶/۴۵	۱۰۲۷۸۴۸	۲۲۳۷/۹۹
	ABS	۰/۶	۰/۲	۱۶۲۲۰۶۷/۶۵	۹۸۷۸۵۵/۰۷	۲۲۳۷/۹۹
	SO	۰/۶	۰/۲	۱۶۲۰۲۶۲/۰۸	۹۸۴۳۳۹/۹۸	۲۲۳۷/۹۹
۴	TH	۰/۶	۰/۲	۷۸۵۸۰۴/۳۶	۴۸۲۵۰۰/۷۷	۲۲۳۷/۹۹
	ABS	۰/۶	۰/۲	۸۰۵۶۲۲/۲۱	۴۵۵۸۱۵/۲۸	۲۲۳۷/۹۹
	SO	۰/۶	۰/۲	۸۰۴۱۴۰/۶۳	۴۵۱۸۱۱/۶۵	۲۲۳۷/۹۹
۵	TH	۰/۶	۰/۲	۷۸۷۰۰۸/۶	۵۹۴۸۲۷/۷۲	۲۲۳۷/۹۹
	ABS	۰/۶	۰/۲	۸۰۵۶۴۳/۶۵	۵۷۷۶۰۳/۸۲	۲۲۳۷/۹۹
	SO	۰/۶	۰/۲	۸۰۴۰۲۲	۵۷۲۴۲۶/۷	۲۲۳۷/۹۹
۶	TH	۰/۶	۰/۲	۷۸۵۷۹۹/۹۷	۵۱۳۹۷۷/۵۴	۱۸۶۱/۰۸
	ABS	۰/۶	۰/۲	۸۰۵۶۴۳/۶۵	۴۹۶۵۵۹/۲۶	۱۸۶۱/۰۸
	SO	۰/۶	۰/۲	۸۰۴۲۰۰/۴۸	۴۹۲۱۶۹/۹۹	۱۸۶۱/۰۸
۷	TH	۰/۶	۰/۲	۷۸۵۷۹۹/۹۷	۵۱۳۹۷۷/۵۴	۲۹۹۱/۸
	ABS	۰/۶	۰/۲	۸۰۵۶۴۳/۶۵	۴۹۶۵۵۹/۲۳	۲۹۹۱/۸
	SO	۰/۶	۰/۲	۸۰۴۲۰۰/۴۸	۴۹۲۱۶۹/۹۹	۲۹۹۱/۸

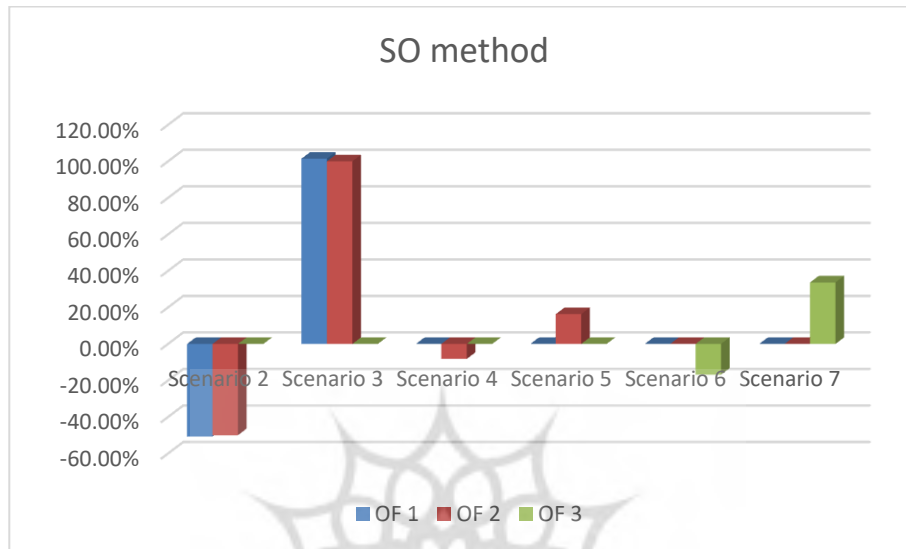
شکل ۵. درصد تغییرات توابع هدف در سناریوهای ۲ تا ۷ نسبت به سناریوی اصلی
۱ در روش TH.



شکل ۶. درصد تغییرات توابع هدف در سناریوهای ۲ تا ۷ نسبت به سناریوی اصلی ۱ در روش ABS.



شکل ۷. درصد تغییرات توابع هدف در سناریوهای ۲ تا ۷ نسبت به سناریوی اصلی ۱ در روش SO.



نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی فازی چند هدفه برای مسئله طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار ارائه شده است. با در نظر گرفتن مفهوم پایداری، اهداف حداکثر سازی با توجه به درآمد و هزینه‌های کل زنجیره تأمین، حداقل کردن اثرات زیست‌محیطی و حداکثر سازی اثرات اجتماعی در نظر گرفته شده‌اند. عدم قطعیت در پارامترها از نوع اعداد فازی دوزنقه‌ای شهودی پیشنهاد شده است. با استفاده از تعریف امید ریاضی و مفهوم محدودیت شانس بر پایه اندازه اعتبار شهودی، مدل بهینه‌سازی چند هدفه فازی به یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه قطعی تبدیل شد. به منظور حل مدل چند هدفه قطعی به دست آمده از روش برنامه‌ریزی ریاضی فازی تعاملی استفاده گردید. در نهایت با طرح سه مسئله آزمایشی کارایی مدل پیشنهادی و روش حل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. برخی از پیشنهادها آتی به منظور ادامه این مقاله به شرح زیر است:

- با توجه به اینکه مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته یک مسئله از نوع NP-hard است، پیشنهاد می‌شود از چندین الگوریتم فراابتکاری مناسب مسئله را حل کرد و نتایج حاصل را با روش حل استفاده‌شده در این پژوهش مقایسه کرد.
- در نظر گرفتن معیارهای دیگر زیست‌محیطی و همچنین شاخص‌های ارزیابی اجتماعی مانند رعایت حقوق کارکنان توسط تأمین‌کنندگان، ایمنی و بهداشت کارکنان و رعایت حقوق سهام‌داران توسط اجزاء زنجیره تأمین در تشکیل توابع هدف.
- در نظر گرفتن اعداد فازی نوع-۲ به جای اعداد فازی شهودی.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

ORCID

Ali Mahmoodirad



<http://orcid.org/0000-0002-0018-5389>

Ali Tahmasebi Notareki



<http://orcid.org/0000-0002-8507-1651>

Sadegh Niroomand



<http://orcid.org/0000-0001-8196-3906>

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

References

- Alavidoost, M. H., Babazadeh, H., Sayyari, S.T. (2016). An interactive fuzzy programming approach for bi-objective straight and U-shaped assembly line balancing problem. *Applied Soft Computing*, 40, 221–235.
- Atanassov, K.T. (1983). Intuitionistic fuzzy sets. Sofia, Bulgarian.
- Atanassov, K.T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20, 87–96.
- Bellman, R. E., Zadeh, L. A., (1970) Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, 17(4), 141–164.
- Chakraborty, D., Jana, D., Roy, T. (2014). A New Approach to Solve Intuitionistic Fuzzy Optimization Problem Using Possibility, Necessity, and Credibility Measures. *International Journal of Engineering Mathematics*, Volume 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/593185>.
- Chakraborty, D., Jana, D., Roy, T. (2016). Expected value of intuitionistic fuzzy number and its application to solve multi-objective multi-item solid transportation problem for damageable items in intuitionistic fuzzy environment. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30, 1109 – 1122.
- Dehghan, E., Shafiei-Nikabadi, M., Amiri, M., Jabbarzadeh, A., Hybrid robust, stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 123, 220 –231.
- Ebrahimi, S.B., Bagheri, E. (2022). A multi-objective formulation for the closed-loop plastic supply chain under uncertainty. *Operational Research*, 22, 4725– 4768.
- Fathollahi-Fard, A.M., Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations. *Applied Soft Computing*, 69, 232–249.
- Fasihi, Tavakkoli-Moghaddam, R., Najafi, S E., Hajiaghaei, M. (2021). Optimizing a bi-objective multi-period fish closed-loop supply chain network design by three multi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*. Doi: 10.24200/SCI.2021.57930.5477.
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J., Van Wassenhove, L. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10, 2, 156– 173.
- Ghayebloo, S., Jafar Tarokh, M. (2015). Developing a Bi-Objective Model of the Closed-Loop Supply Chain Network design. *Advances in Industrial Engineering*, 49 (1), 93-106 (In Persian).
- Hasanzadeh-Amin., S., Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 6, 4165-4176.

- Hasanzadeh-Amin., S., Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39, 8, 6782–6791.
- Jindal, A., Sangwan, K. S. (2017). Multi-objective fuzzy mathematical modelling of closed-loop supply chain considering economical and environmental factors. *Annals of Operations Research*, 257, 1-2, 95-120.
- Jouzani, J., Fathian, M., Makui, A., Heydari, M. (2018). Robust design and planning for a multi-mode multi-product supply network: a dairy industry case study. *Operational Research*, 20, 811–1840.
- Karampour, M. M., Hajiaghayi-Keshteli, M., Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G. (2022). Metaheuristics for a bi-objective green vendor managed inventory problem in a two-echelon supply chain network. *Scientia Iranica*, 29 (2), 816-837.
- Liu, W., Liu, W., Shen, N., Xu, Z., Xie, N., Chen, J., Zhou, H. (2022). Pricing and collection decisions of a closed-loop supply chain with fuzzy demand. *International Journal of Production Economics*, 245, 108409.
- Mamoodird, A. Niroomand, S. (2020). A belief degree-based uncertain scheme for a bi-objective two-stage green supply chain network design problem with direct shipment. *Soft Computing*, 24 (24), 18499–18519.
- Mahmoodirad, A., Niroomand, S., Shafiee, M. (2020). A closed loop supply chain network design problem with multi-mode demand satisfaction in fuzzy environment. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39, 503–524.
- Pishvaei, M. S. Torabi, S. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20): 2668-2683.
- Pishvaei, M. R., Farahani, R. Z. and Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computer Operational Research*, 37, 6, 1100– 1112.
- Pishvaei, M. S., Rabbani, M. and Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modeling*, 35, 2, 637– 649.
- Pishvaei, M. S., Jolai, F., Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28, 4, 107-114.
- Salehi-Amiri, A., Zahedi, Z., Gholian-Jouybari, F., Zulema Rodríguez Calvo, E., Hajiaghayi-Keshteli, M. (2022). Designing a Closed-loop Supply Chain Network Considering Social Factors; A Case Study on Avocado Industry. *Applied Mathematical Modelling*, 101, 600-631.

- Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N., Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110821.
- Salema, M. I. G., Barbosa-Pavoa, A. P. and Navais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179, 3, 1063- 1077.
- Singh, V., Yadav, S. P. (2017). Development and optimization of unrestricted LR-type intuitionistic fuzzy mathematical programming problems. *Expert Systems with Applications*, 80, 147-161.
- Selim, H., Ozkarahan, I. (2008). A supply chain distribution network design model: an interactive fuzzy goal programming-based solution approach. *International journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 401-418.
- Steuer, R. E., (1986). *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application*. John Wiley & Sons. New York.
- Torabi, S. A., Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy Sets and Systems*, 159, 193-214.
- Tsao, Y. C., Thanh, V. V., Lu, J. C., Yu, V. (2018). Designing sustainable supply chain networks under uncertain environments: Fuzzy multi-objective programming. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1550-1565.
- Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E. and Çetinkaya, S. (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research. Logistics*, 54, 8, 890- 907.
- Wang, H. F., Hsu, H. W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & Operations Research*, 37, 2, 376-389.
- Zimmermann, H.-J., (1978), Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *Fuzzy Sets Systems*, 1, 45-55.

استناد به این مقاله: محمودی راد، علی، طهماسبی نوترکی، علی، نیرومند، صادق. (۱۴۰۲). طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن تقاضای چند حالت در شرایط عدم قطعیت، مطالعات مدیریت صنعتی، ۶۸(۱)، ۱۸۹-۲۳۲.

DOI: 10.22054/jims.2021.60577.2648



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.