



A Novel Robust Fuzzy Programming Approach for Closed-loop Supply Chain Network Design

Seyyed Jalaladdin Hosseini Dehshiri

Ph.D. Candidate, Department of Operation and Production Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. E-mail: j.hosseini@atu.ac.ir

Maghsoud Amiri*

*Corresponding Author, Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. E-mail: mg_amiri@yahoo.com

Laya Olfat

Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. E-mail: olfat@atu.ac.ir

Mir Saman Pishvae

Associate Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: pishvae@iust.ac.ir

Abstract

Objective: Attention to environmental issues in supply chain activities has been taken into consideration due to the increase in public awareness and strict laws related to environmental protection. Initially, only the economic aspects of the supply chain were considered in the network configuration, but with increasing concerns about environmental issues, reverse logistics and closed-loop supply chains were developed. Designing a closed-loop supply chain network plays an important role in reducing costs, improving service levels, and responding to environmental issues. Therefore, the purpose of this study is to design a closed-loop supply chain network taking into account hybrid uncertainties and flexibility in constraints.

Methods: In most of the conducted studies about supply chain network design, the types of cognitive and random uncertainties, as well as the flexibility of soft constraints, have not been investigated simultaneously, while the conducted modeling is not able to consider hybrid uncertainty in supply chain parameters in the real world. In this study, to simultaneously consider the hybrid uncertainties and flexibility in constraints, a novel model of robust stochastic, possibilistic, and flexible programming based on Me measurement was developed. In this model, the convex combination of optimistic and pessimistic attitudes of decision-makers was considered in the form of the Me measure, and the modeling was more flexible and realistic.

Results: In the proposed approach, a convex combination of optimistic and pessimistic spectra was considered in the model. The need for subjective and repetitive reviews by decision-makers was eliminated in the model and the level of satisfaction was calculated optimally after solving the problem. On the other hand, due to the robustness of the model, possible deviations, scenario deviations, non-fulfillment of demand and capacity, and deviations of soft constraints were minimized. In the proposed approach based on the Me measure, the problem-solving approach was reduced and there was no need for a two-step solution to find solutions.

Conclusion: A case study was conducted in the supply chain of stone paper production to evaluate the efficiency of the proposed model. The results of sensitivity analysis, robustness analysis, and simulation with the realization model showed that the proposed model was able to provide robust and realistic solutions. The proposal of a realistic and flexible solution for designing problems of the supply chain network by creating a trade-off between the objective function and the risk-taking level of decision-makers and managers through changing the justified space in the Me criterion in the proposed approach was one of the achievements of the present study. As its other achievement, the present study could provide a combination of different viewpoints of decision-makers' risk-taking through changing the justified space based on different values of the parameter λ in measuring Me and propose flexible and realistic solutions according to the results of numerical simulation in the proposed approach.

Keywords: Closed-loop supply chain network design, Flexible programming, Possibilistic programming, Stochastic programming, Robust optimization.

Citation: Hosseini Dehshiri, Seyyed Jalaladdin; Amiri, Maghsoud; Olfat, Laya & Pishvae, Mir Saman (2022). A Novel Robust Fuzzy Programming Approach for Closed-loop Supply Chain Network Design. *Industrial Management Journal*, 14(3), 421- 457. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2021, Vol. 14, No 3, pp. 421- 457

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2022.330096.1007865>

Article Type: Research Paper

© Authors

Received: September 05, 2021

Received in revised form: May 31, 2022

Accepted: September 09, 2022

Published online: December 13, 2022





رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار جدید به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

سید جلال‌الدین حسینی دهشیری

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت تولید و عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: j.hosseini@atu.ac.ir

مقصود امیری *

* نویسنده مسئول، استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: amiri@atu.ac.ir

لعیا الفت

استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. رایانامه: olfat@atu.ac.ir

میرسامان پیشوایی

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. رایانامه: pishvae@iust.ac.ir

چکیده

هدف: هدف این پژوهش طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ترکیبی و انعطاف‌پذیری در محدودیت‌هاست.

روش: در این مطالعه به منظور در نظر گرفتن هم‌زمان عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی و انعطاف‌پذیری در محدودیت‌ها، مدل جدیدی از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار، بر اساس اندازه‌گیری Me توسعه داده شده است.

یافته‌ها: در رویکرد پیشنهادی، ترکیب محدبی از طیف خوش‌بینانه و بدبینانه در مدل در نظر گرفته شده و نیاز به بررسی‌های ذهنی و تکراری تصمیم‌گیران، در مدل رفع شده است؛ به طوری که سطح رضایت به صورت بهینه با حل مسئله تعیین می‌شود. از طرفی، به دلیل استواری مدل، انحراف‌های امکانی و سناریویی، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و نقض محدودیت‌های نرم در مدل حداقل شد.

نتیجه‌گیری: به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی، مطالعه‌ای موردی در زنجیره تأمین تولید کاغذسنگی انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت، تحلیل استواری و شبیه‌سازی با مدل تحقق نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است راه‌حل‌های استوار و واقع‌بینانه پیشنهاد کند. پیشنهاد حل واقع‌بینانه و انعطاف‌پذیر مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین، از طریق ایجاد تبادل بین تابع هدف و سطح ریسک‌پذیری تصمیم‌گیران و مدیران، از طریق تغییر فضای موجه در معیار Me در رویکرد پیشنهادی، از دستاوردهای مطالعه حاضر بود.

کلیدواژه‌ها: طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، برنامه‌ریزی امکانی، برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی استوار.

استناد: حسینی دهشیری، سید جلال‌الدین؛ امیری، مقصود؛ الفت، لعیا و پیشوایی، میرسامان (۱۴۰۱). رویکرد برنامه‌ریزی فازی استوار جدید به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته. مدیریت صنعتی، ۱۴(۳)، ۴۲۱-۴۵۷.

مقدمه

زنجیره تأمین شبکه‌ای از گروه‌های مختلف، از جمله تأمین‌کنندگان و مراکز تولیدی و توزیع است که همه جابه‌جایی‌ها و ذخیره‌سازی مواد خام، موجودی در حال فرایند و کالاهای ساخته‌شده از فروشنده تا مشتری نهایی را دربرمی‌گیرد (امیری، حسینی دهشیری و یوسفی هنومرور، ۱۳۹۷؛ آئینه‌وند و غلامیان، ۱۳۹۹). امروزه توجه به مسائل زیست‌محیطی در فعالیت‌های زنجیره تأمین، به دلیل افزایش آگاهی عمومی و قوانین سخت‌گیرانه مربوط به حفاظت از محیط زیست، در کانون توجه قرار گرفته است (لیو، ما و لیو^۱، ۲۰۲۱). در ابتدا، فقط به جنبه‌های اقتصادی زنجیره تأمین در پیکربندی شبکه توجه می‌شد؛ اما با افزایش نگرانی‌های مسائل زیست‌محیطی، لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه یافتند (مؤمنی و زرشکی، ۱۴۰۰). طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، دو نوع زنجیره تأمین معکوس و مستقیم را دربرمی‌گیرد و از طریق بهبود در طراحی و کنترل و عملیات، به حداکثرسازی ارزش در طول دوره عمر محصول منجر می‌شود (گائر، امینی و رائو^۲، ۲۰۱۷). طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، در کاهش هزینه‌ها، بهبود سطح خدمات و پاسخ به مسائل زیست‌محیطی نقش مهمی دارد (دویکا، جعفریان و نوربخش^۳، ۲۰۱۴؛ بورونوس، موسی‌زاده و ترابی^۴، ۲۰۲۱). این در حالی است که، ماهیت پویا و پیچیده زنجیره تأمین، به درجه بالایی از عدم قطعیت در تصمیم‌های مربوط به برنامه‌ریزی زنجیره تأمین منجر می‌شود و عملکرد کلی شبکه زنجیره تأمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد (کلیبی، مارتل و گویتوننی^۵، ۲۰۱۰). افق استراتژیک تصمیم‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین، تأثیر عدم قطعیت را در این مسائل افزایش می‌دهد (پیشوایی و ترابی^۶، ۲۰۱۰؛ پیشوایی، ربانی و ترابی^۷، ۲۰۱۱) و اثرهای عدم قطعیت در تصمیم‌های استراتژیک نسبت به تصمیم‌های تاکتیکی بسیار بیشتر است (خلیلی، پویا، کاظمی و فکور ثقیه، ۱۴۰۱). بنابراین مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، به دلیل اثرهای درازمدت بر سطوح مختلف زنجیره تأمین، بسیار پیچیده است و تأثیر عدم قطعیت در این مسائل، به دلیل ماهیت استراتژیک آن بسیار بیشتر از تصمیم‌های عملیاتی و تاکتیکی است که بر عملکرد کلی شبکه تأثیر می‌گذارد؛ از این رو لازم است که انواع مختلف عدم قطعیت در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته بررسی شود (حسینی دهشیری، امیری، الفت و پیشوایی^۸، ۲۰۲۲). در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، محققان انواع مختلف عدم قطعیت ترکیبی، همچون عدم قطعیت تصادفی و شناختی را بررسی کرده‌اند (باقالیان، رضاپور و فرهانی^۹، ۲۰۱۳؛ فرخ، آذر، جندقی و احمدی^{۱۰}، ۲۰۱۸). عدم قطعیت تصادفی، هنگامی استفاده می‌شود که پارامترها به صورت ذاتی تصادفی و توزیع آن‌ها مشخص باشد. برای مقابله با این نوع عدم قطعیت، از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود (دهقان، نیکبخت، امیری و جبارزاده^{۱۱}، ۲۰۱۸). عدم قطعیت شناختی، در زمانی استفاده می‌شود که پارامترها

1. Liu, Ma & Liu

2. Gaur, Amini & Rao

3. Devika, Jafarian & Nourbakhsh

4. Boronoos, Mousazadeh & Torabi

5. Klibi, Martel & Guitouni

6. Pishvae & Torabi

7. Pishvae, Rabbani & Torabi

8. Hosseini Dehshiri, Amiri, Olfat & Pishvae

9. Baghalian, Rezapour & Farahani

10. Farrokh, Azar, Jandaghi & Ahmadi

11. Dehghan, Nikabadi, Amiri & Jabbarzadeh

غیردقیق و مبهم‌اند و تصمیم‌گیرندگان با کمبود دانش مواجه شده‌اند. برای مقابله با این نوع عدم قطعیت، از برنامه‌ریزی امکانی استفاده می‌شود (موسی‌زاده، ترابی، پیشوایی و ابوالحسنی^۱، ۲۰۱۸). برنامه‌ریزی امکانی ضعف‌هایی دارد؛ به‌طوری که استفاده از برنامه‌ریزی امکانی، در شرایط تصادفی، به نادیده‌گرفتن انحراف‌های تابع هدف در شرایط فزایی منجر می‌شود (ژانگ و ژیاو^۲، ۲۰۰۹). در برنامه‌ریزی امکانی، مقادیر متوسط پارامترهای غیرقطعی، در ارزیابی‌ها در نظر گرفته می‌شود و انحراف‌های امکانی و تصادفی تابع هدف کنترل نمی‌شود که این امر، به نتایج غیرواقعی بینانه منجر می‌شود (حسینی دهسیری و همکاران، ۲۰۲۲). در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، باید پارامترهای نامعلوم و غیرقطعی استوار باشد؛ در غیر این صورت، تأثیر نوسان‌های پارامترها در طول زمان بیش‌ازحد خواهد بود (سیبویه، آذر و زندیه، ۱۴۰۰). تأکید استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار، در ادبیات تحقیق، برای این است که ضعف‌های برنامه‌ریزی امکانی و تصادفی رفع شود (فرخ و همکاران، ۲۰۱۸؛ دهقان و همکاران، ۲۰۱۸). از طرفی، عدم قطعیت در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، می‌تواند در توابع هدف و محدودیت‌های نرم مربوط به تقاضا و ظرفیت وجود داشته باشد (یو و لی^۳، ۲۰۱۹). در ادبیات تحقیق، برای در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در اهداف^۴ و تغییر در برخی از محدودیت‌های نرم، از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استفاده شده است (حسینی مطلق، ثمنی و چراغی^۵، ۲۰۲۰). با این حال، در بسیاری از شرایط دنیای واقعی، رویکردهای برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، امکانی، تصادفی و استوار را می‌توان در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به کار برد تا با محدودیت‌های انعطاف‌پذیر و عدم قطعیت‌های ترکیبی شناختی و تصادفی مقابله شود.

در اکثر مطالعات انجام‌شده در این حوزه، انواع عدم قطعیت شناختی و تصادفی و همچنین، انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم، به‌صورت هم‌زمان بررسی نشده است و مدل‌سازی‌های انجام‌شده، قادر نبوده‌اند که شرایط عدم قطعیت ترکیبی موجود در پارامترهای زنجیره تأمین را در دنیای واقعی در نظر بگیرند. همچنین، در رویکردهای برنامه‌ریزی امکانی، فقط به بررسی حالات خوش‌بینانه و بدبینانه نظرها و سطوح ریسک تصمیم‌گیرندگان توجه شده است و مدل‌سازی‌های انجام‌شده، به دو طیف خوش‌بینانه و بدبینانه محدود بوده است که این امر، از جواب‌های انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه در سطوح مختلف ریسک تصمیم‌گیرندگان جلوگیری می‌کند. بنابراین در زمینه استفاده هم‌زمان از محدودیت‌های انعطاف‌پذیر و عدم قطعیت‌های تصادفی و شناختی با رویکرد استوار، در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، خلأ تحقیقاتی دیده می‌شود. از این رو، هدف این مطالعه، طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته استوار، تحت عدم قطعیت با در نظر گرفتن محدودیت‌های انعطاف‌پذیر، عدم قطعیت‌های تصادفی و شناختی به‌صورت هم‌زمان است. در این راستا، مدل جدیدی از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، امکانی، تصادفی استوار، بر مبنای اندازه‌گیری Me توسعه داده می‌شود. در این مدل، ترکیب محدب نگرش‌های خوش‌بینانه و بدبینانه تصمیم‌گیرندگان، در قالب اندازه‌گیری Me در نظر گرفته می‌شود و مدل‌سازی، نسبت به مدل‌های اندازه‌گیری امکانی و الزام که به دو طیف خوش‌بینانه و بدبینانه محدودند، جواب‌های انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهد. همچنین، در رویکرد پیشنهادی، بر مبنای اندازه‌گیری Me، رویکرد

1. Mousazadeh, Torabi, Pishvae & Abolhassani
2. Zhang & Xiao
3. Yu & Li
4. Flexibility conditions on the goals
5. Hosseini-Motlagh, Samani & Cheraghi

حل مسئله کاهش یافته و نیازی به حل دو مرحله‌ای برای یافتن جواب‌ها نخواهد بود. برخلاف مدل‌های برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر قبلی، در مدل پیشنهادی حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر، به‌صورت بهینه با حل مدل تعیین می‌شود. استواری نتایج از طریق کنترل انحراف‌های امکانی، انحراف‌های تصادفی، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و انحراف‌های محدودیت‌های انعطاف‌پذیر، از طریق استواری مدل فراهم می‌شود. به‌علاوه، در این پژوهش برای ارزیابی و کاربرد مدل پیشنهادی، مطالعه‌ای موردی به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های کل انجام شده است. بنابراین با توجه به مطالب ارائه شده، نوآوری‌ها و مشارکت‌های مهم این تحقیق به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

- طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های معرفتی و تصادفی و محدودیت‌های نرم، به‌صورت هم‌زمان و معرفی رویکرد جدید برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار؛
- ارائه راه‌حل‌های انعطاف‌پذیر با کنترل انحراف امکانی مطلق، انحراف سناریویی و عدم تحقق و نقض محدودیت‌های نرم، از طریق در نظر گرفتن استواری بهینگی و شدنی در رویکرد پیشنهادی؛
- توسعه معیار Me در برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، برای در نظر گرفتن ترکیب محدب نگرش‌های تصمیم‌گیران و همچنین، کاهش مراحل حل مدل Me به یک مرحله، برخلاف مدل دومرحله‌ای ارائه شده شو و جو^۱ (۲۰۱۳)؛
- ارزیابی و ارائه یک مورد مطالعاتی جدید، در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، برای مدل توسعه‌یافته پیشنهادی در صنعت کاغذسنگی.

ساختار مطالعه به این صورت است که در ادامه، به بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت پرداخته می‌شود. مدل ریاضی پیشنهادی، به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی، در بخش تعریف مسئله و مدل‌سازی بیان می‌شود. در بخش رویکرد حل پیشنهادی، مدل جدید برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، امکانی، تصادفی استوار، بر مبنای معیار Me توسعه داده می‌شود. در بخش مطالعه موردی و تحلیل مدل پیشنهادی، مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی حل شده و نتایج تحلیل استواری، تحلیل حساسیت و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی ارائه می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهاد‌های علمی و اجرایی بیان می‌شود.

پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین حلقه بسته، فعالیت‌های لجستیک معکوس را در زنجیره تأمین مستقیم قرار می‌دهد و با استفاده مجدد از منابع، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد (گویندان، فتحی و کیوانشکوه^۲، ۲۰۱۷). این در حالی است که عدم قطعیت، در توسعه و ایجاد چرخه در زنجیره تأمین حلقه بسته، مانع جدی محسوب می‌شود و عملکرد شبکه زنجیره تأمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ولت و استینهیلپر^۳، ۲۰۱۶). مطالعات زیادی وجود دارد که بررسی دقیق عدم قطعیت در

1. Xu & Zhou

2. Govindan, Fattahi & Keyvanshokoo

3. Velte & Steinhilper

طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته را اکیداً توصیه کرده‌اند (گویندان، جعفریان و نوربخش^۱، ۲۰۱۵). در این بخش، مطالعات انجام شده در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، بر اساس در نظر گرفتن انواع عدم قطعیت طبقه بندی شده و ویژگی‌ها و کمبودهای هر طبقه از پژوهش‌ها تحلیل می‌شود.

گروهی از مطالعات، عدم قطعیت شناختی در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین را بررسی کرده‌اند. پیشوایی، رزمی و ترابی^۲ (۲۰۱۲) با تمرکز بر اهداف حداقل سازی هزینه کل و حداکثر سازی مسئولیت اجتماعی، به طراحی زنجیره تأمین پرداخته‌اند. در این مطالعه، مدل‌های برنامه ریزی امکانی استوار، بر مبنای اندازه گیری اعتبار توسعه داده شده و مدل پیشنهادی در بررسی واقعی ارزیابی شده است. طلایی، مقدم، پیشوایی، بزرگی امیر و غلام‌نژاد^۳ (۲۰۱۶) با استفاده از رویکرد برنامه ریزی امکانی استوار، بر مبنای اندازه گیری الزام، با هدف حداقل سازی هزینه کل و میزان انتشار کربن، به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. کاربرد مدل پیشنهادی، در صنعت دستگاه‌های کپی بررسی شده است. قهرمانی نهر، کیان و ثابت^۴ (۲۰۱۹) از رویکرد برنامه ریزی امکانی استوار، بر مبنای اندازه گیری الزام، به منظور طراحی برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند دوره‌ای، چند محصولی و چند سطحی استفاده کرده‌اند. در این مطالعه، از بررسی‌های عددی برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی بهره برده شده است. لیو و همکاران^۵ (۲۰۲۱) با توجه به عملکرد اقتصادی و زیست محیطی، به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز پرداخته‌اند. در این پژوهش، یک مدل برنامه امکانی استوار، بر مبنای اندازه گیری اعتبار توسعه داده شده است. آن‌ها برای تأیید مدل، آن را در یک مطالعه موردی در شرکت کواکولا، در شمال شرقی چین استفاده کرده‌اند. حبیب و همکاران^۶ (۲۰۲۱) در تحقیقی، به طراحی شبکه زنجیره تأمین بیودیزل مبتنی بر چربی حیوانی پرداخته‌اند. در این مطالعه، از برنامه ریزی امکانی استوار با اندازه گیری اعتبار برای مدل سازی استفاده شده است. نتایج نشان داد که رویکرد حل پیشنهادی، راه حل‌های کارآمد و استواری ارائه داده است. گیلانی و صاحبی^۷ (۲۰۲۱) با توجه به اهداف حداکثر سازی سود و حداقل سازی تأثیرهای زیست محیطی، به طراحی زنجیره تأمین پسته در ایران پرداخته‌اند. مدل ریاضی پیشنهادی با در نظر گرفتن یک رویکرد برنامه ریزی امکانی استوار و بر اساس اندازه گیری الزام، در این زنجیره تأمین از نظر تأمین، قیمت محصولات و تقاضای چند دوره‌ای ارائه داده است. در این دسته از مطالعات، عدم قطعیت‌های تصادفی و انعطاف پذیری محدودیت‌های نرم در طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته نشده است و از این حیث کمبود دارد.

برخی از مطالعات به بررسی عدم قطعیت تصادفی، در موضوعات پیکره بندی شبکه زنجیره تأمین توجه کرده‌اند. محمد، سلیم، حسن و نقیب الدین سید^۷ (۲۰۱۷) یک مدل بهینه سازی تصادفی استوار، برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد کرده‌اند. در این مطالعه، عدم قطعیت‌ها از طریق سناریوهای چندگانه و عدم قطعیت انتشار کربن ناشی از

1. Govindan, Jafarian & Nourbakhsh

2. Pishvae, Razmi & Torabi

3. Talaei, Moghaddam, Pishvae, Bozorgi Amiri & Gholamnejad

4. Ghahremani Nahr, Kian & Sabet

5. Habib et al.

6. Gilani & Sahebi

7. Mohammed, Selim, Hassan & Syed

فعالیت‌های مربوط به زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. وانگ و وان^۱ (۲۰۲۲) با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو، به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. در این مطالعه، کارایی مدل پیشنهادی از طریق بررسی‌های عددی ارزیابی شده است. بر اساس نتایج، رویکرد ارائه‌شده در ارزیابی‌ها مناسب است. در این گروه از مطالعات، فقط به عدم قطعیت تصادفی در موضوعات طراحی شبکه زنجیره تأمین توجه شده و عدم قطعیت‌های شناختی و انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است.

گروهی از مطالعات، انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها و عدم قطعیت شناختی را بررسی کرده‌اند. پیشوایی و خلف^۲ (۲۰۱۶) به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین، از مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی استوار بهره برده‌اند. برای نشان دادن کارایی مدل ارائه‌شده در مقایسه با رویکرد برنامه‌ریزی فازی سنتی، از یک مسئله واقعی در تولیدکننده وسایل پزشکی یک‌بار مصرف استفاده شده است. بورونوس و همکاران (۲۰۲۱) از رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی استوار، بر مبنای اندازه‌گیری الزام، برای در نظر گرفتن محدودیت‌های انعطاف‌پذیر و عدم قطعیت ذاتی در پارامترهای مدل، به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده کرده‌اند. کاربرد مدل پیشنهادی در صنعت دستگاه کپی بررسی شده است. این دسته از پژوهش‌ها نیز ضعف دارد؛ زیرا به عدم قطعیت تصادفی پارامترها که در تصمیم‌های بلندمدت طراحی شبکه، بر اساس سناریوهای مختلف تغییر می‌کنند، توجه نشده است.

برخی از پژوهش‌ها نیز، در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی انجام شده است. ترابی، نامدار، هاتفی و جولای^۳ (۲۰۱۶) به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با استفاده از برنامه‌ریزی امکانی تصادفی استوار، بر مبنای اندازه‌گیری Me پرداخته‌اند. در این مطالعه، از بررسی‌های عددی و تحلیل حساسیت، برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی استفاده شده است. دهقان و همکاران (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی تصادفی امکانی استوار، یک مدل چندمحصولی و چنددوره‌ای به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته روغن خوراکی ارائه داده‌اند. در این مطالعه، از اندازه‌گیری Me به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت ترکیبی از استفاده شده است. فرخ و همکاران (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی تصادفی امکانی استوار، به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت ترکیبی پرداخته‌اند. با استفاده از شبیه‌سازی و مدل تحقق عملکرد، مدل پیشنهادی ارزیابی شده است. اتابکی، محمدی و نادری^۴ (۲۰۲۰) با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی تصادفی استوار، به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، برای محصولات بادوام پرداخته‌اند و کارایی مدل را با استفاده از نمونه‌های عددی بر اساس داده‌های واقعی بررسی کرده‌اند. یو و سولوانگ^۵ (۲۰۲۰) برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار، مدل ریاضی چندهدفه امکانی - تصادفی ارائه داده‌اند. هدف از این مدل، ایجاد تعادل بین اثربخشی هزینه و عملکرد زیست‌محیطی، تحت انواع مختلف عدم قطعیت بوده است. کارایی مدل از طریق مجموعه‌ای از بررسی‌های عددی تأیید شده است. در این طبقه از تحقیق‌ها، انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم، در مسائل طراحی شبکه در نظر

1. Wang & Wan

2. Pishvaei & Khalaf

3. Torabi, Namdar, Hatefi & Jolai

4. Atabaki, Mohammadi & Naderi

5. Yu & Solvang

گرفته نشده است و مدل‌سازی، برای در نظر گرفتن کلیه ابهام‌ها در شرایط مختلف، به‌ویژه انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها، به‌اندازه کافی جامع نیست.

در گروهی از مطالعات نیز، عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی و همچنین، انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی، از رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی، تصادفی استوار، به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین خون استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، از تجزیه و تحلیل پوشش داده‌ها، به‌منظور ارزیابی مجموعه گزینه‌های مکانی برای ایجاد تسهیلات استفاده شده و مدل‌سازی با توجه به معیار الزام انجام شده است. در این گروه از مطالعات، به انواع عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی و همچنین، انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم، در طراحی شبکه زنجیره تأمین توجه شده است و مدل‌سازی، برای در نظر گرفتن ابهام‌ها در شرایط مختلف، به‌اندازه کافی جامع است؛ اما در این گروه، فقط به معیار الزام برای در نظر گرفتن سطوح ریسک تصمیم‌گیران توجه شده است و مدل‌سازی، برای در نظر گرفتن ترکیب مختلف نظرهای خوش‌بینانه و بدبینانه تصمیم‌گیران، به‌اندازه کافی انعطاف‌پذیر نیست.

با توجه به ادبیات تحقیق، در زمینه استفاده هم‌زمان از عدم قطعیت‌های تصادفی و شناختی و محدودیت‌های نرم با رویکرد استوار، خلأ تحقیقاتی دیده می‌شود. در این تحقیق، به دلیل ماهیت معرفتی و تصادفی بودن پارامترهای مسئله و انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم، از رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استفاده می‌شود. محدودیت‌های تقاضا و ظرفیت، محدودیت‌های انعطاف‌پذیرند. انعطاف‌پذیری این محدودیت‌ها به این معناست که می‌توان آن‌ها را به‌صورت جداگانه در حداقل سطح رضایت برآورده کرد. این محدودیت‌ها را می‌توان از طریق سطوح رضایت تعیین شده توسط تصمیم‌گیران کنترل کرد. برای در نظر گرفتن پارامترهای معرفتی از برنامه‌ریزی امکانی و برای در نظر گرفتن پارامترهای تصادفی از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود. بنابراین، انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم و عدم قطعیت پارامترهای معرفتی و تصادفی از طریق استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی در مدل اعمال می‌شود. با توجه به عدم کنترل انحرافات مکانی و تصادفی و انحراف محدودیت‌های نرم، در رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی، در نظر گرفتن استواری بهینگی و شدنی ضروری است و به همین دلیل، در این مطالعه از بهینه‌سازی استوار استفاده می‌شود. بنابراین با توجه به ویژگی‌های مسئله پژوهش و به‌منظور در نظر گرفتن کلیه ابعاد عدم قطعیت ذکر شده، در این پژوهش رویکرد جدید برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار بر مبنای اندازه‌گیری Me توسعه داده می‌شود. برخلاف مطالعات قبلی که به دو حد فقط خوش‌بینانه یا فقط بدبینانه متکی بودند، در این مطالعه ترکیب محدب سطوح مختلف ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی تصمیم‌گیران، بر اساس معیار Me در نظر گرفته می‌شود. با توجه به ادبیات تحقیق، تاکنون معیار Me در برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر توسعه داده نشده است و مقاله حاضر از این جنبه نیز نوآوری دارد.

مدل پیشنهادی به دلیل در نظر گرفتن استواری بهینگی و شدنی، قادر است که حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر را بهینه‌سازی کند. در این مدل، هر دو وجه استواری شدنی و استواری بهینگی با اندازه‌گیری انحراف‌های امکانی، انحراف‌های سناریویی، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت بهینه می‌شود. همچنین، مدل پیشنهادی به‌منظور ارزیابی در

زنجیره تأمین کاغذسنگی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین پیاده‌سازی می‌شود که کاربرد جدیدی در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته است.

در جدول ۱، مطالعات انجام‌شده در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، تحت عدم قطعیت پارامترها با هم مقایسه شده است.

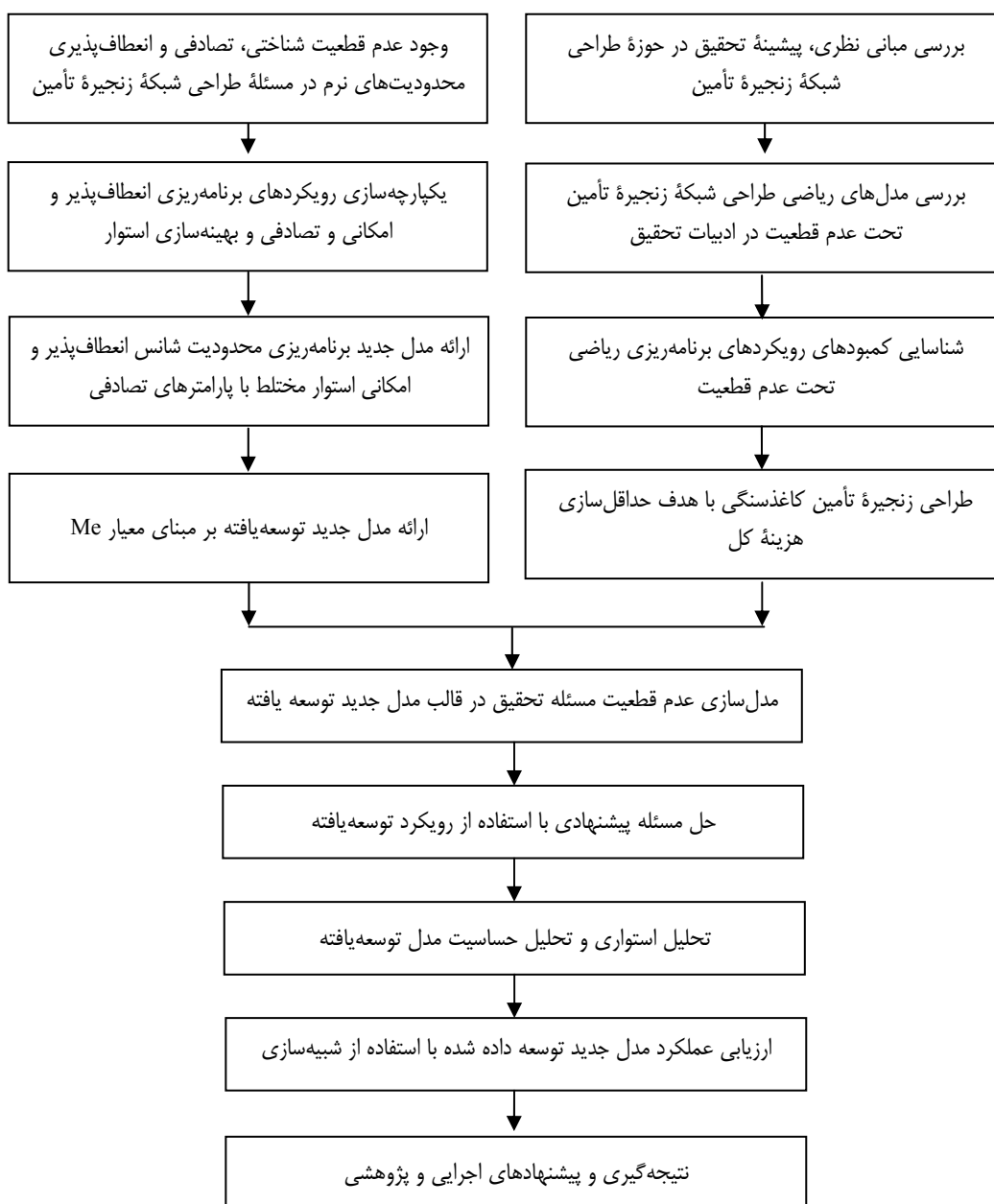
جدول ۱. بررسی پژوهش‌های انجام شده در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت پارامترها

شاخص امکانی	ارزیابی مدل		دوره		محصول		مدل‌سازی عدم قطعیت					محققان - سال
	مورد مطالعه واقعی	پرسی‌های عددی	چند دوره ای	تک دوره ای	چند محصولی	تک محصولی	برنامه‌ریزی فازی	پهنه‌سازی استوار	برنامه‌ریزی امکانی	برنامه‌ریزی تصادفی	برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر	
اعتبار	✓			✓		✓	✓	✓	✓			پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)
الزام	✓			✓		✓	✓	✓	✓			طلایی و همکاران (۲۰۱۶)
-	✓			✓		✓	✓	✓			✓	پیشوایی و خلف (۲۰۱۶)
Me		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓		ترابی و همکاران (۲۰۱۶)
-		✓	✓		✓			✓		✓		محمد و همکاران (۲۰۱۷)
Me	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓		دهقان و همکاران (۲۰۱۸)
اعتبار		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		فرخ و همکاران (۲۰۱۸)
الزام		✓	✓		✓		✓	✓	✓			قهرمانی نهر و همکاران (۲۰۱۹)
-		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓		اتابکی و همکاران (۲۰۲۰)
الزام	✓			✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)
-		✓		✓	✓		✓		✓	✓		یو و سولوانگ (۲۰۲۰)
الزام	✓		✓		✓		✓	✓	✓		✓	بورونوس و همکاران (۲۰۲۱)
اعتبار	✓			✓	✓		✓	✓	✓			لیو و همکاران (۲۰۲۱)
اعتبار	✓		✓			✓	✓	✓	✓			حیب و همکاران (۲۰۲۱)
الزام	✓		✓		✓		✓	✓	✓			گیلانی و صاحبی (۲۰۲۱)
-		✓	✓		✓					✓		وانگ و وان (۲۰۲۲)
Me	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	مطالعه حاضر

روش شناسی پژوهش

در ابتدا با بررسی مبانی نظری و پیشینه تحقیق در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، کمبودهای موجود در زمینه مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته شناسایی می‌شود. در این مطالعه، هدف حداقل‌سازی هزینه کل در طراحی شبکه زنجیره تأمین است که هزینه‌های ثابت بازگشایی تسهیلات و هزینه‌های متغیر پردازش و حمل‌ونقل در تسهیلات مختلف را شامل می‌شود. سپس با بررسی مدل‌های ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت،

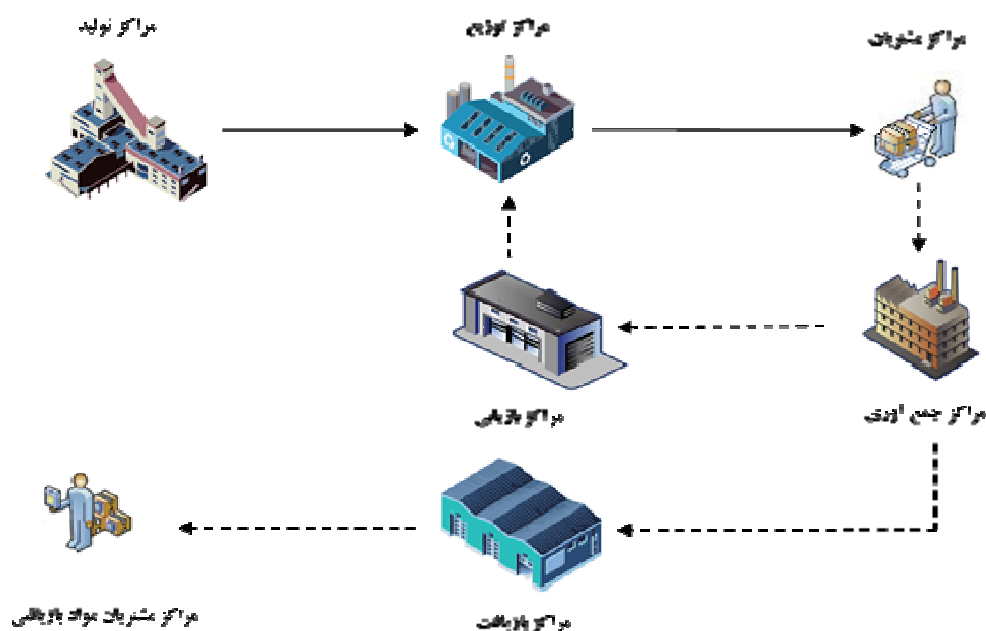
برنامه‌ریزی‌های انعطاف‌پذیر و امکانی و تصادفی، یکپارچه و ترکیب شده و مدل جدید برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر و امکانی استوار مختلط با پارامترهای تصادفی با معیار Me توسعه داده می‌شود. سپس مسئله پژوهش، در قالب رویکرد جدید توسعه می‌یابد و عدم قطعیت‌های ترکیبی شناختی و تصادفی و محدودیت‌های انعطاف‌پذیر، در مدل اعمال می‌شود. ادامه، به منظور طراحی زنجیره تأمین تولید محصولات کاغذسنگی، مسئله‌ای در مورد مطالعاتی اجرا و پیاده‌سازی می‌شود. سپس، مدل پیشنهادی حل شده و تحلیل استواری و حساسیت مدل پیشنهادی انجام می‌گیرد و نتایج تحلیل می‌شود. در ادامه، عملکرد مدل جدید توسعه داده شده ارزیابی شده و در نهایت، پیشنهادهای علمی و پژوهشی بیان می‌شود. در شکل ۱ مراحل و فرایند اجرایی تحقیق حاضر ارائه شده است.



شکل ۱. مراحل و فرایند اجرایی تحقیق

تعریف مسئله و مدل‌سازی

به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی تحت عدم قطعیت ترکیبی، مدلی چندسطحی، چنددوره‌ای و چندمحصولی توسعه داده می‌شود. مدل زنجیره تأمین پیشنهادی شامل زنجیره‌های تأمین مستقیم و معکوس است؛ به طوری که در زنجیره تأمین مستقیم، محصولات در کارخانجات تولیدی ساخته شده و به مراکز توزیع منتقل و در نهایت به مراکز مشتریان ارسال می‌شود و در زنجیره تأمین معکوس، محصولات بازگشتی از مراکز مشتری، به مراکز جمع‌آوری و سپس به مراکز بازیابی و مراکز بازیافت منتقل می‌شوند. در این مرحله، محصولات استفاده شده از مراکز مشتریان به مراکز جمع‌آوری منتقل می‌شود. سپس محصولات بازگشتی در مراکز جمع‌آوری ارزیابی شده و با توجه به سطح کیفی به مراکز بازیابی و بازیافت منتقل می‌شوند. محصولات بازیابی شده به مراکز توزیع و مواد بازیافتی، به محل مشتریان مواد منتقل می‌شود. ساختار شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی پیشنهادی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. ساختار شبکه زنجیره تأمین کاغذسنگی پیشنهادی

نکته نخست اینکه به دلیل دسترسی به اطلاعات ناقص و مبهم در دنیای واقعی، به‌ویژه در افق زمانی بلندمدت در مدل زنجیره تأمین پیشنهادی، پارامترهای مدل دارای عدم قطعیت‌اند. برای پارامترهایی که اطلاعات کافی از آن‌ها در دسترس نیست، از توزیع امکانی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. برای پارامترهایی که ذات تصادفی دارند و باید در قالب سناریوهای مختلف برآورد شوند، مانند پارامتر تقاضا، از برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده می‌شود. نکته دوم اینکه به دلیل عدم توسعه شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی و نبود اطلاعات در این زمینه، محدودیت‌های مربوط به تقاضا و ظرفیت در این مطالعه، انعطاف‌پذیرند که لازم است از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر برای مقابله با محدودیت‌های نرم استفاده شود. افق تصمیم‌گیری در مدل پیشنهادی چندین دوره‌ای در نظر گرفته می‌شود و جریان میان سطوح مختلف زنجیره تأمین با توجه به تقاضا و سایر پارامترها در دوره‌های زمانی تعریف می‌شود. نکته سوم

اینکه با در نظر گرفتن چندمحصولی بودن جهت پاسخ‌گویی به تنوع نیازهای مشتریان، تصمیم‌های تاکتیکی مربوط به جریان مواد با تصمیم‌های استراتژیک سطوح مکان‌یابی تسهیلات یکپارچه می‌شود.

فرضیه‌های مسئله تحقیق عبارت‌اند از:

- هزینه ثابت بازگشایی تسهیلات در مناطق مختلف، به‌صورت عدم قطعیت، از نوع فازی در نظر گرفته می‌شود؛
- هزینه پردازش در تسهیلات در مناطق مختلف، به‌صورت عدم قطعیت، از نوع فازی سناریویی در نظر گرفته می‌شود؛
- هزینه‌های متغیر، شامل هزینه‌های تولید، توزیع، جمع‌آوری، بازیافت و حمل‌ونقل، به‌صورت عدم قطعیت، از نوع فازی سناریویی تعریف می‌شوند؛
- ظرفیت تسهیلات در شبکه زنجیره تأمین محدود است و به‌صورت عدم قطعیت، از نوع فازی در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه، شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله برای مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی معرفی شده است.

شاخص‌ها

$i = 1, 2, \dots, I$	شاخص مکان‌های بالقوه مراکز تولید	i
$j = 1, 2, \dots, J$	شاخص مکان‌های بالقوه مراکز توزیع	j
$k = 1, 2, \dots, K$	شاخص مکان ثابت مراکز مشتری	k
$l = 1, 2, \dots, L$	شاخص مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری	l
$m = 1, 2, \dots, M$	شاخص مکان‌های بالقوه مراکز بازیابی	m
$n = 1, 2, \dots, N$	شاخص مکان‌های بالقوه مراکز بازیافت	n
$p = 1, 2, \dots, P$	شاخص نوع محصول	p
$e = 1, 2, \dots, E$	شاخص مکان ثابت مشتریان مواد	e
$r = 1, 2, \dots, R$	شاخص مواد بازیافت شده	r
$t = 1, 2, \dots, T$	شاخص دوره‌های زمانی	t
$s = 1, 2, \dots, S$	شاخص سناریوهای در نظر گرفته شده	s

پارامترها

تقاضای تولید نوع p به‌وسیله مرکز مشتری k^m در دوره t تحت سناریو تصادفی s	\tilde{d}_{pkts}
نرخ برگشت تولید p از نقاط مشتری k^m	\tilde{q}_{pk}
مقدار تولیدات برگشت‌داده شده نوع p از نقاط مشتری نهایی k^m در دوره t تحت سناریو تصادفی s	\tilde{r}_{pkts}
تقاضای ماده بازیافت شده r^m توسط مشتریان اقلام بازیافتی e^m در دوره t تحت سناریو تصادفی s	\tilde{d}_{rets}

متوسط شکست تولید نوع p در دوره t	$\bar{a}f_{pt}$
هزینه بازگشایی تسهیلات تولیدی i	$\bar{f}m_i$
هزینه بازگشایی تسهیلات توزیع j	$\bar{f}d_j$
هزینه بازگشایی تسهیلات جمع‌آوری l	$\bar{f}c_l$
هزینه بازگشایی تسهیلات بازیابی m	$\bar{f}b_m$
هزینه بازگشایی تسهیلات بازیافت n	$\bar{f}r_n$
ماکزیمم ظرفیت تسهیل تولیدی i	$\bar{c}ap_i$
ماکزیمم ظرفیت تسهیل توزیع j	$\bar{c}ad_j$
ماکزیمم ظرفیت تسهیل جمع‌آوری l	$\bar{c}ac_l$
ماکزیمم ظرفیت تسهیل بازیابی m	$\bar{c}ab_m$
ماکزیمم ظرفیت تسهیل بازیافت n	$\bar{c}ar_n$
هزینه جابه‌جایی هر واحد تولید نوع p از تسهیل تولیدی اُم به محل توزیع اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}tr_{pijts}$
هزینه جابه‌جایی هر واحد تولید نوع p از محل توزیع اُم به محل مشتری k اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}tr_{pjkt}$
هزینه جابه‌جایی هر واحد تولید نوع p از محل مشتری k اُم به محل جمع‌آوری اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}tr_{pklt}$
هزینه جابه‌جایی هر واحد تولید نوع p از محل جمع‌آوری اُم به محل بازیابی m اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}tr_{plmts}$
هزینه جابه‌جایی هر واحد تولید نوع p از محل جمع‌آوری اُم به محل بازیافت n اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}tr_{plnts}$
هزینه جابه‌جایی هر واحد تولید نوع p از محل بازیابی m اُم به محل توزیع اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}tr_{pmjts}$
هزینه جابه‌جایی هر واحد ماده بازیافت شده r از محل بازیافت n اُم به محل مشتری مواد اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}tr_{rmet}$
هزینه ساخت هر واحد تولید نوع p در تسهیل تولیدی اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}pm_{pits}$
هزینه پردازش هر واحد تولید نوع p در مکان توزیع اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}pd_{pjts}$
هزینه پردازش هر واحد تولید نوع p در مکان جمع‌آوری اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}pc_{plts}$
هزینه بازیابی هر واحد تولید نوع p در مکان بازیابی m اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}pb_{pmts}$
هزینه بازیافت هر واحد ماده بازیافتی r در مکان بازیافتی n اُم در دوره t تحت سناریو تصادفی s	$\bar{c}pr_{rnts}$
احتمال رخداد سناریو تصادفی s	P_s

متغیرها

out_{pijts}	میزان ارسال تولید نوع p از محل تولید $ام$ به محل توزیع $اُم$ در دوره t تحت سناریو تصادفی s
out_{pjks}	میزان ارسال تولید نوع p از محل توزیع $اُم$ به مرکز مشتری k $ام$ در دوره t تحت سناریو تصادفی s
out_{pklt}	میزان ارسال تولید نوع p از محل مشتری k $ام$ به محل جمع‌آوری $ام$ در دوره t تحت سناریو تصادفی s
out_{plmts}	میزان ارسال تولید نوع p از محل جمع‌آوری $ل$ $ام$ به محل بازیابی m $ام$ در دوره t تحت سناریو تصادفی s
out_{plnts}	میزان ارسال تولید نوع p از محل جمع‌آوری $ل$ $ام$ به محل بازیافت n $ام$ در دوره t تحت سناریو تصادفی s
out_{pmjts}	میزان ارسال تولید نوع p از محل بازیابی m $ام$ به محل توزیع $اُم$ در دوره t تحت سناریو تصادفی s
out_{rnets}	میزان ارسال ماده بازیافت شده r از محل بازیافت n $ام$ به محل مشتری مواد e $ام$ در دوره t تحت سناریو تصادفی s

mc_i	اگر تسهیل تولیدی $ام$ بازگشایی شود ۱، در غیر این صورت صفر
dc_j	اگر تسهیل توزیع $اُم$ بازگشایی شود ۱، در غیر این صورت صفر
cc_l	اگر تسهیل جمع‌آوری $ل$ $ام$ بازگشایی شود ۱، در غیر این صورت صفر
bc_m	اگر تسهیل بازیابی m $ام$ بازگشایی شود ۱، در غیر این صورت صفر
rc_n	اگر تسهیل بازیافت n $ام$ بازگشایی شود ۱، در غیر این صورت صفر

مدل‌سازی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی با توجه به فرضیه‌ها، شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله، به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 = & \sum_i \tilde{f}m_i \cdot mc_i + \sum_j \tilde{f}d_j \cdot dc_j + \sum_l \tilde{f}c_l \cdot cc_l + \sum_m \tilde{f}b_m \cdot bc_m + \sum_n \tilde{f}r_n \cdot rc_n \quad (\text{رابطه ۱}) \\
 & + \sum_s P_s \left[\sum_p \sum_i \sum_j \sum_t (\tilde{c}tr_{pijts} + \tilde{c}p\tilde{m}_{pits}) \cdot out_{pijts} \right. \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_k \sum_t (\tilde{c}tr_{pjks} + \tilde{c}p\tilde{d}_{pjts}) \cdot out_{pjks} + \sum_p \sum_k \sum_l \sum_t \tilde{c}tr_{pklt} \cdot \tilde{q}_{pk} \\
 & + \sum_p \sum_l \sum_m \sum_t (\tilde{c}tr_{plmts} + \tilde{c}p\tilde{c}_{plts}) \cdot out_{plmts} \\
 & + \sum_p \sum_l \sum_n \sum_t (\tilde{c}tr_{plnts} + \tilde{c}p\tilde{c}_{plts}) \cdot out_{plnts} \\
 & + \sum_p \sum_m \sum_j \sum_t (\tilde{c}tr_{pmjts} + \tilde{c}p\tilde{b}_{pmjts}) \cdot out_{pmjts} \\
 & \left. + \sum_r \sum_n \sum_e \sum_t (\tilde{c}tr_{rnets} + \tilde{c}p\tilde{r}_{rnets}) \cdot out_{rnets} \right]
 \end{aligned}$$

$$\sum_j out_{pjks} \geq \tilde{d}_{pkts} \quad \forall p, k, t, s \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\sum_n out_{rnets} \geq \tilde{d}_{retns} \quad \forall r, e, t, s \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\sum_l out_{pkls} \geq \tilde{r}_{pkts} \quad \forall p, k, t, s \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\tilde{r}_{pkts} = \tilde{q}_{Pk} \cdot \tilde{d}_{pkts} \quad \forall p, k, t, s \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\sum_i out_{pijts} + \sum_m out_{pmjts} \geq \sum_k out_{pjks} \quad \forall p, j, t, s \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\tilde{a}_{fpt} \cdot \sum_k out_{pkls} = \sum_n out_{plmts} \quad \forall p, l, t, s \quad \text{رابطه ۷}$$

$$(1 - \tilde{a}_{fpt}) \cdot \sum_k out_{pkls} = \sum_m out_{plmts} \quad \forall p, l, t, s \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_j out_{pmjts} = \sum_l out_{plmts} \quad \forall p, m, t, s \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_r \sum_e out_{rnets} \leq \sum_p \sum_l out_{plmts} \quad \forall n, t, s \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_p \sum_j out_{pijts} \leq mc_i \cdot \tilde{c}ap_i \quad \forall i, t, s \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\sum_p \sum_k out_{pjks} \leq dc_j \cdot \tilde{c}ad_j \quad \forall j, t, s \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\sum_p \sum_k out_{pkls} \leq cc_l \cdot \tilde{c}ac_l \quad \forall l, t, s \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_p \sum_l out_{plmts} \leq bc_m \cdot \tilde{c}ab_m \quad \forall m, t, s \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$\sum_p \sum_l out_{plmts} \leq rc_n \cdot \tilde{c}ar_n \quad \forall n, t, s \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$mc_i, dc_j, cc_l, bc_m, rc_n \in \{0,1\} \quad \forall i, j, l, m, n \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\begin{aligned} out_{pijts}, out_{pjks}, out_{pkls}, out_{plmts}, \\ out_{plmts}, out_{pmjts}, out_{rnets} \geq 0 \end{aligned} \quad \forall p, i, j, l, m, n, t, s \quad \text{رابطه ۱۷}$$

تابع هدف در رابطه ۱ بیان شده است که هزینه‌های زنجیره تأمین را حداقل می‌کند. این هزینه‌ها عبارت‌اند از: هزینه‌های ثابت بازگشایی تسهیلات، هزینه‌های متغیر پردازش در تسهیلات مختلف و هزینه‌های حمل‌ونقل بین تسهیلات زنجیره تأمین. رابطه ۲، محدودیت برآورده‌شدن تقاضای مراکز مشتریان در مسئله تحقیق را بیان کرده است. رابطه ۳، به محدودیت برآورده‌شدن تقاضای مشتریان مواد در زنجیره تأمین اشاره می‌کند. محدودیت جمع‌آوری اقلام برگشتی از همه نقاط مشتری، در رابطه ۴ بیان شده است. محدودیت میزان محصولات برگشتی از مراکز مشتری، در رابطه ۵ بیان شده است.

محدودیت مربوط به جریان محصولات از مراکز تولید و بازاریابی و ارسال به مراکز توزیع، در رابطه ۶ آمده است. جریان محصولات از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازاریابی، در محدودیت تعادلی ۷ اشاره شده است. جریان محصولات از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازاریابی، در محدودیت تعادلی ۸ بیان شده است. میزان محصولات ورودی از مراکز جمع‌آوری به مراکز بازاریابی، باید معادل میزان محصولات منتقل شده از مراکز بازاریابی به مراکز توزیع باشد که در محدودیت تعادلی ۹ آمده است. رابطه مربوط به محدودیت بین محصولات ارسال شده از مراکز جمع‌آوری به بازاریابی و مواد ارسالی از مراکز بازاریابی به محل مشتریان مواد، در رابطه ۱۰ بیان شده است.

حداکثر میزان محصولات ارسالی از هر مرکز تولید به مراکز توزیع، نباید از حداکثر ظرفیت مرکز تولید تجاوز کند که در محدودیت ۱۱ به آن اشاره شده است. حداکثر میزان محصولات ارسالی از هر مرکز توزیع، نباید از ظرفیت آن فراتر رود که در محدودیت ۱۲ آمده است. حداکثر میزان محصولات ارسالی از مراکز مشتری به هر مرکز جمع‌آوری، نباید فراتر از ظرفیت مرکز جمع‌آوری باشد که محدودیت ۱۳ آن را نشان می‌دهد. حداکثر میزان محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز بازاریابی، نباید از ظرفیت مرکز بازاریابی فراتر رود که در محدودیت ۱۴ بیان شده است. حداکثر میزان محصولات ارسالی از مراکز جمع‌آوری به هر مرکز بازاریابی، نباید از ظرفیت مرکز بازاریابی فراتر باشد که در محدودیت ۱۵ به آن اشاره شده است. متغیرهای صفر و یک مدل و متغیرهای غیرمنفی تعریف شده در مدل، به ترتیب در محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ بیان شده است.

رویکرد حل پیشنهادی

در این بخش رویکرد جدید برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار بر مبنای معیار Me برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ترکیبی شناختی و تصادفی و همچنین انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم توسعه داده می‌شود. در ابتدا، مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر تشریح می‌شود و در ادامه، مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار بیان می‌شود. سپس رویکرد برنامه‌ریزی امکانی و معیارهای امکان، الزام، اعتبار و Me تشریح می‌شود. در نهایت، مدل توسعه‌یافته برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی و تصادفی استوار بر مبنای معیار Me برای مسئله پیشنهادی بیان شده و مراحل خطی‌سازی و حل مسئله تشریح می‌شود.

رویکرد پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر^۱

در مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، ماتریس‌های A، B، S، T و N ضرایب محدودیت‌هاست و بردار N و d به ترتیب بیانگر ظرفیت تسهیلات و تقاضای مشتری است. همچنین بردارهای f و c به ترتیب مربوط به هزینه‌های ثابت بازگشایی تسهیلات و هزینه‌های متغیر و بردارهای x و y به ترتیب به عنوان متغیرهای پیوسته و صفرویک در نظر گرفته می‌شوند. مدل پایه برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر با فرض انعطاف‌پذیری محدودیت‌های اول و سوم، به شرح زیر است (پیشوایی و خلف، ۲۰۱۶؛ حسینی مطلق و همکاران، ۲۰۲۰):

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy, & \text{رابطه ۱۸} \\ \text{s.t.} & \\ Ax &\geq d, \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0 \end{aligned}$$

از دو عدد فازی \tilde{q} و \tilde{p} ، برای نشان دادن انحراف محدودیت‌های نرم استفاده شده است؛ بدین ترتیب، مدل ۱۸ به صورت رابطه ۱۹ تبدیل می‌شود (پیشوایی و خلف، ۲۰۱۶؛ موسی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ حسینی مطلق و همکاران، ۲۰۲۰).

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy & \text{رابطه ۱۹} \\ \text{s.t.} & \\ Ax &\geq d - \tilde{p}(1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny + [\tilde{q}(1 - \beta')]y, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0 \end{aligned}$$

حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر به وسیله پارامترهای α' و β' مشخص می‌شود. بر اساس روش رتبه‌بندی فازی پیشنهادی یاگر^۱ (۱۹۸۱)، چنانچه \tilde{t} و \tilde{r} اعداد فازی دوزنقه‌ای به فرم $\tilde{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ و $\tilde{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4)$ باشند، می‌توان معادل قطعی این اعداد را به صورت زیر تعریف کرد (پیشوایی و خلف، ۲۰۱۶؛ موسی‌زاده، ترابی، پیشوایی و ابوالحسنی^۲، ۲۰۱۸؛ حسینی مطلق و همکاران، ۲۰۲۰):

$$\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4} \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} \quad \text{رابطه ۲۱}$$

مدل رابطه ۱۹ با توجه به روابط ۲۰ و ۲۱، به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } E &= cx + fy, & \text{رابطه ۲۲} \\ \text{s.t. } Ax &\geq d - \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4}\right)(1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny + \left[\left(\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4}\right)(1 - \beta')\right]y, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0 \end{aligned}$$

در این روش، بر اساس نظرهای ذهنی تصمیم‌گیرندگان، حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر بر اساس آزمون و خطا تعیین می‌شود که بهینه‌بودن مقدار نهایی سطح رضایت در این روش دقیق نیست.

رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار^۱

طبق مطالعه پیشوایی و خلف (۲۰۱۶)، شکل فشرده مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{رابطه ۲۳)} \quad \text{Min } E &= cx + fy + \varphi \left[\left(\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4} \right) (1 - \alpha') \right] \\ &+ \Delta \left[\left(\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} \right) (1 - \beta') \right] y, \\ \text{s. t. } Ax &\geq d - \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4} \right) (1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \\ Sx &\leq Ny + \left[\left(\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} \right) (1 - \beta') \right] y, \\ Ty &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0, 0 \leq \alpha', \beta' \leq 1 \end{aligned}$$

مدل ارائه شده در رابطه ۲۳ به دلیل ضرب متغیرهای غیرخطی است. برای خطی‌سازی مدل ۲۳ از تغییر متغیر $g = \beta' y$ و اضافه کردن محدودیت‌های زیر استفاده می‌شود (فاضلی خلف، خلیل‌پور آذری و محمدی^۲، ۲۰۱۹؛ حسینی مطلق و همکاران، ۲۰۲۰):

$$\begin{aligned} \text{رابطه ۲۴)} \quad g &\leq My \\ g &\geq M(y - 1) + \beta' \\ g &\leq \beta' \\ g &\geq 0 \end{aligned}$$

بنابراین فرم خطی مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار به صورت زیر است (تساو و تانج^۳، ۲۰۱۹؛ یو و لی^۴، ۲۰۱۹؛ فاضلی خلف و همکاران، ۲۰۱۹):

$$\begin{aligned} \text{رابطه ۲۵)} \quad \text{Min } E &= cx + fy + \varphi \left[\left(\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4} \right) (1 - \alpha') \right] \\ &+ \Delta \left[\left(\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} \right) (y - g) \right], \\ \text{s. t.} \quad Ax &\geq d - \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4} \right) (1 - \alpha'), \\ Bx &= 0, \end{aligned}$$

1. Robust flexible programming model
2. Fazli Khalaf, Khalilpourazari & Mohammadi
3. Tsao & Thanh
4. Yu & Li

$$\begin{aligned}
 Sx &\leq Ny + \left[\left(\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} \right) (y - g) \right], \\
 g &\leq My \\
 g &\geq M(y - 1) + \beta' \\
 g &\leq \beta' \\
 g &\geq 0 \\
 Ty &\leq 1, \\
 y \in \{0,1\}, \quad x, g &\geq 0, 0 \leq \alpha', \beta' \leq 1,
 \end{aligned}$$

در این مدل، نیاز است که بررسی‌های تکراری و زمان‌بر از بین برود و حداقل سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر با حل مسئله بهینه شود. مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر استوار، قادر به کنترل استواری شدنی است و مدل نتایج استواری را ارائه می‌دهد (موسی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸؛ تساو و تانج، ۲۰۱۹؛ یو و لی، ۲۰۱۹).

برنامه‌ریزی امکانی^۱

برنامه‌ریزی امکانی، نوعی روش برنامه‌ریزی فازی شناخته می‌شود که از تئوری امکان نشئت گرفته است (ایویگوچی و رامیک^۲، ۲۰۰۰؛ ترابی و حسینی^۳، ۲۰۰۸). مدل برنامه‌ریزی امکانی، دارای دو معیار اندازه‌گیری امکان^۴ و الزام^۵ است. تئوری امکان، به حالت خوش‌بینانه و تئوری الزام، به حالت بدبینانه در نگرش تصمیم‌گیرندگان اشاره دارد (ایویگوچی و رامیک، ۲۰۰۰؛ موسی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸).

فرض کنید عدد فازی به صورت $\tilde{\epsilon} = (\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4), \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3 < \epsilon_4$ ، در نظر گرفته شود، مدل قطعی امکان و الزام در سطح $\alpha > 0/5$ ، به صورت زیر تعریف می‌شود (حسینی دهشیری، امیری، الفت و پیشوایی، ۱۴۰۱):

$$\mu_{\tilde{\epsilon}}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \epsilon_1 \text{ or } x \geq \epsilon_4 \\ \frac{x - \epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} & \epsilon_1 \leq x \leq \epsilon_2 \\ 1 & \epsilon_2 \leq x \leq \epsilon_3 \\ \frac{\epsilon_4 - x}{\epsilon_4 - \epsilon_3} & \epsilon_3 \leq x \leq \epsilon_4 \end{cases} \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$Pos \{ \tilde{\epsilon} \leq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x - \epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (1 - \alpha)\epsilon_1 + \alpha \cdot \epsilon_2 \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$Pos \{ \tilde{\epsilon} \geq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{\epsilon_4 - x}{\epsilon_4 - \epsilon_3} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (1 - \alpha)\epsilon_4 + \alpha \cdot \epsilon_3 \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$Nec \{ \tilde{\epsilon} \leq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x - \epsilon_3}{\epsilon_4 - \epsilon_3} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (1 - \alpha)\epsilon_3 + \alpha \cdot \epsilon_4 \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

1. Possibilistic programming
 2. Inuiguchi & Ramik
 3. Torabi & Hassini
 4. Possibility
 5. Necessity

$$Nec \{ \tilde{E} \geq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{\epsilon_2 - x}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (1 - \alpha)\epsilon_2 + \alpha \cdot \epsilon_1 \quad \text{رابطه ۳۰}$$

با توجه به اینکه اندازه اعتبار تنها از جواب‌های صرفاً خوش‌بینانه و بدبینانه جلوگیری می‌کند و به حد متوسط یا دو سر طیف محدود است، شو و جو (۲۰۱۳) اندازه فازی جدیدی به نام اندازه Me معرفی کردند. در این رویکرد، تصمیم‌گیرندگان با استفاده از پارامتر λ ترکیب محذبی از طیف خوش‌بینانه و بدبینانه را در مدل‌سازی در نظر می‌گیرند. اندازه Me به صورت زیر تعریف می‌شود (شو و جو، ۲۰۱۳):

$$Me \{A\} = \lambda \cdot Pos \{A\} + (1 - \lambda) \cdot Nec \{A\} \quad \text{رابطه ۳۱}$$

امید ریاضی اندازه امکان و الزام مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود (کارلسون و فولر^۱، ژانگ و ژانگ^۲، ۲۰۱۴؛ فرخ و همکاران، ۲۰۱۸؛ گونای، کرمر و زرین‌دشت^۳، ۲۰۲۰):

$$E^{Pos}[\tilde{E}] = 2 \int_0^1 \alpha (sup \tilde{E}_\alpha) d\alpha = 2 \int_0^1 \alpha g_{\tilde{E}}^{-1}(\alpha) d\alpha = \frac{2}{3}\epsilon_3 + \frac{1}{3}\epsilon_4 \quad \text{رابطه ۳۲}$$

$$E^{Nec}[\tilde{E}] = 2 \int_0^1 \alpha (inf \tilde{E}_\alpha) d\alpha = 2 \int_0^1 \alpha f_{\tilde{E}}^{-1}(\alpha) d\alpha = \frac{2}{3}\epsilon_2 + \frac{1}{3}\epsilon_1 \quad \text{رابطه ۳۳}$$

حال امید ریاضی اندازه Me با توجه به روابط ۳۱، ۳۲ و ۳۳ به صورت زیر محاسبه می‌شود (شو و جو، ۲۰۱۳؛ صدقیانی ترابی و صاحب جمع نیا^۴، ۲۰۱۵؛ رن^۵، ۲۰۱۸؛ دهقان و همکاران، ۲۰۱۸):

$$\begin{aligned} E^{Me}[\tilde{E}] &= \lambda \cdot E^{Pos}[\tilde{E}] + (1 - \lambda) \cdot E^{Nec}[\tilde{E}] \\ &= \lambda \cdot \left(\frac{2}{3}\epsilon_3 + \frac{1}{3}\epsilon_4 \right) + (1 - \lambda) \cdot \left(\frac{2}{3}\epsilon_2 + \frac{1}{3}\epsilon_1 \right) \\ &= \frac{1 - \lambda}{3} (2\epsilon_2 + \epsilon_1) + \frac{\lambda}{3} (2\epsilon_3 + \epsilon_4) \end{aligned} \quad \text{رابطه ۳۴}$$

فرم عمومی معیار Me با فرض $\tilde{E} \geq x$ و $\tilde{E} \leq x$ به صورت زیر است (شو و جو، ۲۰۱۳؛ صدقیانی ترابی و صاحب جمع نیا، ۲۰۱۵؛ رن، ۲۰۱۸؛ دهقان و همکاران، ۲۰۱۸):

$$Me\{\tilde{E} \leq x\} = \begin{cases} 0 & x \leq \epsilon_1 \\ \lambda \frac{x - \epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} & \epsilon_1 \leq x \leq \epsilon_2 \\ \lambda & \epsilon_2 \leq x \leq \epsilon_3 \\ \lambda + (1 - \lambda) \frac{x - \epsilon_3}{\epsilon_4 - \epsilon_3} & \epsilon_3 \leq x \leq \epsilon_4 \\ 1 & x \geq \epsilon_4 \end{cases} \quad \text{رابطه ۳۵}$$

1. Carlsson & Fullér
2. Zhang & Zhang
3. Günay, Kremer & Zarindast
4. Sadghiani, Torabi & Sahebjamnia
5. Ren

$$Me\{\tilde{\xi} \geq x\} = \begin{cases} 1 & x \leq \epsilon_1 \\ \lambda + (1 - \lambda) \frac{\epsilon_2 - x}{\epsilon_2 - \epsilon_1} & \epsilon_1 \leq x \leq \epsilon_2 \\ \lambda & \epsilon_2 \leq x \leq \epsilon_3 \\ \lambda \frac{\epsilon_4 - x}{\epsilon_4 - \epsilon_3} & \epsilon_3 \leq x \leq \epsilon_4 \\ 0 & x \geq \epsilon_4 \end{cases} \quad \text{رابطه ۳۶}$$

$$Me\{\tilde{\epsilon} \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \lambda + (1 - \lambda) \frac{x - \epsilon_3}{\epsilon_4 - \epsilon_3} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq \frac{(\alpha - \lambda)\epsilon_4 + (1 - \alpha)\epsilon_3}{(1 - \lambda)} \quad \text{رابطه ۳۷}$$

$$Me\{\tilde{\epsilon} \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \lambda + (1 - \lambda) \frac{\epsilon_2 - x}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq \frac{(\alpha - \lambda)\epsilon_1 + (1 - \alpha)\epsilon_2}{(1 - \lambda)} \quad \text{رابطه ۳۸}$$

برای هر عدد فازی دوزنقه‌ای $\tilde{\epsilon}$ ، انحراف مطلق امکانی^۱ بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (ژانگ و ژانگ، ۲۰۱۴؛ گونای و همکاران، ۲۰۲۰):

$$\sigma(\tilde{\epsilon}) = \frac{2}{3}(\epsilon_3 - \epsilon_2) + \frac{1}{3}(\epsilon_4 - \epsilon_1) \quad \text{رابطه ۳۹}$$

رویکرد جدید برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار^۲ پیشنهادی بر اساس معیار Me

به دلیل وجود عدم قطعیت‌های ترکیبی شناختی و تصادفی موجود در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین، از مدل برنامه‌ریزی امکانی تصادفی استفاده می‌شود. فرم فشرده مدل پایه برنامه‌ریزی امکانی تصادفی (BSPP)^۳ بر مبنای اندازه‌گیری Me به صورت رابطه زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } E[z] &= E[\tilde{f}]y + E[\tilde{c}_s]x_s && \text{رابطه ۴۰} \\ \text{s. t.} & \\ Me\{Ax_s \geq \tilde{d}_s\} &\geq \alpha_s, \\ Bx &= 0, \\ Me\{Sx_s \leq \tilde{N}y\} &\geq \beta_s, \\ Ty &\leq 1, \\ 0.5 < \alpha_s, \beta_s &\leq 1 \\ y \in \{0,1\}, x &\geq 0 \end{aligned}$$

حال، چنانچه انعطاف‌پذیری در محدودیت‌های نرم و عدم قطعیت‌های ترکیبی، هم‌زمان در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شود، باید از برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی و تصادفی استفاده کرد. در این مرحله، مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی و تصادفی، بر اساس اندازه‌گیری Me توسعه داده می‌شود که فرم کلی آن به صورت زیر است:

1. Possibilistic absolute deviation
 2. Robust Stochastic and Possibilistic Flexible Programming (RSPFP)
 3. Basic Stochastic- possibilistic Programming (BSPP)

$$\text{Min } E[z] = E[\tilde{f}]y + E[\tilde{c}_s]x_s \quad \text{رابطه ۴۱}$$

s. t.

$$Me\{Ax_s \gtrsim \tilde{d}_s\} \geq \alpha_s,$$

$$Bx = 0,$$

$$Me\{Sx_s \lesssim \tilde{N}y\} \geq \beta_s,$$

$$Ty \leq 1,$$

$$0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0$$

$E[\tilde{f}]y$ ، میانگین تابع هدف برای پارامترهای فازی است و $E[\tilde{c}_s]x_s$ ، تصادفی بوده و احتمال رخداد پارامترهای

تصادفی در مدل را بیان می‌کند. حال مدل به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Min } E[z] = E[\tilde{f}]y + \sum_s P_s [\tilde{c}_s]x_s \quad \text{رابطه ۴۲}$$

s. t.

$$Me\{Ax_s \gtrsim \tilde{d}_s\} \geq \alpha_s,$$

$$Bx = 0,$$

$$Me\{Sx_s \lesssim \tilde{N}y\} \geq \beta_s,$$

$$Ty \leq 1,$$

$$0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1,$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0.$$

در ادامه، مدل ۴۲ با استفاده از روابط ۳۴، ۳۷ و ۳۸ به مدل قطعی تبدیل می‌شود:

$$\text{Min } E[z] = \left(\frac{1-\lambda}{3} (2f_2 + f_1) + \frac{\lambda}{3} (2f_3 + f_4)\right)y + \sum_s P_s \cdot \left(\frac{1-\lambda}{3} (2c_{2s} + c_{1s}) + \frac{\lambda}{3} (2c_{3s} + c_{4s})\right) \cdot x_s \quad \text{رابطه ۴۳}$$

s.t.

$$Ax_s \gtrsim \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{4s} + (1 - \alpha_s)d_{3s}}{1 - \lambda},$$

$$Bx = 0,$$

$$Sx_s \lesssim \frac{(\beta_s - \lambda)N_{1s} + (1 - \beta_s)N_{2s}}{1 - \lambda},$$

$$Ty \leq 1,$$

$$0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1,$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0.$$

در این بخش، برای از بین بردن دشواری مربوط به تعیین حداقل سطح اطمینان و رفع انحراف تابع هدف تحت

عدم اطمینان ترکیبی، مدل برنامه‌ریزی استوار با پارامترهای تصادفی و امکانی جدید فرموله می‌شود. در این مدل، از

انحراف مطلق امکانی برای در نظر گرفتن انحراف تابع هدف از میانگین آن، استفاده می‌شود.

از رابطه $\sum_s P_s |E(z) - E(z_s)|$ ، برای در نظر گرفتن انحراف سناریویی تابع هدف اصلی استفاده می‌شود. بنابراین مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار با معیار Me به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \text{Min } E[z] + \gamma \sigma_{\bar{z}} + \Phi \sum_s P_s |E(z) - E(z_s)| & \quad \text{رابطه (۴۴)} \\ + \delta_1 \sum_s P_s \left[d_{4s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{4s} + (1 - \alpha_s)d_{3s}}{1 - \lambda} \right] \\ + \delta_2 \sum_s P_s \left[\frac{(\beta_s - \lambda)N_{1s} + (1 - \beta_s)N_{2s}}{1 - \lambda} - N_{1s} \right] \cdot y \end{aligned}$$

s. t.

$$Ax_s \geq \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{4s} + (1 - \alpha_s)d_{3s}}{1 - \lambda},$$

$$Bx = 0,$$

$$Sx_s \leq \frac{(\beta_s - \lambda)N_{1s} + (1 - \beta_s)N_{2s}}{1 - \lambda},$$

$$Ty \leq 1,$$

$$0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1,$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0,$$

با تعریف متغیر کمکی غیرمنفی $\varepsilon = \beta_s y$ و با اضافه کردن محدودیت‌های زیر و حذف قدرمطلق، مدل ۴۴ خطی می‌شود:

$$\varepsilon \leq My \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

$$\varepsilon \geq M(y - 1) + \beta_s$$

$$\varepsilon \leq \beta_s$$

$$\varepsilon \geq 0$$

با توجه به رویکرد ارائه‌شده یو و لی (۲۰۰۱)، و بر اساس رابطه‌های ۲۵، ۴۴ و ۴۵ شکل فشرده مدل خطی RSPFP بر مبنای اندازه‌گیری Me ، به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } E[z_1] + \gamma \cdot \sigma_{\bar{z}_1} + \Phi \cdot \sum_s P_s \cdot ((E(z) - E(z_s)) + 2\theta_s) & \quad \text{رابطه (۴۶)} \\ + \delta_1 \sum_s P_s \left[d_{4s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)\tilde{d}_{4s} + (1 - \alpha_s)d_{3s}}{1 - \lambda} \right] \\ + \delta_2 \sum_s P_s \left[\frac{(\varepsilon - \lambda y)N_{1s} + (y - \varepsilon)N_{2s}}{1 - \lambda} - N_{1s} \cdot y \right] \\ + \varphi \left[\left(\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4} \right) (1 - \alpha') \right] + \Delta \left[\left(\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} \right) (y - g) \right] \end{aligned}$$

s. t.

$$E(z) - E(z_s) + \theta_s \geq 0, \quad \forall s$$

$$Ax_s \geq \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{4s} + (1 - \alpha_s)d_{3s}}{1 - \lambda} - \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4} \right) (1 - \alpha'),$$

$$Bx = 0,$$

$$Sx_s \leq \frac{(\varepsilon - \lambda y)N_{1s} + (y - \varepsilon)N_{2s}}{1 - \lambda} + \left[\frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} \right] (y - g),$$

$$g \leq My$$

$$g \geq M(y - 1) + \beta'$$

$$g \leq \beta'$$

$$g \geq 0$$

$$\varepsilon \leq My$$

$$\varepsilon \geq M(y - 1) + \beta_s$$

$$\varepsilon \leq \beta_s$$

$$\varepsilon \geq 0$$

$$Ty \leq 1,$$

$$0 \leq \alpha', \beta' \leq 1,$$

$$0.5 < \alpha_s, \beta_s \leq 1,$$

$$y \in \{0,1\}, x, g, \varepsilon \geq 0, \theta_s \geq 0$$

روش مدل پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها، به‌روشنی واقع‌بینانه‌تری به مدل‌سازی مسئله می‌پردازد. در مدل پیشنهادی ارائه شده در این مطالعه، برخلاف مدل‌های واقع‌گرایانه امکانی مطالعه پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)، استواری بهینگی تنها به دو نقطه (حداقل و حداکثر مقدار تابع هدف) وابسته نیست. اندازه‌گیری انحراف مطلق امکانی تابع هدف، به کنترل بیشتر انحراف‌های تابع هدف و استواری بهینگی منجر می‌شود (گونای و همکاران، ۲۰۲۰). از طرفی، به دلیل محاسبه انحراف مقدار تابع هدف اصلی از مقدار تابع هدف تحت هر سناریو، نسبت به مدل امکانی استوار مطالعات پیشین، از دقت و استواری بیشتری برخوردار است.

مطالعه موردی و نتایج محاسباتی

در این بخش، مطالعه‌ای موردی در زنجیره تأمین حلقه بسته تولید کاغذسنگی در ایران، به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی انجام می‌شود. کارخانجات تولیدی، در دو مرکز قرار دارند و سه نوع محصول کاغذسنگی در سه ضخامت برای کاربردهای مختلف تولید می‌کنند. ۱. کاغذسنگی در ضخامت‌های نازک، برای کاربردهایی نظیر بسته‌بندی‌های غذایی؛ ۲. کاغذسنگی با ضخامت متوسط، برای انجام امور مربوط به چاپ؛ ۳. کاغذسنگی ضخیم، برای کاربردهایی نظیر مقوا. در این زنجیره تأمین، پنج مرکز به‌عنوان مراکز توزیع در نظر گرفته شده است که محصولات را به مراکز مشتری ارسال می‌کنند. یازده نقطه به‌عنوان مراکز مشتریان محصولات در نظر گرفته شده است که محصولات به صورت عمده و خرده در این مراکز به فروش می‌رسد. پنج مرکز نیز به‌عنوان مراکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است که ضمن جمع‌آوری محصولات بازگشتی، وظیفه تفکیک محصولات بازیاب‌شدنی و بازیافت‌شدنی را برعهده دارند. محصولات بازیاب‌شدنی، به تسهیلات بازیابی واقع در دو مرکز انتقال می‌یابند تا عملیات بازیابی انجام شود و پس از بازیابی، به مراکز توزیع منتقل می‌شوند. محصولات بازیاب‌نشده، به تسهیلات بازیافت واقع در دو مرکز انتقال می‌یابند و پس از بازیافت به محل مشتریان مواد در دو نقطه ارسال می‌شود. پارامترهای مسئله تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای مسئله تحقیق با توزیع یکنواخت

سناریو فازی				واحد	پارامتر
سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴		
۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳		
(۲۶۰-۱۴۰)	(۲۹۰-۱۷۰)	(۳۲۰-۲۰۰)	(۳۵۰-۲۳۰)	تن	$\bar{d}_{pkts, P=1}$
(۳۶۰-۱۹۰)	(۴۰۰-۲۳۰)	(۴۴۰-۲۷۰)	(۴۸۰-۳۱۰)	تن	$\bar{d}_{pkts, P=2}$
(۴۱۰-۲۴۰)	(۴۴۰-۲۷۰)	(۴۷۰-۳۰۰)	(۵۰۰-۳۳۰)	تن	$\bar{d}_{pkts, P=3}$
(۲۱۰-۹۰)				تن	\bar{d}_{rets}
(۲۷۰۰۰-۱۷۰۰۰)				تن	$\bar{c}ap_i$
(۱۹۰۰۰-۱۱۰۰۰)				تن	$\bar{c}ad_j$
(۱۸۰۰۰-۱۰۰۰۰)				تن	$\bar{c}ac_l$
(۱۹۰۰۰-۱۱۰۰۰)				تن	$\bar{c}ab_m$
(۱۹۰۰۰-۹۰۰۰)				تن	$\bar{c}ar_n$
(۵۵۰-۱۰۰)	(۶۰۵-۱۱۰)	(۶۷۰-۱۲۱)	(۷۳۳-۱۳۲)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}tr_{pijts}$
(۷۲۰-۱۲۰)	(۷۹۲-۱۳۲)	(۸۷۲-۱۴۶)	(۹۵۹-۱۶۰)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}tr_{pj kts}$
(۷۲۰-۱۲۰)	(۷۹۲-۱۳۲)	(۸۷۲-۱۴۶)	(۹۵۹-۱۶۰)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}tr_{pkts}$
(۵۵۰-۱۰۰)	(۶۰۵-۱۱۰)	(۶۷۰-۱۲۱)	(۷۳۳-۱۳۲)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}tr_{plmts}$
(۵۵۰-۱۰۰)	(۶۰۵-۱۱۰)	(۶۷۰-۱۲۱)	(۷۳۳-۱۳۲)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}tr_{plnts}$
(۵۵۰-۱۰۰)	(۶۰۵-۱۱۰)	(۶۷۰-۱۲۱)	(۷۳۳-۱۳۲)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}tr_{pmjts}$
(۶۰۰-۱۰۰)	(۶۶۰-۱۱۰)	(۷۲۶-۱۲۱)	(۷۹۹-۱۳۳)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}tr_{rnets}$
(۶۰۰-۲۰۰)	(۶۶۰-۲۲۰)	(۷۲۶-۲۴۲)	(۷۹۹-۲۶۷)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}p\bar{m}_{pits}$
(۲۵۰-۱۵۰)	(۲۷۰-۱۷۰)	(۲۹۰-۱۹۰)	(۳۱۰-۲۱۰)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}pd_{pjts}$
(۲۵۰-۱۵۰)	(۲۷۰-۱۷۰)	(۲۹۰-۱۹۰)	(۳۱۰-۲۱۰)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}pc_{plts}$
(۴۰۰-۲۰۰)	(۴۴۰-۲۴۰)	(۴۸۰-۲۸۰)	(۵۲۰-۳۲۰)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}pb_{pmts}$
(۴۰۰-۲۰۰)	(۴۴۰-۲۴۰)	(۴۸۰-۲۸۰)	(۵۲۰-۳۲۰)	تومان ۱۰۰۰X	$\bar{c}pr_{rnets}$
(۲۴۰۰۰۰۰-۱۸۰۰۰۰۰)				تومان ۱۰۰۰X	$\bar{f}m_i$
(۱۲۰۰۰۰۰-۹۰۰۰۰۰)				تومان ۱۰۰۰X	$\bar{f}d_j$
(۱۱۰۰۰۰۰-۸۰۰۰۰۰)				تومان ۱۰۰۰X	$\bar{f}c_l$
(۱۴۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰)				تومان ۱۰۰۰X	$\bar{f}b_m$
(۱۸۰۰۰۰۰-۱۲۰۰۰۰)				تومان ۱۰۰۰X	$\bar{f}r_n$
(۴۰-۲۰)				درصد	\bar{q}_{Pk}
(۳۰-۱۵)				درصد	$\bar{a}f_{pt}$

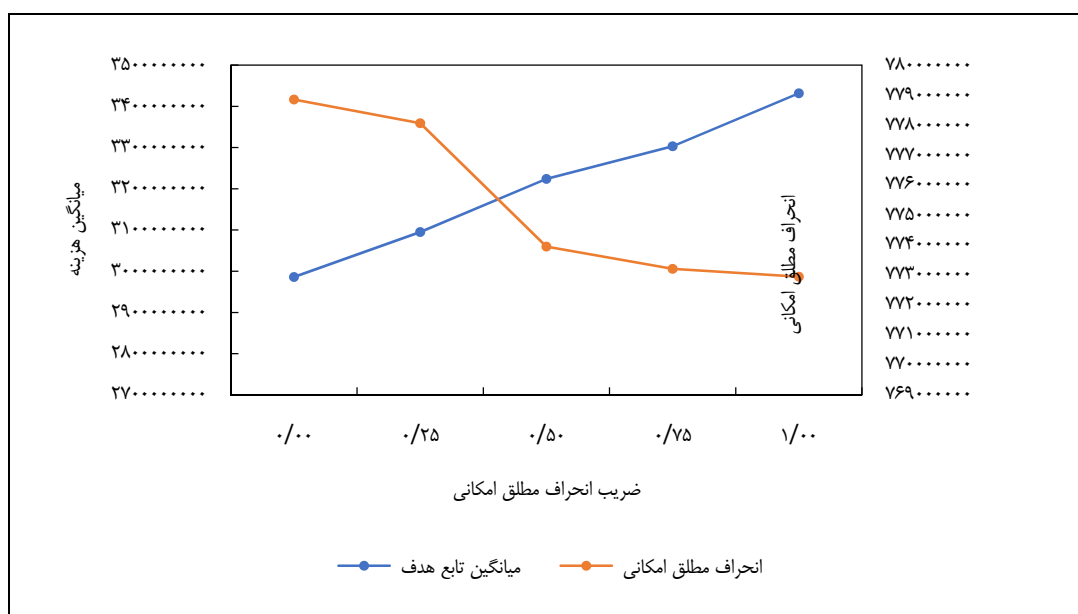
در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی دو دوره شش‌ماهه و چهار سناریو در نظر گرفته می‌شود. سناریو ۱ مربوط به حالت کم، سناریو ۲ مربوط به حالت معمولی، سناریو ۳ مربوط به حالت زیاد و سناریو ۴ مربوط به حالت

خیلی زیاد است که به ترتیب با توزیع احتمال ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۳، در برنامه ریزی مبتنی بر سناریو فازی در نظر گرفته می شود. برای هر پارامتر غیرقطعی از نوع شناختی، از اعداد فازی دوزنقه ای و برای پارامترهای غیرقطعی از نوع تصادفی، از اعداد فازی دوزنقه ای مبتنی بر هر سناریو که دارای توزیع یکنواخت اند، استفاده می شود. در ادامه با استفاده از نرم افزار گمز، نسخه ۲۴/۸ با حل کننده سیپلکس، مدل پیشنهادی حل شده و با استفاده از تحلیل استواری، تحلیل حساسیت عملکرد مدل در مورد مطالعاتی بررسی می شود. سپس با استفاده از شبیه سازی و تولید داده های اسمی از طریق مدل تحقق، مدل پیشنهادی با مدل های مشابه مقایسه می شود.

تحلیل استواری

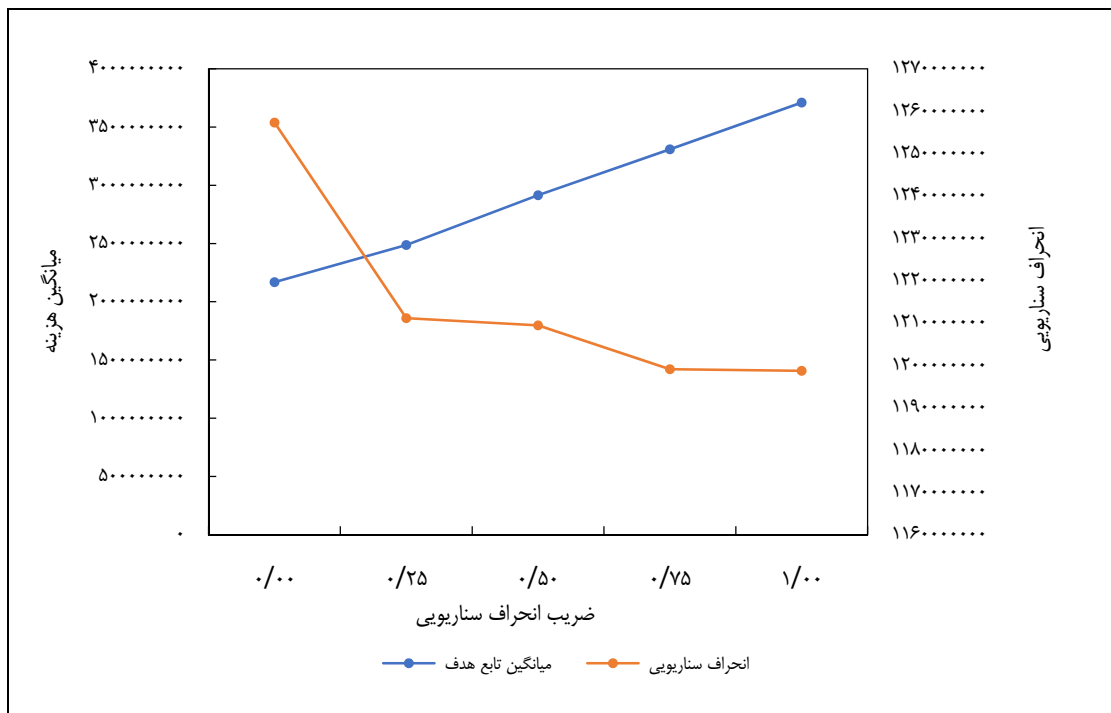
به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، با تغییر در ضرایب انحراف های مطلق امکانی و انحراف های سناریویی تابع هدف، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و انحراف محدودیت های انعطاف پذیر، تحلیل استواری انجام می گیرد که نتایج در هر مرحله تشریح می شود.

اثرهای تغییر ضریب انحراف امکانی در تابع هدف، در شکل ۳ ارائه شده است. در شرایطی که ضریب انحراف امکانی صفر باشد، ریسک تصمیم گیری در بالاترین سطح قرار می گیرد و در این حالت، میانگین تابع هدف، پایین ترین مقدار را دارد. همچنین، در شرایطی که ضریب انحراف امکانی افزایش یابد، میزان انحراف مطلق امکانی کاهش می یابد.



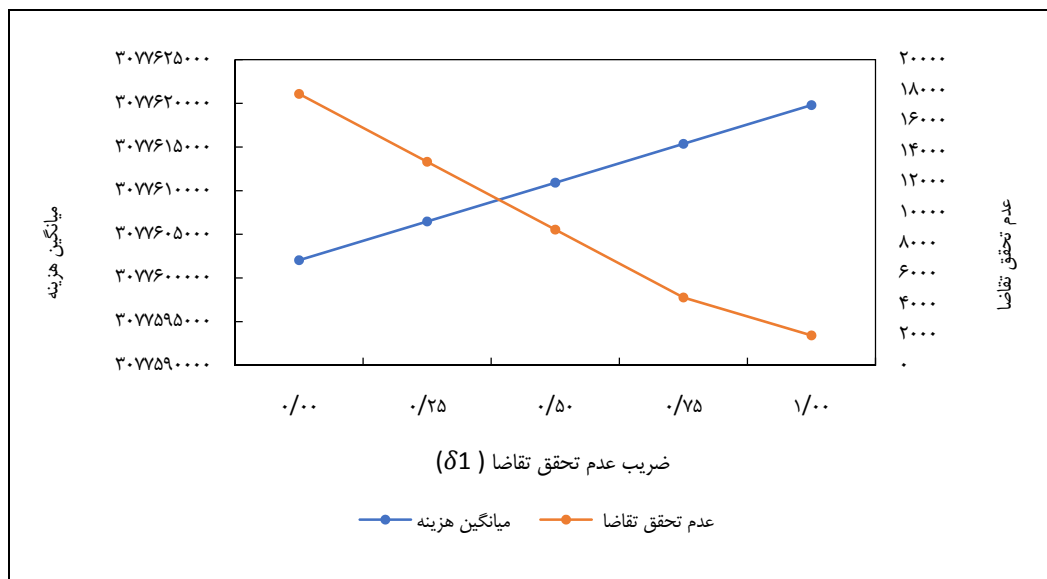
شکل ۳. تحلیل استواری انحراف مطلق امکانی

شکل ۴ تحلیل اثرهای تغییر در ضریب انحراف سناریویی در میانگین تابع هدف را نشان می دهد. با توجه به نتایج، در شرایطی که ضریب انحراف سناریویی صفر باشد، ریسک تصمیم گیری در بالاترین سطح قرار دارد و با افزایش ضریب انحراف سناریویی، میزان انحراف سناریویی کاهش می یابد. با تغییر ضریب انحراف سناریویی می توان تبدالی بین انحراف سناریویی و متوسط تابع هدف ایجاد کرد.

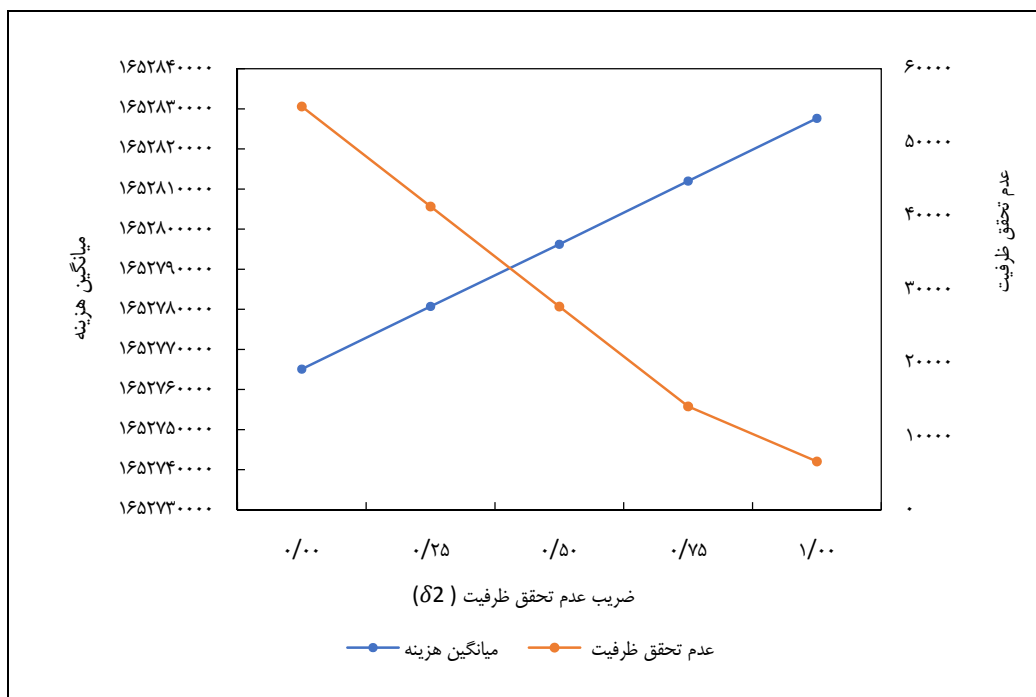


شکل ۴. تحلیل استواری انحراف سناریویی

در شرایطی که ضریب جریمه عدم تحقق تقاضا و ظرفیت صفر باشد، میانگین تابع هدف در پایین سطح قرار می‌گیرد. استواری شدنی مدل با افزایش ضریب جریمه δ_1 و δ_2 افزایش می‌یابد و از میزان عدم تحقق تقاضا و ظرفیت کاسته می‌شود. بنابراین با تغییر جریمه عدم تحقق تقاضا و ظرفیت، می‌توان تبدلی بین استواری شدنی و میانگین هزینه ایجاد کرد. نتایج تحلیل استواری عدم تحقق تقاضا و ظرفیت در شکل ۵ ارائه شده است.

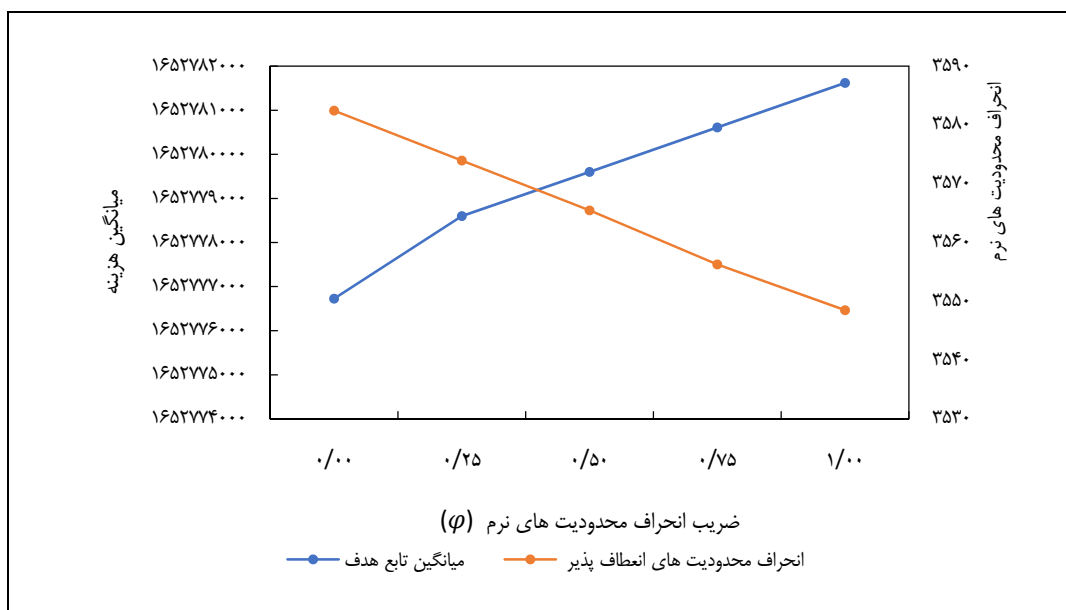


شکل ۵. الف) تحلیل استواری عدم تحقق تقاضا

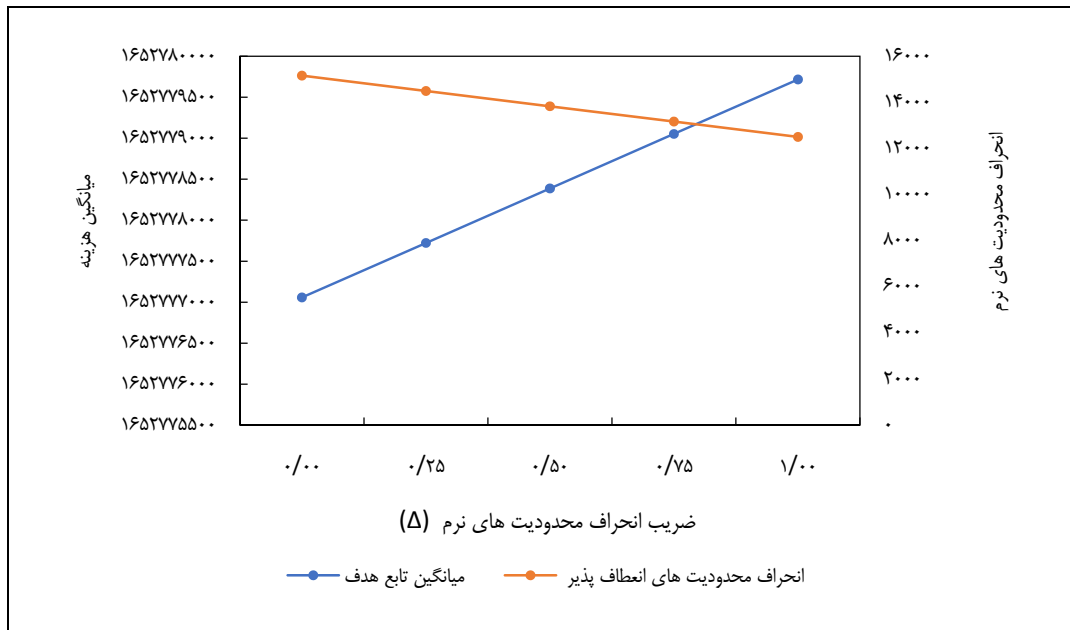


شکل ۵. ب) تحلیل استواری عدم تحقق ظرفیت

در شکل ۶ نتایج تحلیل استواری محدودیت‌های انعطاف‌پذیر ارائه شده است. در شرایطی که ضرایب انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر صفر باشد، میزان انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر در بالاترین مقدار قرار دارد و با افزایش ضرایب جریمه انحراف محدودیت‌های انعطاف‌پذیر، مقدار انحراف محدودیت‌های نرم کاهش پیدا می‌کند و میانگین تابع هدف به دلیل افزایش استواری شدنی، افزایش می‌یابد.



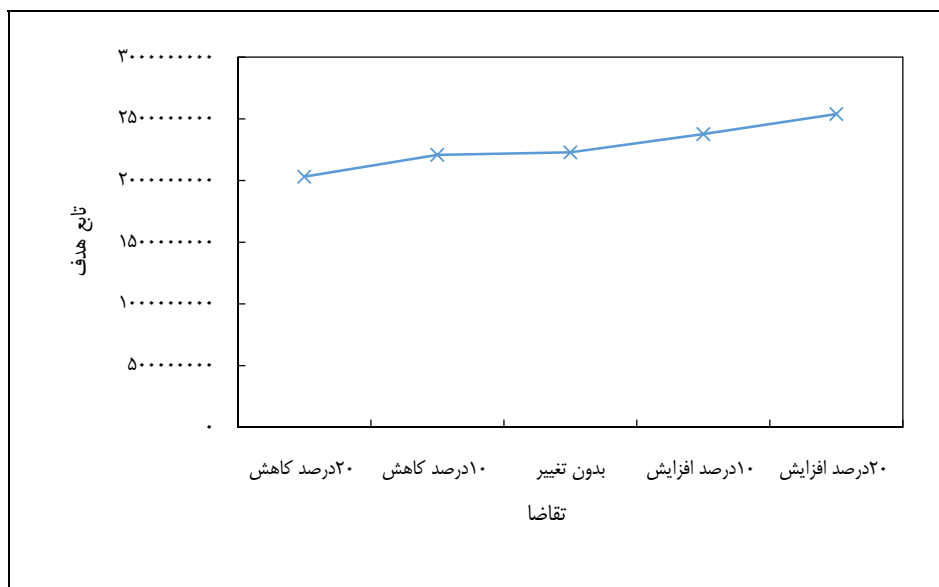
شکل ۶. الف) نتایج تحلیل استواری محدودیت‌های انعطاف‌پذیر



شکل ۶. ب) نتایج تحلیل استواری محدودیت‌های انعطاف‌پذیر

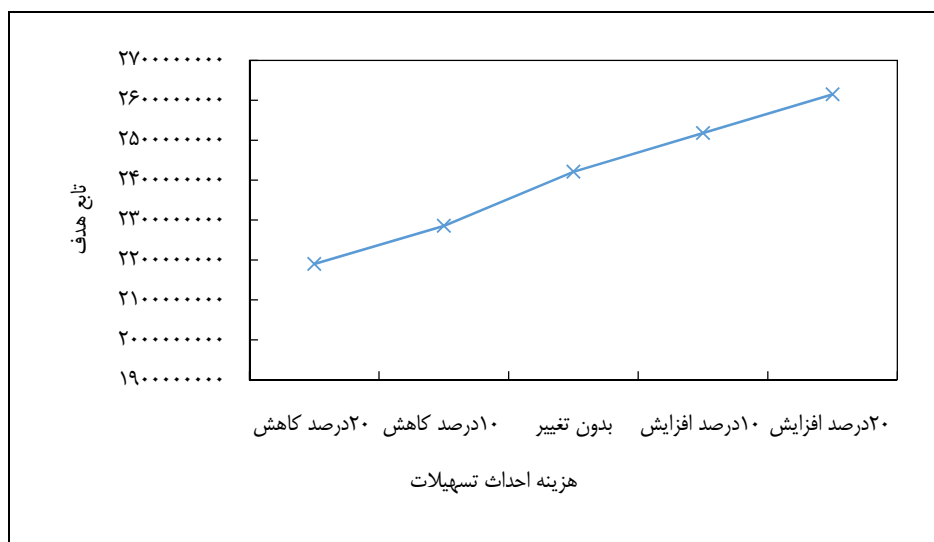
تحلیل حساسیت

در این بخش، اثرهای تغییر تقاضای محصولات و هزینه ثابت افتتاح مراکز در تابع هدف بررسی و نتایج تحلیل می‌شود. دامنه تقاضا از ۲۰ درصد کاهش تا ۲۰ درصد افزایش متغیر بوده و اثرهای این تغییرات در تابع هدف بررسی شده است. در سطوح پایین تقاضا، تسهیلات کمتری در زنجیره تأمین ایجاد می‌شود و با افزایش تقاضا، مراکز بیشتری مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه، هزینه‌های ثابت و هزینه‌های پردازش افزایش می‌یابد. رابطه تقاضا و هزینه مستقیم است. در شکل ۷ نتایج تحلیل حساسیت تقاضا مشاهده می‌شود.



شکل ۷. نتایج تحلیل حساسیت تقاضای محصولات

هزینه افتتاح مراکز بر تعداد مراکز فعال و هزینه‌های شبکه تأثیر دارد. به‌منظور تحلیل حساسیت در این مرحله، اثرهای تغییر هزینه‌های افتتاح در تابع هدف، در محدوده ۲۰ درصد کاهش تا ۲۰ درصد افزایش بررسی شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که هزینه افتتاح مراکز با تابع هدف ارتباط مستقیم دارد؛ به‌طوری که با افزایش هزینه افتتاح مراکز، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد و برعکس. نتایج تحلیل حساسیت هزینه احداث مراکز در شکل ۸ آمده است.



شکل ۸. تحلیل حساسیت هزینه افتتاح مراکز

ارزیابی اعتبار رویکرد پیشنهادی

در این مرحله با استفاده از مدل تحقق و از طریق تولید داده‌های اسمی، اعتبار نتایج مدل پیشنهادی RSPFP با مدل پایه برنامه‌ریزی امکانی و تصادفی (BSPP) و مدل قطعی، مقایسه می‌شوند. در مدل BSPP انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم و استواری بهینگی و استواری شدنی در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین در مدل قطعی، تمامی پارامترها به‌صورت قطعی در نظر گرفته می‌شوند و عدم قطعیت شناختی، عدم قطعیت تصادفی و انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم در نظر گرفته نشده و بهینه‌سازی استوار در مدل اعمال نمی‌شود. بنابراین عملکرد مدل‌های RSPFP، BSPP و قطعی، بر اساس میزان در نظر گرفتن انواع عدم قطعیت در شرایط دنیای واقعی، بر مبنای داده‌های مورد مطالعاتی با استفاده از مدل تحقق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

با استفاده از توزیع احتمال یکنواخت، به ازای هر پارامتر غیرقطعی، داده‌های تصادفی تولید شده و مدل ارزیابی می‌شود. اگر عدد فازی دوزنقه‌ای $\tilde{c}_i = (c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}, c_{i4})$ ، بیانگر پارامتر غیرقطعی باشد، در مدل تحقق در هر مرتبه اجرای مدل، در بازه (c_{i1}, c_{i4}) ، یک عدد اسمی ایجاد می‌شود. جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل‌های RSPFP، BSPP و قطعی، از طریق داده‌های تصادفی تولید شده، در مدل تحقق جایگزین شده و باهم مقایسه می‌شوند. فرم فشرده مدل تحقق در رابطه زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \min Z &= f^{\text{real}} \cdot Y^* + c_s^{\text{real}} \cdot x_s^* + \eta_1 R_1 + \Lambda_1 R_2 && \text{رابطه (۴۷)} \\ \text{s. t.} & \\ S \cdot X_s^* &\leq N^{\text{real}} \cdot Y^* + R_1 \\ A \cdot X_s^* + R_2 &\geq d^{\text{real}} \\ B \cdot X_s^* &= 0 \\ R_1, R_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

میزان تخطی از محدودیت‌های شانس ظرفیت و تقاضا، از طریق متغیرهای R_1 و R_2 بیان شده است. در مدل تحقق، به ازای مقادیر متفاوت پارامتر λ و بر اساس داده‌های اسمی تولید شده، سه مدل RSPFP، BSPP و قطعی بر اساس میانگین و انحراف استاندارد تابع هدف باهم مقایسه می‌شوند. نتایج ارزیابی، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج عملکرد مدل‌های BSPP، RSPFP و قطعی

$\lambda = 0/9$			$\lambda = 0/5$			$\lambda = 0$			شماره تحقق
RSPFP	BSPP	مدل قطعی	RSPFP	BSPP	مدل قطعی	RSPFP	BSPP	مدل قطعی	
۲۸۲۵	۹۵۶۱	۱۴۷۶۸	۳۴۰۱	۱۱۹۵۱	۱۷۴۵۶	۳۸۵۱	۱۵۵۳۶	۲۶۵۴۳	۱
۲۸۵۲	۹۴۱۱	۱۳۶۸۱	۳۴۳۲	۱۰۷۶۴	۱۶۸۷۳	۳۶۷۴	۱۵۲۹۳	۲۳۵۷۳	۲
۲۸۹۹	۹۳۹۲	۱۳۹۸۵	۳۴۷۱	۱۱۷۴۰	۱۸۶۳۵	۳۶۴۸	۱۵۲۶۲	۱۹۵۶۳	۳
۲۸۱۷	۱۰۵۷۶	۱۴۲۳۸	۳۲۷۶	۱۱۹۷۰	۱۶۲۹۴	۳۷۴۸	۱۵۵۶۱	۲۲۴۵۲	۴
۲۸۹۵	۹۴۹۲	۱۳۸۴۷	۳۳۶۶	۱۱۰۹۱	۱۷۸۸۴	۳۸۴۶	۱۵۴۲۴	۲۴۶۸۹	۵
۲۹۳۱	۹۴۹۴	۱۳۷۱۸	۳۴۰۸	۱۱۸۷۴	۱۹۲۱۱	۳۵۵۲	۱۵۴۲۸	۲۳۴۵۶	۶
۲۹۱۴	۹۴۹۷	۱۳۵۸۹	۳۳۸۸	۱۱۷۹۴	۱۸۱۳۹	۳۷۵۹	۱۲۴۳۲	۲۳۷۶۵	۷
۲۸۳۹	۱۰۵۰۰	۱۵۴۶۱	۳۴۱۸	۱۱۰۶۷	۱۸۲۶۶	۳۷۶۵	۱۵۴۳۷	۲۳۱۶۷	۸
۲۸۱۳	۹۵۰۲	۱۳۳۳۲	۳۲۷۱	۱۰۲۴۳	۱۸۳۹۴	۳۸۷۱	۱۵۴۴۱	۲۲۹۸۶	۹
۲۸۹۰	۹۵۰۵	۱۳۲۰۴	۳۳۶۱	۱۱۸۱۱	۱۸۵۲۲	۳۷۷۸	۱۵۴۴۵	۲۳۱۹۸	۱۰
۲۸۶۸	۹۶۹۳	۱۳۹۸۲	۳۳۷۹	۱۱۴۳۱	۱۷۹۶۷	۳۷۴۹	۱۵۱۲۶	۲۳۳۳۹	میانگین تابع هدف
۴۱	۴۲۵	۶۵۰	۶۱	۵۶۹	۸۲۹	۹۵	۹۰۲	۱۶۶۰	انحراف معیار

اعتبار نتایج مدل RSPFP در انطباق با شرایط دنیای واقعی، در جدول ۳ ارائه شد. در سطوح ریسک‌پذیری پایین تصمیم‌گیران ($\lambda = 0$)، مقادیر میانگین و واریانس تابع هدف در بدترین حالت خود است و با افزایش سطح ریسک‌پذیری، فضای موجه افزایش یافته و مقادیر میانگین و واریانس تابع هدف بهبود می‌یابد. بنابراین با افزایش مقادیر سطح ریسک‌پذیری تصمیم‌گیران، مقادیر میانگین و انحراف معیار تابع هدف در تمامی مدل‌ها بهبود می‌یابد. کمترین مقدار میانگین و انحراف معیار مربوط به مدل RSPFP در سطح $\lambda = 0/9$ و بهترین عملکرد مربوط به مدل RSPFP است.

نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های BSPP، RSPFP و قطعی نشان داد که مدل RSPFP به دلیل در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های شناختی، تصادفی، انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم و در نظر گرفتن استواری بهینگی و شدنی، به‌منظور

پیاده‌سازی در دنیای واقعی، بهترین عملکرد را دارد و در نتیجه، جواب‌های ارائه شده با استفاده از رویکرد RSPFP در شرایط مختلف عدم قطعیت، نسبت به مدل‌های BSPP و قطعی، از واقع‌بینی و استواری و دقت بیشتری برخوردار است.

کاربردها و بینش‌های مدیریتی

در این مطالعه رویکرد RSPFP برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای توسعه محصولات کاغذسنگی در ایران ارائه شد. در رویکرد پیشنهادی، انواع مختلف عدم قطعیت شناختی و تصادفی و انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. مدیران زنجیره تأمین می‌توانند با استفاده از نتایج این مطالعه، به راه‌حل‌های انعطاف‌پذیری در شرایط مختلف عدم قطعیت دست یابند. کاربردهای بسیار مهم مدیریتی مطالعه حاضر، به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت عبارت‌اند از:

- معرفی کاربرد واقعی جدیدی برای توسعه محصولات کاغذسنگی در ایران با در نظر گرفتن موضوعات اقتصادی برای مدیران و تصمیم‌گیران در سطوح مختلف زنجیره تأمین، به‌منظور افزایش مزیت رقابتی در بازار متلاطم امروزی با مدنظر قراردادن عدم قطعیت و پارامترهای تصادفی تحت سناریوهای مختلف؛
- فراهم کردن مدل‌سازی انواع مختلف عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی و همچنین، انعطاف‌پذیری محدودیت‌های نرم به‌صورت هم‌زمان در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته و بهبود چشمگیر در نظر گرفتن عدم قطعیت برای مدیران در سطوح مختلف زنجیره تأمین و تصمیم‌گیری در شرایط واقع‌بینانه؛
- در نظر گرفتن بهینه‌سازی استوار با هدف یافتن راه‌حلی که به تغییر پارامترها در شرایط مختلف عدم قطعیت حساسیت کمتری داشته باشد و بهبود تصمیم‌گیری در سطوح مختلف ریسک‌پذیری و عدم قطعیت برای مدیران و تصمیم‌گیران زنجیره تأمین؛
- توسعه اندازه‌گیری Me در برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، کاهش مراحل حل مسئله و فراهم کردن راه‌حل‌های انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه‌تر نسبت به اندازه‌گیری‌های امکانی و الزام برای مدیران و تصمیم‌گیران، از طریق در نظر گرفتن ترکیب محدب سطح ریسک‌پذیری مدیران؛
- حل مشکل بررسی‌های تکراری مدیران و تصمیم‌گیران برای تعیین حداقل سطح رضایت از محدودیت‌های انعطاف‌پذیر و تعیین بهینه سطح رضایت محدودیت‌های انعطاف‌پذیر از طریق حل مدل استوار پیشنهادی؛
- پیشنهاد حل واقع‌بینانه و انعطاف‌پذیر مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین، از طریق ایجاد تبادل بین تابع هدف و سطح ریسک‌پذیری تصمیم‌گیران و مدیران از طریق تغییر فضای موجه در معیار Me در رویکرد RSPFP؛
- فراهم کردن ترکیب محدب انواع مختلف دیدگاه‌های بدبینانه و خوش‌بینانه مدیران، از طریق تغییر فضای موجه، بر اساس مقادیر مختلف پارامتر λ در اندازه‌گیری Me و پیشنهاد راه‌حل‌های انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی در رویکرد RSPFP.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به‌طور کلی، بر اساس مطالعات صورت‌گرفته در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، کمبودهایی در زمینه مدل‌سازی تحت

عدم قطعیت وجود دارد که اکثر تحقیقات رویکردی جامع و انعطاف‌پذیر به‌منظور مدل‌سازی تحت عدم قطعیت برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه نمی‌دادند. همچنین تحقیقات اندکی به استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی تحت عدم قطعیت ترکیبی با محدودیت‌های انعطاف‌پذیر در چارچوب بهینه‌سازی استوار، برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند و در زمینه استفاده هم‌زمان از محدودیت‌های انعطاف‌پذیر و عدم قطعیت‌های تصادفی و شناختی، خلأ تحقیقاتی وجود دارد. در راستای کمبودهای تحقیقاتی، در این مطالعه رویکرد جدید برنامه‌ریزی فازی استوار، از طریق یکپارچه‌سازی رویکردهای برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، امکانی و تصادفی استوار، بر مبنای اندازه‌گیری Me توسعه داده شد. در مدل پیشنهادی، همه پارامترهای مدل دارای عدم قطعیت بودند که برای پارامترهایی که اطلاعات کافی در دسترس نبود، از توزیع امکانی استفاده شد و برای پارامترهایی با ذات تصادفی در افق‌های زمانی بلندمدت در قالب سناریوهای مختلف، از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شد؛ بنابراین از پارامترهای غیرقطعی از نوع شناختی و تصادفی، برای پاسخ‌گویی به عدم قطعیت استفاده شد. از طرفی در این مدل، تنها به معیارهای امکان، الزام و اعتبار توجه نشده است؛ زیرا جواب‌های این معیارها، به حد وسط یا دو سر طیف خوش‌بینانه و بدبینانه محدود بود. با استفاده از مدل پیشنهادی، نه تنها می‌توان با عدم قطعیت ترکیبی پارامترها مواجه شد؛ بلکه در این رویکرد، با استفاده از پارامتر λ ، می‌توان ترکیب محدودی از طیف خوش‌بینانه و بدبینانه، بر اساس اندازه‌گیری Me در نظر گرفت. بررسی مطالعات انجام شده نشان داد که در برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی و تصادفی استوار، از اندازه‌گیری Me برای لحاظ‌کردن نظرهای تصمیم‌گیران به‌صورت واقع‌بینانه استفاده نشده است که از این حیث نیز، مطالعه حاضر نوآور است. نیاز به بررسی‌های ذهنی و تکراری تصمیم‌گیران، از طریق لحاظ‌کردن سطح رضایت، به‌عنوان متغیر در مدل رفع شده است؛ به‌طوری که سطح رضایت به‌صورت بهینه بعد از حل مسئله محاسبه می‌شود. از طرفی، به‌دلیل استواری شدنی و بهینگی در مدل پیشنهادی، انحراف‌های امکانی، انحراف‌های تصادفی، عدم تحقق تقاضا و ظرفیت و نقض محدودیت‌های نرم، در مدل کنترل شده است. برخلاف مدل‌های واقع‌گرایانه امکانی مطالعه پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)، استواری بهینگی، تنها به دو نقطه (حداقل و حداکثر مقدار تابع هدف) وابسته نیست و استفاده از اندازه‌گیری انحراف مطلق تابع هدف، به کنترل بیشتر انحراف‌های تابع هدف و استواری بهینگی منجر می‌شود. استفاده از راه‌حل‌های با واریانس کم، به‌خصوص در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک که به سرمایه‌گذاری‌های زیادی نیاز دارند، به استواری کمک می‌کند. کاهش انحراف مطلق امکانی، علاوه بر کاهش متوسط هزینه جریمه برای موارد تخطی، امکان هزینه جریمه بالا را کاهش می‌دهد و از استواری بیشتری برخوردار است. در این مطالعه، اهداف اقتصادی، از طریق حداقل‌سازی هزینه کل طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شد. مطالعه‌ای موردی در زنجیره تأمین تولید کاغذسنگی، به‌منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی انجام شد که کاربردی جدید برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت است و از این جنبه نیز تحقیق حاضر نوآوری دارد. مدل پیشنهادی قادر بود که راه‌حل‌های استوار و واقع‌بینانه‌ای را در شرایط مختلف تصمیم‌گیری، بر اساس نظرهای خبرگان ارائه دهد که با انجام تحلیل حساسیت و تحلیل استواری و ارزیابی مدل با داده‌های تصادفی، این نتایج تأیید شد.

در این پژوهش، شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی، به‌کمک رویکرد برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار، بر اساس معیار Me و با استفاده مدل خطی پیشنهادی طراحی شد. در رویکرد پیشنهادی به‌دلیل

خطی بودن مدل، جواب‌های بهینه کلی به دست آمد؛ اما در بسیاری از مسائل با ابعاد بزرگ و با پارامترهای غیرخطی، ممکن است امکان خطی‌سازی مدل فراهم نباشد. علاقه‌مندان به این حوزه می‌توانند در پژوهش‌های آتی، به ارائه رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری کارآمد، برای حل مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت ترکیبی در ابعاد بزرگ اقدام کنند.

با توجه به موضوع اهمیت غذایی در دنیا، کاربرد رویکرد پیشنهادی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین مواد غذایی، به ویژه مواد غذایی فاسدپذیر، به عنوان مورد مطالعاتی کاربردی پیشنهاد می‌شود. همچنین در این مطالعه، تنها هدف اقتصادی در طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شد و محققان می‌توانند در تحقیقات آتی، اهداف اجتماعی و زیست‌محیطی همچون میزان اشتغال، توسعه مناطق به‌ازای بازگشایی تسهیلات و میزان انتشار کربن را در طراحی شبکه زنجیره تأمین در نظر بگیرند.

منابع

- آئینه‌وند، سروزاز و غلامیان، محمدرضا (۱۳۹۹). ارائه مدل مکان‌یابی - موجودی فرآورده‌های خونی (پلاکت) در زنجیره تأمین خون بر اساس سیستم سفارش‌دهی EOQ. *مدیریت صنعتی*، ۱۲(۴)، ۶۰۹ - ۶۳۳.
- امیری، مقصود؛ حسینی دهشیری، سیدجلال‌الدین و یوسفی هنومرور، احمد (۱۳۹۷). تعیین ترکیب بهینه استراتژی‌های زنجیره تأمین لارج با بهره‌گیری از تحلیل SWOT، تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و تئوری بازی. *مدیریت صنعتی*، ۱۰(۲)، ۲۲۱-۲۴۶.
- حسینی دهشیری، سید جلال‌الدین؛ امیری، مقصود؛ الفت، لعیا و پیشوایی، میرسامان (۱۴۰۱). طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته کاغذسنگی با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۲(۱)، ۴۵-۸۱.
- خلیلی، سید محمد؛ پویا، علیرضا؛ کاظمی، مصطفی و فکور ثقیه، امیر محمد (۱۴۰۱). طراحی یک شبکه زنجیره تأمین بنزین پایدار و تاب‌آور تحت شرایط عدم قطعیت اختلال (مطالعه موردی: شبکه زنجیره تأمین بنزین استان خراسان رضوی). *مدیریت صنعتی*، ۱۴(۱)، ۲۷-۷۹.
- سیبویه، علی؛ آذر، عادل و زندیه، مصطفی (۱۴۰۰). ارائه مدل دومرحله‌ای احتمالی استوار برای طراحی زنجیره تأمین خون تاب‌آور با در نظر گرفتن اختلال زلزله و بیماری واگیردار. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۴)، ۶۶۴-۷۰۳.
- مؤمنی، منصور و زرشکی، نیما (۱۴۰۰). مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته با به‌کارگیری از سناریوها در مواجهه با عدم قطعیت در کمیت و کیفیت برگشتی‌ها. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۱)، ۱۰۵-۱۳۰.

References

- Aienh Vand, S., & Gholamian, M. (2020). A location-inventory model of blood products (platelet) in the blood supply chain based on the EOQ ordering system. *Industrial Management Journal*, 12(4), 609-633. (in Persian)

- Amiri, M., Hosseini Dehshiri, S. J., & Yousefi Hanoomarvar, A. (2018). Determining the optimal combination of LARG supply chain strategies using SWOT analysis, multi-criteria decision-making techniques and game theory. *Industrial Management Journal*, 10(2), 221-246. (in Persian)
- Atabaki, M. S., Mohammadi, M., & Naderi, B. (2020). New robust optimization models for closed-loop supply chain of durable products: Towards a circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, 146, 106520.
- Baghalian, A., Rezapour, S., & Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational Research*, 227(1), 199-215.
- Boronoos, M., Mousazadeh, M., & Torabi, S. A. (2021). A robust mixed flexible-possibilistic programming approach for multi-objective closed-loop green supply chain network design. *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 3368-3395. doi:10.1007/s10668-020-00723-z
- Carlsson, C., & Fullér, R. (2001). On possibilistic mean value and variance of fuzzy numbers. *Fuzzy sets and systems*, 122(2), 315-326.
- Dehghan, E., Nikabadi, M. S., Amiri, M., & Jabbarzadeh, A. (2018). Hybrid robust, stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 123, 220-231.
- Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594-615.
- Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2018). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 341, 69-91.
- Fazli-Khalaf, M., Khalilpourazari, S., & Mohammadi, M. (2019). Mixed robust possibilistic flexible chance constraint optimization model for emergency blood supply chain network design. *Annals of operations research*, 283(1), 1079-1109.
- Gaur, J., Amini, M., & Rao, A. (2017). Closed-loop supply chain configuration for new and reconditioned products: An integrated optimization model. *Omega*, 66, 212-223.
- Ghahremani Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert systems with applications*, 116, 454-471.
- Gilani, H., & Sahebi, H. (2021). Optimal Design and Operation of the green pistachio supply network: A robust possibilistic programming model. *Journal of Cleaner Production*, 282, 125212.
- Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108-141.
- Govindan, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2015). Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand

- using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic. *Computers & Operations Research*, 62, 112-130.
- Günay, E. E., Kremer, G. E. O., & Zarindast, A. (2020). A multi-objective robust possibilistic programming approach to sustainable public transportation network design. *Fuzzy sets and systems*, 422, 106-129.
- Habib, M. S., Asghar, O., Hussain, A., Imran, M., Mughal, M. P., & Sarkar, B. (2021). A robust possibilistic programming approach toward animal fat-based biodiesel supply chain network design under uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 278, 122403.
- Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvae, M. S. (2022). Stone Paper Closed-Loop Supply Chain Network Design using Robust Stochastic, Possibilistic and Flexible Chance-constrained Programming. *Journal of Industrial Management Perspective*, 12(1, Spring 2022), 45-81. (in Persian)
- Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvae, M. S. (2022). Multi-objective closed-loop supply chain network design: A novel robust stochastic, possibilistic, and flexible approach. *Expert Systems with Applications*, 206, 117807. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117807>
- Hosseini-Motlagh, S.-M., Samani, M. R. G., & Cheraghi, S. (2020). Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives. *Socio-economic planning sciences*, 70, 100725.
- Inuiguchi, M., & Ramík, J. (2000). Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem. *Fuzzy sets and systems*, 111(1), 3-28.
- Khalili, S., Pooya, A., Kazemi, M., & Fakoor Saghieh, A. (2022). Designing a Sustainable and Resilient Gasoline Supply Chain Network under Uncertainty (Case study: Gasoline Supply Chain Network of Khorasan Razavi Province). *Industrial Management Journal*, 14(1), 27-79. (in Persian)
- Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283-293.
- Liu, B., & Liu, Y.-K. (2002). Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 10(4), 445-450.
- Liu, Y., Ma, L., & Liu, Y. (2021). A novel robust fuzzy mean-UPM model for green closed-loop supply chain network design under distribution ambiguity. *Applied Mathematical Modelling*, 92, 99-135. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.042>
- Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A., & Syed, M. N. (2017). Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 146-172.
- Momeni, M., & Zeresghi, N. (2021). Modeling of Closed-Loop Supply Chains by Utilizing Scenario-Based Approaches in Facing Uncertainty in Quality and Quantity of Returns. *Industrial Management Journal*, 13(1), 105-130. (in Persian)

- Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & Chemical Engineering*, 82, 115-128.
- Mousazadeh, M., Torabi, S. A., Pishvae, M. S., & Abolhassani, F. (2018). Health service network design: a robust possibilistic approach. *International transactions in operational research*, 25(1), 337-373.
- Mousazadeh, M., Torabi, S. A., Pishvae, M., & Abolhassani, F. (2018). Accessible, stable, and equitable health service network redesign: A robust mixed possibilistic-flexible approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 113-129.
- Pishvae, M. S., & Khalaf, M. F. (2016). Novel robust fuzzy mathematical programming methods. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 407-418.
- Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
- Pishvae, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637-649.
- Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 206, 1-20.
- Ren, A. (2018). Solving the General Fuzzy Random Bilevel Programming Problem Through \$ Me \$ Measure-Based Approach. *IEEE Access*, 6, 25610-25620.
- Sadghiani, N. S., Torabi, S., & Sahebjamnia, N. (2015). Retail supply chain network design under operational and disruption risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 95-114.
- Sibevei, A., Azar, A., & Zandieh, M. (2022). Developing a Two-stage Robust Stochastic Model for Designing a Resilient Blood Supply Chain Considering Earthquake Disturbances and Infectious Diseases. *Industrial Management Journal*, 13(4), 664-703. (in Persian)
- Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, 662-673.
- Torabi, S. A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy sets and systems*, 159(2), 193-214.
- Torabi, S., Namdar, J., Hatefi, S., & Jolai, F. (2016). An enhanced possibilistic programming approach for reliable closed-loop supply chain network design. *International Journal of Production Research*, 54(5), 1358-1387.
- Tsao, Y.-C., & Thanh, V.-V. (2019). A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an

- uncertain environment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 124, 13-39.
- Velte, C. J., & Steinhilper, R. (2016). *Complexity in a circular economy: A need for rethinking complexity management strategies*. Paper presented at the Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK.
- Wang, J., & Wan, Q. (2022). A multi-period multi-product green supply network design problem with price and greenness dependent demands under uncertainty. *Applied Soft Computing*, 114, 108078. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108078>
- Xu, J., & Zhou, X. (2013). Approximation based fuzzy multi-objective models with expected objectives and chance constraints: Application to earth-rock work allocation. *Information Sciences*, 238, 75-95.
- Yu, C.-S., & Li, H.-L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 385-397.
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2020). A fuzzy-stochastic multi-objective model for sustainable planning of a closed-loop supply chain considering mixed uncertainty and network flexibility. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121702.
- Yu, L., & Li, Y. (2019). A flexible-possibilistic stochastic programming method for planning municipal-scale energy system through introducing renewable energies and electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 207, 772-787.
- Zhang, P., & Zhang, W.-G. (2014). Multiperiod mean absolute deviation fuzzy portfolio selection model with risk control and cardinality constraints. *Fuzzy sets and systems*, 255, 74-91.
- Zhang, W.-G., & Xiao, W.-L. (2009). On weighted lower and upper possibilistic means and variances of fuzzy numbers and its application in decision. *Knowledge and information systems*, 18(3), 311-330.