



Designing a Resilient Three-level Intertwined Supply Network under Disruption and Uncertainty

Farahnaz Rahmani Meybodi

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Management and Information Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: f_rahmanimeybodi@sbu.ac.ir

Akbar Alem Tabriz *

*Corresponding Author, Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Management and Information Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a-tabriz@sbu.ac.ir

Mostafa Zandiyeh

Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Management and Information Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_zandieh@sbu.ac.ir

Davood Talebi

Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Management and Information Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: d-talebi@sbu.ac.ir

Abstract

Objective

The intertwined supply chain refers to a network of interconnected supply chains that, through long-term collaboration, can deliver products and services to multiple customers, even in the face of various disruptions. In the case of the tiles and ceramics industry, it is essential to enhance resilience and integration across all chains to address issues such as capacity limitations at centers, which are often due to the unavailability of raw materials and production machinery caused by sanctions. These challenges have led to inadequate production management and increased costs. The aim of this research is to design a resilient three-level intertwined supply network capable of withstanding disruptions and uncertainty while simultaneously increasing profit and enhancing resilience.

Methods

This research employs a capacity development strategy and supplier separation to address disruptions at centers and uses fuzzy chance-constrained programming to tackle demand

uncertainty. The model of this research is a multi-product, multi-period, mixed-integer linear programming model. To solve the bi-objective optimization (profit and risk), the augmented epsilon constraint method was used, resulting in a Pareto solution set. To validate the model, real data related to the intertwined supply network of tiles and ceramics (interconnected supply chains of tiles and ceramics, glaze, and alumina balls) were used, and the model was solved using GAMS software.

Results

Based on the model output and the results of the decision variables, profit increased by three percent in the deterministic case compared to the uncertain case, while risk decreased by seven percent. The numerical results of the sensitivity analysis show that changing the epsilon parameter from zero to five-hundredths and from five-hundredths to one-tenth leads to a two to seven percent increase in profit. Additionally, the optimal capacity increase in the alumina ball production center is twenty percent, in the tile production center is ten percent, and in the glaze production center is thirty percent.

Conclusion

In the current global context, where the evolution of supply chains is moving towards intertwined supply networks, there are very few studies conducted on these networks. Given the nature of the intertwined supply network, the presented general model facilitates the transfer of raw materials or products through both intra-chain relationships (such as between suppliers and producers, and between producers and customers) and inter-chain relationships (such as between suppliers of one chain and those of another, between producers of one chain and those of another, between customers (production centers) of one chain and customers (final) of another, and the reverse relationship from producers of one chain to suppliers of another). The model simultaneously considers strategic decisions, including the selection of centers that require capacity increases, while optimizing operational decisions (such as production levels, inventory levels, and transportation levels) accordingly.

Keywords: Fuzzy programming, Intertwined supply network, Mathematical modeling, Resilience, Uncertainty.

Citation: Rahmani Meybodi, Farahnaz; Alem Tabriz, Akbar; Zandiyeh, Mostafa & Talebi, Davood (2024). Designing a Resilient Three-level Intertwined Supply Network under Disruption and Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 16(4), 502-534. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2024, Vol. 16, No 4, pp. 502-534

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2024.381366.1008177>

Article Type: Research Paper

© Authors

Received: May 23, 2024

Received in revised form: September 14, 2024

Accepted: October 16, 2024

Published online: December 02, 2024





طراحی شبکه تأمین درهم آمیخته سه سطحی تاب آور تحت اختلال و عدم قطعیت

فرحناز رحمانی میبیدی

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: f_rahmanimeybodi@sbu.ac.ir

اکبر عالم تبریز *

* نویسنده مسئول، استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a-tabriz@sbu.ac.ir

مصطفی زندیه

استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_zandieh@sbu.ac.ir

داوود طالبی

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: d-talebi@sbu.ac.ir

چکیده

هدف: شبکه تأمین درهم آمیخته، مجموعه‌ای از زنجیره‌های تأمین به هم پیوسته است که با همکاری بلندمدت میان این زنجیره تأمین‌ها تحت اختلال‌های متعدد، می‌تواند محصولات و خدمات را به مشتریان متعدد ارائه کند. در صنعت کاشی و سرامیک اختلال‌هایی وجود دارد، مانند اختلال در ظرفیت مراکز که از در دسترس نبودن مواد اولیه و ماشین‌آلات تولیدی، به دلیل اعمال تحریم‌ها نشئت گرفته و به عدم مدیریت تولید مناسب و افزایش هزینه‌ها منجر شده است. شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک برای مواجهه با این اختلال‌ها، می‌بایست تاب‌آوری و یکپارچگی را در تمامی زنجیره‌ها افزایش دهد. هدف پژوهش، طراحی شبکه تأمین درهم آمیخته سه سطحی تاب‌آور، تحت اختلال و عدم قطعیت با افزایش سود و تاب‌آوری است.

روش: این پژوهش برای مواجهه با اختلال در مراکز، از استراتژی توسعه ظرفیت و جداسازی تأمین‌کننده و در مواجهه با عدم قطعیت پارامتر تقاضا، از روش برنامه‌ریزی مقید به شانس فازی استفاده کرده است. مدل این پژوهش از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای چند محصولی است. برای حل بهینه‌سازی دو هدفه (سود و ریسک) از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده استفاده شده و مجموعه جواب پارتو به دست آمده است. برای اعتبارسنجی مدل، از داده‌های واقعی مربوط به شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک (زنجیره تأمین‌های به هم پیوسته کاشی و سرامیک، لعاب و گلوله آلومینا) استفاده شده و در آخر، به کمک نرم‌افزار گمز حل شده است.

یافته‌ها: بر اساس خروجی مدل و نتایج متغیرهای تصمیم در حالت قطعی نسبت به حالت غیرقطعی، میزان سود ۳ درصد افزایش و میزان ریسک ۷ درصد کاهش داشته است. نتایج عددی تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که تغییر مقدار پارامتر اپسیلون، سطح خطا در

عدم ارضای قیود فازی، از صفر به $0/05$ و از $0/05$ به $0/1$ به ترتیب باعث افزایش ۲ تا ۷ درصدی سود می‌شود. همچنین در حالت مطلوب، میزان افزایش ظرفیت در مرکز تولید گلوله آلومینا، ۲۰ درصد، در مرکز تولید کاشی ۱۰ درصد و در مرکز تولید لعاب ۳۰ درصد است.

نتیجه‌گیری: در شرایط کنونی جهان که زنجیره تأمین‌ها به سمت شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته تکامل می‌یابد، تعداد مطالعات صورت گرفته روی این شبکه‌ها بسیار اندک است. با توجه به ماهیت شبکه تأمین درهم‌آمیخته، مدل عمومی ارائه شده، امکان ارسال مواد خام یا محصولات از روابط درون زنجیره‌ای (شامل رابطه میان تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان و رابطه میان تولیدکنندگان و مشتریان) و همچنین از روابط بین زنجیره‌ای (شامل رابطه بین تأمین‌کنندگان یک زنجیره با تأمین‌کنندگان زنجیره دیگر، رابطه بین تولیدکنندگان یک زنجیره با تولیدکنندگان زنجیره دیگر، رابطه میان مشتریان (مراکز تولید) یک زنجیره با مشتریان (نهایی) زنجیره دیگر، رابطه برگشتی تولیدکنندگان یک زنجیره به تأمین‌کنندگان زنجیره دیگر) وجود دارد و مدل به‌طور هم‌زمان تصمیم‌های استراتژیکی همچون انتخاب مجموعه‌ای از مراکز نیازمند به افزایش ظرفیت را در نظر می‌گیرد و تصمیم‌های عملیاتی (میزان تولید، میزان انبارش و میزان حمل‌ونقل) بر این اساس بهینه می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: شبکه تأمین درهم‌آمیخته، تاب‌آوری، مدل‌سازی ریاضی، عدم قطعیت، برنامه‌ریزی فازی.

استناد: رحمانی میبیدی، فرحناز؛ عالم تبریز، اکبر؛ زندیه، مصطفی و طالبی، داوود (۱۴۰۳). طراحی شبکه تأمین درهم‌آمیخته سه سطحی تاب‌آور تحت اختلال و عدم قطعیت. *مدیریت صنعتی*، ۱۶(۴)، ۵۰۲-۵۳۴.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

doi: <https://doi.org/10.22059/IMJ.2024.381366.1008177>

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۳، دوره ۱۶، شماره ۴، صص. ۵۰۲-۵۳۴

ناشر: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان

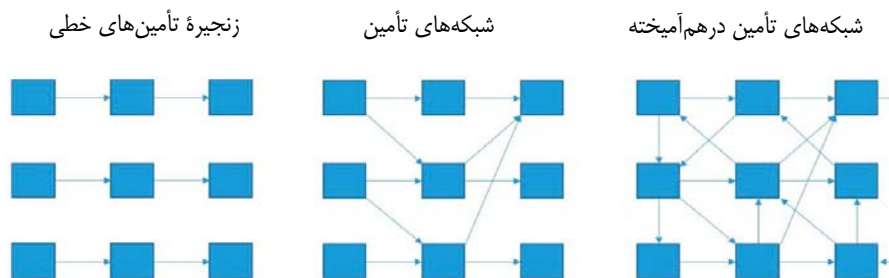
مقدمه

امروزه تغییرات سریع، کسب و کارها را به سمت جهانی شدن سوق داده و نقش عدم قطعیت و ریسک را در طراحی شبکه تأمین برجسته کرده است (کوردو، کلیبی و نیکل^۱، ۲۰۲۱). جهانی شدن در کنار فرصت‌ها، چالش‌های جدیدی را ایجاد می‌کند؛ زیرا تعداد پیوندها و ارتباطات میان شرکت‌ها در یک شبکه از طریق جهانی شدن افزایش می‌یابد و زنجیره‌های تأمین را مستعد اختلال در جریان مواد و محصولات می‌کند (چن، سوها و پراجوگو^۲، ۲۰۱۳). اختلال‌ها^۳ گروهی از ریسک‌ها هستند که به صورت پیش‌بینی‌ناپذیر، جریان مواد را در شبکه‌های تأمین دچار مشکل می‌کنند (صدیق‌پور، ۱۳۹۸) و روی شبکه تأثیرهای مهمی می‌گذارند؛ مانند در دسترس نبودن مواد خام، تأخیر در زمان‌های تحویل و افزایش هزینه‌ها (قانع، کونتراس و کوردآو^۴، ۲۰۲۳). بنابراین ضرورت تاب‌آوری در سیستم‌های پیچیده^۵ که شبکه‌های تأمین درهم آمیخته^۶ نمونه‌ای از آن‌هاست، اهمیت پیدا می‌کند (ایوانف و دولگوی^۷، ۲۰۲۰).

شبکه تأمین درهم آمیخته مجموعه‌ای از زنجیره‌های تأمین به هم پیوسته با ساختارهای پویاست که با همکاری یکدیگر، به طور مؤثر محصولات و خدمات را به مشتریان متعدد ارائه می‌کند. شرکت‌ها در این نوع شبکه‌ها رفتارهای مختلفی را با تغییر نقششان (خریدار - تأمین کننده^۸) در زنجیره تأمین‌های به هم پیوسته یا زنجیره تأمین‌های رقابتی از خود نشان می‌دهند و رفتارهای شرکت‌ها به طور پویا تغییر می‌کنند. شکل ۱، به خوبی تفاوت شبکه‌های تأمین درهم آمیخته را با شبکه تأمین و زنجیره تأمین نشان می‌دهد.

تاب‌آوری شبکه‌های تأمین را قادر می‌سازد تا برای اختلال‌ها به خوبی آماده شوند، تأثیر آن‌ها را به سرعت کاهش دهند، بازیابی شوند و حتی عملکرد عملیاتی خود را افزایش دهند. در حال حاضر تمرکز روزافزونی بر توسعه مفاهیم و روش‌شناسی برای شبکه‌های تأمین تاب‌آور وجود دارد؛ اما بیشتر کارها بر جنبه‌های کیفی آن متمرکز شده‌اند (حسینی، ایوانف و دولگوی^۹، ۲۰۱۹) و فقط مطالعات محدودی مدل‌های کمی را برای تجزیه و تحلیل تاب‌آوری شبکه تأمین درهم آمیخته تحت رویدادهای اختلال ارائه داده‌اند. به منظور طراحی شبکه تأمین درهم آمیخته، محققان مطالعاتی از منظر تاب‌آوری^{۱۰} (قانع و همکاران، ۲۰۲۳؛ فیض‌آبادی، گلیگور و چوی^{۱۱}، ۲۰۲۱)، مانایی^{۱۲} (ایوانف و دولگوی، ۲۰۲۰؛ وانگ و یائو^{۱۳}، ۲۰۲۱؛ بهت و الجنیدی^{۱۴}، ۲۰۲۳) و پایداری^{۱۵} (گوربانوا و اوگولنیتسکی^{۱۶}، ۲۰۲۲) انجام داده‌اند.

1. Cordeau, Klibi & Nickel
2. Chen, Sohal & Prajogo
3. Disruptions
4. Ghanei, Contreras & Cordeau
5. Complex Systems
6. Intertwined Supply Networks
7. Ivanov & Dolgui
8. Buyer
9. Hosseini, Ivanov & Dolgui
10. Resilience
11. Feizabadi, Gligor & Choi
12. viability
13. Wang & Yao
14. Bhat & Aljuneidi
15. Sustainability
16. Gorbaneva & Ougolnitsky



شکل ۱. زنجیره تأمین های خطی، شبکه های تأمین، شبکه های تأمین درهم آمیخته

منبع: ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰)

در شبکه های تأمین درهم آمیخته، همه عناصر باید برای مقابله با اختلال ها تاب آور باشند. بنابراین، همکاری^۱ بین آن ها در مدیریت اختلال ها نقش مهمی ایفا می کند (شکریان و ملت پرست^۲، ۲۰۲۰). همکاری در شبکه ها به صورت افقی و عمودی در نظر گرفته می شود. هدف همکاری عمودی ترکیب تأمین کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع کنندگان برای ارائه کارآمدترین خدمات به مشتری از نظر زمان، کیفیت و هزینه است. همکاری افقی همکاری بین شرکت هایی است که عملیات مشابهی را در همان سطح از زنجیره تأمین انجام می دهند. ترکیب همکاری عمودی و افقی، به عنوان همکاری جانبی^۳ شناخته می شود که به ندرت در ادبیات بررسی شده است (قانع و همکاران، ۲۰۲۳). اختلال ها و فروپاشی شبکه های تأمین و زنجیره تأمین، شبکه های تأمین درهم آمیخته و مسائل مربوط به بقای بازار را به خط مقدم بحث های مدیریت ریسک تبدیل کرده است. برای افزایش تاب آوری قانع و همکاران (۲۰۲۳) از سه استراتژی افزایش تاب آوری شامل توسعه ظرفیت، افزایش ظرفیت و بازیابی راه ها بهره برده اند. وانگ و یائو (۲۰۲۱) در مقابله با اختلال های حمل و نقل و مسیر با در نظر گرفتن جفت مسیر تأمین، تاب آوری را افزایش داده اند. ایوانف (۲۰۲۳) با استفاده از ظرفیت ها و موجودی های مشترک در شبکه، باعث ارتقای تاب آوری در شبکه شده است. در مواجهه با عدم قطعیت های مختلف، دهشیری، امیری، الفت و پیشوایی^۴ (۲۰۲۲) از رویکرد ترکیبی استوار و فازی و تصادفی و دهشیری و امیری^۵ (۲۰۲۴) از رویکرد برنامه ریزی استوار و تصادفی - احتمالی مبتنی بر سناریو استفاده کرده اند.

صنعت کاشی و سرامیک یکی از صنایعی است که به دلیل وفور مواد اولیه آن در ایران، طی دهه اخیر رشد چشمگیری داشته و در کانون توجه صنعتگران ایرانی قرار گرفته است (تقی زاده یزدی، بیوکی و محمدی بالانی، ۱۳۹۵). با رشد این صنعت، چالش های گوناگونی افزایش یافته است که مدیران باید آن ها را مدیریت کنند. اهمیت و حساس بودن شبکه تأمین کاشی در ایران و افزایش سریع هزینه های تولید و تأمین در آن، زنجیره های این شبکه را بر آن داشته است تا به دنبال کاهش هزینه ها باشند، از این رو همواره زنجیره ها سعی در بهبود عملکرد شبکه تأمین دارند. صنعت کاشی و سرامیک تعداد زیادی تأمین کننده و صنایع وابسته به آن را شامل می شود که همه اینها مدیریت تولید این

1. Collaboration
2. Shekarian & Mellat Parast
3. Lateral collaboration
4. Dehshiri, Amiri, Olfat & Pishvae
5. Dehshiri & Amiri

واحدها را پیچیده کرده است. طبق تعریف شبکه‌های تأمین درهم آمیخته در تحقیق ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰)، شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک، شامل زنجیره‌های تأمین به هم پیوسته کاشی و سرامیک، لعاب، گلوله‌های آلومینیایی است و نقش مراکز تولید گلوله‌های آلومینیایی و لعاب، به عنوان نقش تأمین کننده برای مرکز تولید کاشی و سرامیک تغییر می‌کند. بنابراین تصمیم‌هایی که در جهت حداکثر کردن منافع کل شبکه اتخاذ می‌شود، توانایی استفاده از منافع موجود را به اعضای شبکه می‌دهد تا به حداکثر کارایی دست یابند و بقای آن‌ها در بازار را تضمین کند.

در این پژوهش مسئله شبکه تأمین درهم آمیخته سه سطحی تاب آور چند دوره‌ای (RISNMP)^۱ تحت عدم قطعیت و اختلال معرفی می‌شود که دو هدف سود و تاب‌آوری را دنبال می‌کند و هر زنجیره تأمین در این شبکه شامل مجموعه‌ای از تأمین کنندگان، مراکز تولیدی و مشتریان (نهایی یا تولیدکننده) است. مسئله به صورت چند دوره‌ای و چند محصولی طراحی شده است تا بتواند تصمیمات مربوط به مدیریت شبکه را به درستی اتخاذ کند. این مدل از استراتژی‌های افزایش تاب‌آوری برای کاهش تأثیر منفی اختلال‌ها استفاده کرده و مدل پیشنهادی به طور هم‌زمان تصمیم‌های استراتژیک را که شامل انتخاب مجموعه‌ای از امکاناتی است که به افزایش ظرفیت نیاز دارند، در نظر می‌گیرد و تصمیم‌های عملیاتی بر این اساس بهینه می‌شوند. همچنین مدل در برخورد با عدم قطعیت پارامتر فازی تقاضا از روش برنامه‌ریزی مقید به شانس فازی استفاده می‌کند.

در ادامه، مبانی نظری و پیشینه پژوهش بررسی قرار می‌شود. در بخش سوم به تعریف پارامترها، متغیرهای پژوهش و پس از آن، به تشریح ساختار مدل ریاضی شبکه تأمین درهم آمیخته تاب‌آور در حالت قطعی و غیرقطعی پرداخته شده است. در بخش چهارم، مثال کاربردی در شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک حل و اعتبارسنجی شده و تحلیل حساسیت روی پارامتر مؤثر بر تابع هدف انجام شده است. در پایان بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

پیشینه پژوهش

در این بخش با توجه به حیطه مسئله در نظر گرفته شده پژوهش، در زیربخش پیشینه نظری، مفهوم شبکه تأمین درهم آمیخته و تاب‌آوری به همراه بررسی آن در طراحی شبکه تأمین درهم آمیخته مدنظر قرار گرفته است. در زیربخش پیشینه تجربی، حیطه بررسی مقاله‌های گسترش یافته و مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین و شبکه تأمین درهم آمیخته با مفهوم تاب‌آوری بررسی می‌شوند. در انتها نیز ضمن مقایسه و بیان تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های مشابه، سهم این پژوهش در ادبیات موضوع تبیین می‌شود.

پیشینه نظری

شبکه‌های تأمین درهم آمیخته

در اوایل قرن ۲۰۰۰، ایده‌های تشکیل زنجیره تأمین پویا، اولین تحولات را در زمینه شرکت‌های مجازی و شبکه‌های مشترک شکل داد (چیبانی، دلورمه، دولگوی و پیروال^۲، ۲۰۱۸). اخیراً، تحقیقات زیادی به تشکیل زنجیره تأمین‌های

1. Resilience Intertwined Supply Network Multi-Period Problem
2. Chaibani, Delorme, Dolgui & Pierreval

درهم آمیخته اشاره دارد. مانند تحقیق فراکاسیا، گیانوکارو، آلبینو^۱ (۲۰۱۷) که به چندین زنجیره تأمین متقاطع^۲ در صنعت اشاره می‌کند که از هدررفت برخی فرایندهای زنجیره تأمین به‌عنوان ورودی سایر زنجیره تأمین‌ها استفاده می‌شود. همچنین تحقیق وانگ، دو، مدادا و ژانگ^۳ (۲۰۱۸) مفهوم شبکه‌های زنجیره تأمین جامع‌نگر^۴ را گسترش داده‌اند که شامل گروهی از زنجیره تأمین‌های متقاطع که به‌هم آمیخته شده‌اند. مثال دیگر، تعاون لجستیک‌های تجاری و بشردوستانه^۵ است که چندین زنجیره تأمین از امکانات انبار به‌صورت مشترک استفاده می‌کنند (دوبی، گوناسکاران و پاپادوپولوس^۶، ۲۰۱۹ ب). همچنین، استفاده از اقتصادهای دایره‌ای در طراحی زنجیره تأمین‌های حلقه بسته (دهشیری و امیری، ۲۰۲۴) و صنعت ۴.۰ و تولید سایبری - فیزیکی به‌طور شایان توجهی زنجیره تأمین را تغییر داده و درهم آمیختگی آن را افزایش داده است (ایوانف، دولگوی و سوکولو^۷، ۲۰۱۹). به همین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که بسیاری از زنجیره‌تأمین‌ها بر اساس اصول توسعه تکاملی به شبکه‌های تأمین درهم آمیخته تبدیل می‌شوند. شبکه‌های تأمین درهم آمیخته به‌عنوان شبکه‌های پیچیده تأمین است که در آن ساختارها، نقش‌ها و رفتارهای شرکت‌های درگیر در آن که به‌طور پویا تغییر می‌کنند. همچنین در عمل، زنجیره‌تأمین‌ها معمولاً به‌طور مستقل عمل نکرده، بلکه در داخل یا در سراسر بخش‌های تجاری گسترده و به هم متصل می‌شوند و اکوسیستم‌های تأمین یا شبکه‌های تأمین درهم آمیخته را تشکیل می‌دهند. برای اولین بار اصلاح شبکه‌های تأمین درهم آمیخته را ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰) مطرح کردند. سه ویژگی اصلی که شبکه‌های تأمین درهم آمیخته را از شبکه‌های زنجیره تأمین جهت دار خطی با ساختارهای ایستا متمایز می‌کند:

- سیستم باز: اتصال بین صنایع در شبکه تأمین درهم آمیخته رایج است.
- پویایی ساختاری: شبکه‌های تأمین درهم آمیخته از ساختارهای مختلفی تشکیل شده‌اند که به هم مرتبط هستند و در پویایی خود تغییر می‌کنند، مانند ساختارهای فناوری و فرایندهای تجاری، سازمانی، فنی، توپولوژیکی، اطلاعاتی و مالی. همچنین همه شرکت‌کنندگان درگیر در شبکه‌های تأمین درهم آمیخته، ممکن است رفتارهای متعددی از خود نشان دهند، مانند تغییر نقش خریدار-تأمین‌کننده در زنجیره تأمین‌های به‌هم پیوسته یا حتی رقیب که ساختار شبکه را پویاتر و انعطاف‌پذیرتر می‌کند.
- یکپارچگی: شبکه‌های تأمین درهم آمیخته مجموعه‌ای از زنجیره‌تأمین‌های به‌هم پیوسته است که در یکپارچگی خود، ارائه خدمات یا محصولات جامعه و بازار را تضمین می‌کند (مانند خدمات غذایی یا خدمات ارتباطی).

تاب‌آوری و شبکه تأمین درهم آمیخته

تجزیه و تحلیل واکنش زنجیره تأمین به اختلال‌ها را می‌توان طبق تعاریف زیر و جدول ۱ ارائه کرد (ایوانف و دولگوی، ۲۰۲۰):

1. Fraccascia, Giannoccaro & Albino
2. Intersecting
3. Wang, Dou, Muddada & Zhang
4. Holistic
5. Symbiosis of Commercial and Humanitarian Logistics
6. Dubey, Gunasekaran, and Papadopoulos
7. Ivanov, Dolgui & Sokolov

- ثبات: توانایی بازگشت به حالت قبل از آشفتگی و اطمینان از دوام و استمرار؛
- استواری: توانایی مقاومت در برابر اختلال یا مجموعه‌ای از اختلال‌ها، برای حفظ عملکرد برنامه‌ریزی شده؛
- تاب‌آوری: توانایی مقاومت در برابر اختلال یا مجموعه‌ای از اختلال‌ها و بازیابی عملکرد.

جدول ۱. مفاهیم اصلی در واکنش زنجیره تأمین در برابر اختلال‌ها

مفاهیم	آشفتگی عملیاتی	اختلال در ساختار زنجیره تأمین	عملکرد خروجی	بازیابی
ثبات	✓			
استواری	✓	✓	✓	
تاب‌آوری		✓	✓	✓

منبع: (ایوانف و دولگوی، ۲۰۲۰)

ثبات به‌عنوان «ویژگی اصلی یک شبکه تأمین بدون در نظر گرفتن عملکرد» بیان می‌شود، در حالی که استواری و تاب‌آوری، شامل عملکرد در تجزیه و تحلیل تأثیرهای اختلال است. همچنین استواری را می‌توان توانایی سیستم برای مقاومت در برابر اختلال یا مجموعه‌ای از اختلال‌ها، بدون هیچ گونه تغییرات/تطبیق‌های ساختاری و پارامتری تجزیه و تحلیل کرد، در حالی که تجزیه و تحلیل تاب‌آوری اجازه می‌دهد تا سیستم از برخی بازیابی/تطبیق به‌منظور بازگرداندن عملیات و عملکرد مختل شده استفاده کند (ایوانف و دولگوی، ۲۰۲۰).

مطالعات موجود، رابطه بین تاب‌آوری و ساختارهای شبکه زنجیره تأمین را بررسی کرده است. ویژگی‌های ساختاری شبکه زنجیره تأمین، در حفظ قابلیت اطمینان و دستیابی به انعطاف‌پذیری نقش مهمی ایفا می‌کند. ایوانف و دولگوی (۲۰۱۹) تأکید کرده‌اند که شبکه‌های پیچیده در برابر اختلال‌های شدید آسیب‌پذیرتر می‌شوند که ساختار زنجیره تأمین را تغییر دهند. بنابراین، تحت اختلال‌های جهانی درازمدت و پیش‌بینی‌ناپذیر کنونی، چشم‌اندازی در مقیاس‌های بزرگ‌تر با در نظر گرفتن شبکه‌های تأمین پیچیده و سیستم‌های تولید به‌هم پیوسته ضروری است. همچنین همکاری بین زنجیره تأمین‌ها، معمولاً به تشکیل شبکه‌های همکاری چند ساختاری پیچیده منجر می‌شود که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان سیستم‌های پیچیده یاد کرد. علاوه بر این، ساختار سازمانی و ویژگی‌های عملیاتی شبکه زنجیره تأمین، بخش عمده‌ای از تحقیقات مربوط به مقابله با خطر اختلال‌های موجود در زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهد؛ از این رو می‌بایست ظرفیت شبکه زنجیره تأمین را برای مقابله با خطرهای اختلال بهبود بخشید (وانگ و یائو، ۲۰۲۱).

تجارت بین‌المللی به زنجیره تأمین‌های جهانی منجر می‌شود؛ همچنین ریسک‌ها در مدیریت زنجیره تأمین ذاتی هستند. بنابراین جهانی‌شدن و باز بودن تجارت، آسیب‌پذیری در مدیریت زنجیره تأمین را تشدید می‌کند و خطرها را افزایش می‌دهد (بیر، لانگ و گلوک^۱، ۲۰۱۹). به‌طور سنتی، آسیب‌پذیری زنجیره تأمین زمانی که هم‌تأثیر و هم‌احتمال اختلال زیاد باشد، به بالاترین میزان خود می‌رسد، به‌خصوص در شبکه‌ای پیچیده‌تر از زنجیره‌های تأمین با تغییر تقاضای جهانی و افزایش احتمال اختلال، چگونه زنجیره‌ای از اختلال‌ها بر شبکه تأثیر می‌گذارد؟ چگونه یک زنجیره تأمین می‌تواند در مواجهه با شکست آبخاری سایر زنجیره‌های تأمین تاب‌آور باقی بماند؛ به‌خصوص که هدف بسیاری از زنجیره‌های تأمین برای کارایی طراحی شده است و نه تاب‌آوری؟ (گلان، جرنگان و لینکو^۲، ۲۰۲۰).

1. Bier, Lange & Glock

2. Golan, Jernegan & Linkov

هنگام برخورد با شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته، همه شرکت‌کنندگان باید برای مقابله با اختلال‌ها تاب‌آور باشند. بنابراین، همکاری بین شرکت‌ها نقش مهمی در مدیریت اختلال‌ها برای عملکرد مؤثرتر دارد. دو نوع اصلی همکاری در شبکه‌های لجستیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد: عمودی و افقی. هدف همکاری عمودی ترکیب تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان برای ارائه کارآمدترین خدمات به مشتری از نظر زمان، کیفیت و هزینه است. همکاری افقی همکاری بین شرکت‌هایی است که عملیات مشابهی را در همان سطح از زنجیره تأمین انجام می‌دهند. ترکیب همکاری عمودی و افقی به‌عنوان همکاری جانبی شناخته می‌شود که به ندرت در ادبیات مطالعه شده است. عمدتاً تنظیم موجودی و بهنگام‌سازی عملیات از ارائه دهندگان خدمات لجستیکی مختلف را در نظر می‌گیرد (قانع و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی در زنجیره تأمین مشترک^۱ (همکار یا به‌هم‌پیوسته) وجود دارد. در سطح استراتژیک، شرکت‌کنندگان باید یک ائتلاف تشکیل دهند. یک ائتلاف شامل چندین شرکت کننده است که توافق می‌کنند به‌طور موقت با یکدیگر برای رسیدن به یک هدف مشترک همکاری کنند. در سطح تاکتیکی، آن‌ها باید مکانیزمی برای به اشتراک گذاشتن منافع یا هزینه‌ها ایجاد کنند، در حالی که در سطح عملیاتی، آن‌ها باید تصمیم اتخاذ که کدام منابع و به چه ترتیبی به اشتراک گذاشته شوند. آن‌ها ممکن است منابعی مانند مواد خام، وسایل نقلیه حمل‌ونقل، ظرفیت تاسیسات تولیدی، مراکز توزیع و انبارها را به اشتراک گذاشته یا درخواست‌های مشتریان را مبادله کنند. بسیاری از مطالعات در زنجیره تأمین مشارکتی، ائتلافی را در نظر می‌گیرند که دارای خاصیت افزودنی فوق‌العاده است، یعنی هرچه شرکت‌کنندگان بیشتری به همکاری بپیوندند، سود بیشتری به‌دست می‌آورند (قانع و همکاران، ۲۰۲۳).

پیشینه تجربی

با بررسی و مذاقه پیشینه تجربی در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین، می‌توان پی‌برد که بحث شبکه تأمین درهم‌آمیخته در طراحی شبکه، به‌ندرت در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته است. تحقیقات اخیر صورت گرفته شبکه تأمین درهم‌آمیخته از پژوهش ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰) شروع شده است که این پژوهش با تمرکز بر شیوع ویروس کرونا، شکل‌گیری مانایی را از طریق مدل‌سازی نظریه بازی‌ها در یک سیستم بیولوژیکی شبیه به شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته نشان داده و با تعیین میزان تولید و موجودی به افزایش بقا شبکه، کمک کرده است. وانگ و یائو (۲۰۲۱) شبکه تأمین درهم‌آمیخته تحت اختلال‌های حمل‌ونقلی با دیدگاه مانایی را طراحی کرده‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن راه‌های تأمین جدید برای بازارهای تقاضا، مدلی تاب‌آور برای شبکه با اهداف مینیمم کردن هزینه و افزایش مانایی طراحی کرده‌اند. پژوهش قانع و همکاران (۲۰۲۳)، مسئله طراحی شبکه تصادفی دو مرحله‌ای را بررسی کرده که شامل سه استراتژی مختلف تاب‌آوری برای طراحی شبکه تأمین درهم‌آمیخته تحت یک همکاری منصفانه است. توسعه ظرفیت، اشتراک ظرفیت و تغییر مسیر را به‌عنوان استراتژی‌های تاب‌آوری و اختلال‌ها را به‌صورت تصادفی و عدم قطعیت‌های هزینه‌های حمل‌ونقل و ظرفیت موجود در تأسیسات را در نظر گرفته است. به‌طور خاص، تأثیر سطوح و مقیاس‌های مختلف اختلال‌های تصادفی و تاب‌آوری بر عملکرد شبکه ارزیابی شد که بینش‌هایی را در خصوص تعادل بین هزینه و تاب‌آوری ارائه کرده

است. اچفاج، چارکاوی، چرافی و ایوانف^۱ (۲۰۲۴) به طراحی استراتژی‌های تاب‌آوری در شبکه‌های تأمین درهم آمیخته دایره‌ای پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که تأثیر اختلال و فرایندهای بازبازی در شبکه‌های تأمین درهم آمیخته دایره‌ای، از الگوهای مرسوم شناخته شده تاب‌آوری زنجیره تأمین‌های مستقل، به دلیل تأثیرات درهم‌تنیدگی و دایره‌ای پیروی نمی‌کنند. ایوانف (۲۰۲۳) به بررسی تأثیرهای شلای اختلال‌ها و کاهش آن‌ها با انطباق و همکاری در شبکه‌های تأمین درهم آمیخته از طریق شبیه‌سازی پرداخته است. نتایج نشان داد که از طریق همکاری با ظرفیت‌ها و اشتراک موجودی‌ها، می‌توان اثرها را کاهش داد و بازبازی عملکرد را بهبود داد. همچنین رن و همکاران^۲ (۲۰۲۴) نیز مدلی مبتنی بر عامل را برای شبیه‌سازی اثرهای موجی اختلال برای شبکه تأمین درهم آمیخته ارائه کرده‌اند. نتایج نشان داد که شرکت‌ها باید ویژگی‌های ساختاری خود و شرکت‌های مجاورشان را برای بررسی مؤثر آسیب‌پذیری‌ها اولویت‌بندی کنند و با شرکایی برای سرمایه‌گذاری در استراتژی‌های تاب‌آوری همکاری کنند.

در پژوهش‌های فارسی می‌توان به پژوهش خلیلی، پویا، کاظمی و فکور ثقیه (۱۴۰۱) اشاره کرد که به طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور تحت شرایط عدم قطعیت اختلال پرداخته شده است. در این پژوهش، یک مدل چندهدفه احتمالی دومرحله‌ای، مبتنی بر سناریو ارائه شده که ریسک‌های اختلال در زنجیره را در قالب سناریوهای احتمالی در نظر گرفته است. اختلال‌ها عبارت‌اند از: اختلال در تأمین به دلیل تخریب ظرفیت تولید پالایشگاه‌ها، کاهش واردات بنزین تحت تأثیر فشارهای سیاسی، تخریب تسهیلات ذخیره‌سازی و افزایش ناگهانی تقاضای برخی از مراکز. مدل پیشنهادی این پژوهش ضمن بهینه‌سازی کمی هر سه بُعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی شبکه زنجیره تأمین بنزین، تاب‌آوری شبکه را نیز در مقابل اختلال افزایش داده است. همچنین در پژوهش موسوی، جمالی و قربانپور (۱۴۰۱)، مدل بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین سبز - تاب‌آور که در صنایع سیمان به کار گرفته شده و به منظور مقابله با اختلال‌های ناگهانی و به حداقل رساندن آثار زیست‌محیطی طراحی شده است. نتایج نشان داد که مازاد تولید سیمان، بر تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین سیمان هیچ تأثیری ندارد. در پژوهش شیشه‌بری، عبدالعظیمی و عندلیب اردکانی (۱۴۰۱) مدلی برای شبکه توزیع دارو منطبق با شرایط وجود یک اپیدمی (بیماری‌های همه‌گیر مانند کرونا) برای زنجیره تأمین دارو ارائه شده است. با استراتژی اضافه کردن مرکز تأمین‌کننده پشتیبان سعی شده است تا علاوه بر مدیریت کردن تأثیرهای منفی بیماری کرونا، آثار آن نیز به صورت جامع بررسی شود. اما در پژوهش بهاداران، فدایی اشکیکی، طالقانی و همایون‌فر (۱۴۰۱) شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور، تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال در یکی از شرکت‌های فعال در حوزه صنایع غذایی استان تهران با ملاحظات چند محصولی بودن، طراحی شده است. توابع هدف مدل، شامل بیشینه کردن تعداد گره‌ها در برآورد میزان تقاضا و کمینه‌سازی هزینه‌ها بر اساس یک‌سری از سناریوها با رویکرد مالوی بررسی شده است. نتایج نشان داده است که چنانچه اختلال در زنجیره تأمین محصولات رخ دهد، شرکت از یک سو می‌تواند تقاضاها را برآورده کند و از سوی دیگر، هزینه‌ها را کاهش دهد. در پژوهش رحمانی، عالم تبریز، زندیه و طالبی (۱۴۰۱) شبکه تأمین درهم آمیخته را با اهداف هزینه و تاب‌آوری در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش ساختار و پیچیدگی شبکه مورد توجه بوده و با کاستن گره‌های بحرانی به دنبال افزایش تاب‌آوری بوده‌اند.

1. Echefaj, Charkaoui, Cherrafi & Ivanov

2. Ren et al.

جدول ۲. خلاصه پژوهش‌های اخیر مرتبط با موضوع

کاربرد	روش حل	زمان		مواجهه با عدم قطعیت			تصمیمات		تاب‌آوری	هدف	شبکه		اجزای زنجیره			نویسندگان و سال
		تک دوره	چند دوره	فازی	تصادفی	استوار	تاکتیکی و عملیاتی	استراتژیک			تأمین	تأمین درهم آمیخته	تولیدکنندگان	توزیع‌کنندگان	تأمین‌کنندگان	
نیروگاه برق	شبیه‌سازی	✓					✓		برآورد تقاضا، سناریو بر اساس اختلاف	افزایش تاب‌آوری، کاهش هزینه	✓	✓	✓	✓	تسائو، نان، لو و وی (۲۰۲۱)	
بیولوژیک	نظریه بازی‌ها	✓					✓			افزایش بقا و مانایی	✓	✓	✓	✓	ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰)	
تجهیزات پزشکی	الگوریتم ژنتیک	✓					✓	✓	سناریو پشتیبان راه‌های تأمین	کاهش هزینه و افزایش مانایی	✓	✓	✓	✓	ونگ و یائو (۲۰۲۱)	
عمومی	شبیه‌سازی		✓				✓		تطبيق پذیری	افزایش تاب‌آوری	✓	✓	✓	✓	فیض‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱)	
عمومی	شبیه‌سازی مونت کارلو		✓			✓	✓	✓	پیش‌بینی شبکه، برآورد تقاضا	کاهش هزینه، افزایش تاب‌آوری	✓	✓	✓	✓	قانع‌ی و همکاران (۲۰۲۳)	
	شبیه‌سازی	✓				✓	✓	✓	پاسخ به تقاضا	افزایش مانایی و تاب‌آوری	✓	✓	✓	✓	اچ‌فاج و همکاران (۲۰۲۴)	
	شبکه عصبی مصنوعی	✓					✓	✓	پاسخ به تقاضا	افزایش مانایی	✓	✓	✓	✓	بهت و الجندی (۲۰۲۳)	
	شبیه‌سازی مبتنی بر عامل	✓					✓	✓	همکاری با شرکا	بررسی اثرات موجی اختلاف	✓	✓	✓	✓	رن و همکاران (۲۰۲۴)	
	دقیق	✓					✓	✓	استراتژی توسعه ظرفیت، استراتژی جداسازی تأمین‌کننده	افزایش سود، افزایش تاب‌آوری	✓	✓	✓	✓	تحقیق حاضر	

مطالعه متون و بررسی شکاف تحقیقاتی در جدول ۲ نشان می‌دهد که در طراحی شبکه تأمین درهم آمیخته مطالعات کمی به مدل سازی ریاضی و بهینه سازی چند هدفه و کاربرد عمومی پرداخته‌اند و از استراتژی‌های افزایش تاب آوری بهره برده‌اند. همچنین مطالعه‌ی مشابهی در پژوهش‌ها و تحقیقات صورت گرفته با مسئله مدل سازی شبکه تأمین درهم آمیخته تاب آور دو هدفه تحت شرایط عدم قطعیت و اختلال، چند دوره‌ای و چند محصولی وجود ندارد.

روش شناسی پژوهش

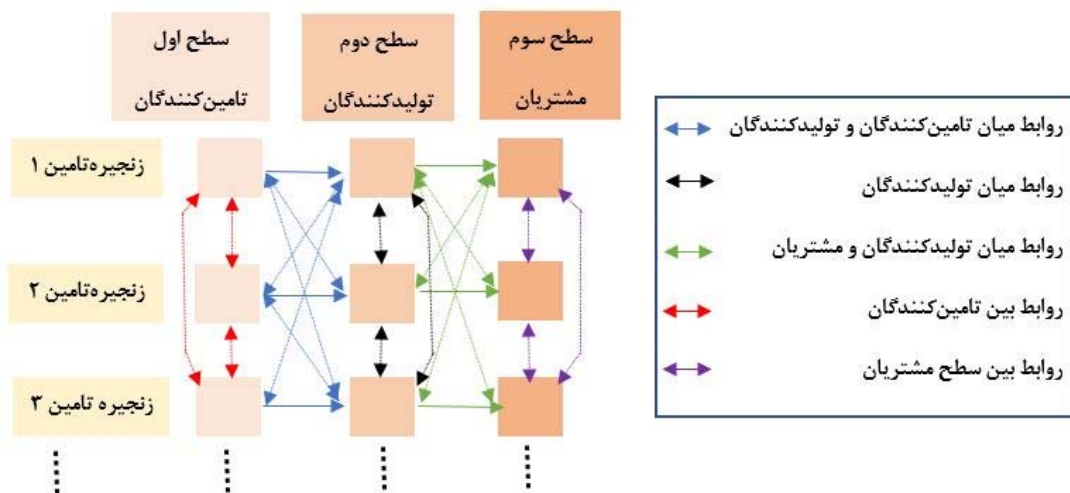
پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمره پژوهش‌های توسعه‌ای کاربردی و از نظر نوع داده‌ها، پژوهش کمی است که به بررسی داده‌های مرتبط به مقطعی از زمان می‌پردازد. واحد تحلیل در این مطالعه، شرکت کاشی و سرامیک کیمیا میبد، شرکت لعاب سازی و شرکت گلوله سازی آومینا شهر میبد است. این پژوهش از نوعی روش مدل سازی ریاضی بهره برده است که در آن یک مدل بهینه سازی اعداد صحیح مختلط با چندین محدودیت برای طراحی شبکه تأمین درهم آمیخته سه مرحله‌ای توسعه داده شده است. در این مطالعه از روش کتابخانه‌ای و براساس مطالعه و مذاقه مبانی نظری و تجربی در طراحی مدل پژوهش استفاده شده است. پس از طراحی و توسعه مدل، اعتبارسنجی انجام پذیرفت و جواب بهینه مدل در اختیار کارشناسان و مدیران قرار گرفت و از آنان درخواست شد تا نتایج را با داده‌های واقعی مقایسه کنند.

الف. مدل شبکه تأمین درهم آمیخته

در این تحقیق شبکه تأمین درهم آمیخته سه سطحی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که این سطوح عبارت‌اند از: تأمین کنندگان مواد اولیه (تأمین کننده مرکز یا ماده خام)، تولید کنندگان و مشتریان (مرکز و نهایی). با به کارگیری مدلی که ارائه خواهد شد می‌توان تصمیمات مربوط به مدیریت شبکه تأمین درهم آمیخته مانند تعیین میزان جریان مواد، تولید و ذخیره سازی و تعیین توسعه ظرفیت در مراکز را به صورت هماهنگ با یکدیگر در کل شبکه با هدف افزایش سود و کاهش ریسک اتخاذ کنند. شبکه تأمین درهم آمیخته سه مرحله‌ای در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است. مدل به صورت عمومی طراحی شده است و شبکه روابط درون^۱ زنجیره‌ای و روابط بین^۲ زنجیره‌ای را شامل می‌شود. مفروضات مسئله به شرح زیر است:

۱. مراکز تأمین و مراکز تولید و مراکز تولید در سطح مشتریان در شبکه یک یا چند محصول تولید می‌کنند.
۲. مکان فعالیت کارخانه‌های تولیدی، تأمین کنندگان، مراکز در سطح مشتریان از پیش مشخص است.
۳. ظرفیت تأمین کنندگان و تولید کنندگان و مراکز در سطح مشتریان شبکه محدود است.
۴. برای همه مراکز تولید شبکه تأمین امکان توسعه ظرفیت وجود دارد.
۵. تقاضای بازار (مشتریان) برای هر محصول در هر دوره زمانی غیر قطعی و به صورت اعداد تقریبی فازی است.
۶. مدل چند محصولی و هر محصول به چند ماده اولیه برای تولید نیاز دارد.

۷. امکان ارسال مواد و محصولات نهایی بین اجزای یک زنجیره به اجزای زنجیره دیگر وجود دارد.
۸. مسئله به صورت چند دوره‌ای است و هزینه‌های نگهداری سطوح موجودی در دوره‌های مختلف برای تمامی مراکز چه برای محصولات اولیه و چه محصولات نهایی لحاظ شده است.



شکل ۲. شبکه تأمین درهم‌آمیخته سه سطحی

ب. مدل ریاضی در حالت قطعی/اسمی

در این بخش یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای شبکه تأمین درهم‌آمیخته فرموله می‌شود. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیمی که در مدل‌سازی استفاده می‌شوند، به صورت زیر تعریف می‌شوند.

مجموعه و اندیس

- $I = \{1, 2, \dots | I\}$ مجموعه تأمین‌کنندگان؛ اندیس گذاری با i
- $R = \{1, 2, \dots | R\}$ مجموعه موادخام تأمین‌کنندگان؛ اندیس گذاری با r
- $R' = \{1, 2, \dots | R'\}$ مجموعه مواد خام تأمین‌کنندگان؛ اندیس گذاری با r' (مجموعه R مساوی با مجموعه R' است).

$I'_r \subseteq I$ زیرمجموعه تأمین‌کنندگان که می‌توانند متقاضی ماده اولیه r باشد (نقش خریدار)

$J = \{1, 2, \dots | J\}$ مجموعه تولیدکنندگان؛ اندیس گذاری با j

$J' = \{1, 2, \dots | J'\}$ مجموعه تولیدکنندگان؛ اندیس گذاری با j' (مجموعه J مساوی با مجموعه J' است)

$P = \{1, 2, \dots | P\}$ مجموعه محصولات تولیدکنندگان؛ اندیس گذاری با p

$P' = \{1, 2, \dots | P'\}$ مجموعه محصولات تولیدکنندگان؛ اندیس گذاری با p' (مجموعه P با مجموعه P' مساوی است)

$K = \{1, 2, \dots | K\}$ مجموعه مشتریان؛ اندیس گذاری با k

مجموعه محصولات مشتریان؛ اندیس گذاری با c	$C = \{1,2, \dots |C|\}$
مجموعه محصولات مشتریان؛ اندیس گذاری با c' (مجموعه c با مجموعه c' مساوی است)	$C' = \{1,2, \dots |C'|\}$
زیرمجموعه مشتریان که می توانند متقاضی محصول p از تولیدکنندگان و c از مشتریان (نقش خریدار) باشند. (مشتری نهایی)	$K_c'' \subseteq K$
زیرمجموعه مشتریان که می توانند محصول c را تأمین کنند.	$K_c' = K \setminus K_c''$
مجموعه دوره های زمانی؛ اندیس گذاری با t	$T = \{1,2, \dots |T|\}$
مجموعه سطوح توسعه ظرفیت مراکز تأمین/تولید/مشتریان، اندیس گذاری ($l \in L$)	$L = \{1,2, \dots |L|\}$

پارامترها / ورودی ها

هزینه تولید هر واحد از محصول p در مرکز تولید j	cq_{jp}
هزینه تولید هر واحد از ماده خام r در مرکز تولید i	cqs_{ir}
هزینه تولید هر واحد از محصول c در مرکز تولید k'	$cqc_{k'c}$
هزینه موجودی هر واحد از محصول p در مرکز تولید j	ch_{jp}
هزینه موجودی هر واحد از ماده خام r در مرکز تولید i'	$chs_{i'r}$
هزینه موجودی هر واحد از محصول c در مرکز تولید k'	$chc_{k'c}$
هزینه حمل هر واحد ماده خام r که از تأمین کننده i به مرکز تولید j در دوره زمانی t	cts_{ijr}
هزینه حمل هر واحد ماده خام r که از تأمین کننده i به تأمین کننده i' در دوره زمانی t	$ctsi_i'r$
هزینه حمل هر واحد محصول p که از مرکز تولید j به مشتری k در دوره زمانی t	ctm_{jkp}
هزینه حمل هر واحد محصول p که از مرکز تولید j به تأمین کننده i' در دوره زمانی t	$ctm_{ji'p}$
هزینه حمل هر واحد محصول p که از مرکز تولید j به مرکز تولید j' در دوره زمانی t	$ctm_{jj'p}$
هزینه حمل هر واحد محصول c که از مشتری k' به مرکز تولید j در دوره زمانی t	$ctc_{k'jc}$
هزینه حمل هر واحد محصول c که از مشتری k' به k در دوره زمانی t	$ctc_{k'kc}$
ماکزیمم سطح ظرفیت مرکز تولید i برای ماده خام r در دوره زمانی t	$caps_{ir}^t$
ماکزیمم سطح ظرفیت انبار مرکز تولید i برای ماده خام r در دوره زمانی t	$capsh_{ir}^t$
ماکزیمم سطح ظرفیت مرکز تولید j برای محصول p در دوره زمانی t	cap_{jp}^t
ماکزیمم سطح ظرفیت انبار مرکز تولید j برای محصول p در دوره زمانی t	cap_{jh}^t
ماکزیمم سطح ظرفیت مرکز تولید k' برای محصول c در دوره زمانی t	$capc_{k'c}^t$

ماکزیمم سطح ظرفیت انبار مرکز تولید k' برای محصول c در دوره زمانی t	$capch_{k',c}^t$
مقدار تقاضای مشتری k'' برای محصول p در دوره زمانی t . $(\widetilde{D}_{k''p}^t)$ بیان تقاضای غیرقطعی فازی $(D_{k''p}^{t(1)}, D_{k''p}^{t(2)}, D_{k''p}^{t(3)}, D_{k''p}^{t(4)})$	$D_{k''p}^t$
مقدار تقاضای مشتری k'' برای محصول c در دوره زمانی t . $(\widetilde{D}_{k''c}^t)$ بیان تقاضای غیرقطعی فازی $(D_{k''c}^{t(1)}, D_{k''c}^{t(2)}, D_{k''c}^{t(3)}, D_{k''c}^{t(4)})$	$D_{k''c}^t$
ضریب مصرف مواد خام r برای محصول p در گره i'	$b_{i'pr}$
ضریب مصرف مواد خام r' برای محصول r در گره i'	$b_{i'r'r}$
ضریب مصرف مواد خام r برای محصول p در گره j	a_{jrp}
ضریب مصرف ماده p' برای محصول p در گره j	$a_{jp'p}$
ضریب مصرف ماده c برای محصول p در گره j	a_{jcp}
ضریب مصرف ماده p برای محصول c در گره k'	$d_{k'pc}$
ضریب مصرف محصول c' برای محصول c در گره k'	$d_{k'c'c}$
قیمت فروش هر واحد محصول p برای مشتری k'' توسط مرکز تولید j	$c_{jk''p}$
قیمت فروش هر واحد محصول c برای مشتری k'' توسط مرکز تولید k'	$c_{k'k''c}$
هزینه ثابت توسعه ظرفیت در سطح $l \in \mathcal{L}$ برای تأمین کننده i	FC_{li}
هزینه ثابت توسعه ظرفیت در سطح $l \in \mathcal{L}$ برای کارخانه تولیدی j	FC_{lj}
هزینه ثابت توسعه ظرفیت در سطح $l \in \mathcal{L}$ برای مرکز سطح مشتریان k'	$FC_{lk'}$
درصد توسعه ظرفیت در سطح $l \in \mathcal{L}$	δ_l

متغیرهای تصمیم گیری/خروجی

مقدار ماده خام r که از تأمین کننده i به مرکز تولید j در دوره زمانی t منتقل می شود.	x_{ijr}^t
مقدار ماده خام r که از تأمین کننده i به تأمین کننده i' در دوره زمانی t منتقل می شود.	$x_{ii'r}^t$
مقدار ماده خام r که از تأمین کننده i' به تأمین کننده i' در دوره زمانی t منتقل می شود.	$x_{i'i'r}^t$
مقدار محصول p که از مرکز تولید j به مشتری k در دوره زمانی t منتقل می شود.	y_{jkp}^t
مقدار محصول p که از مرکز تولید j به تأمین کننده i' در دوره زمانی t منتقل می شود.	$y_{ji'p}^t$
مقدار محصول p که از مرکز تولید j به مرکز تولید j' در دوره زمانی t منتقل می شود.	$y_{jj'p}^t$
مقدار محصول p که از مرکز تولید j به مشتری نهایی k'' در دوره زمانی t منتقل می شود.	$y_{jk''p}^t$

مقدار محصول c که از مشتری k' به مرکز تولید j در دوره زمانی t منتقل می شود.	$Z_{k'jc}^t$
مقدار محصول c که از مشتری k' به مشتری k در دوره زمانی t منتقل می شود.	$Z_{k'kc}^t$
مقدار محصول c که از مشتری k' به مشتری نهایی k'' در دوره زمانی t منتقل می شود.	$Z_{k'k''c}^t$
مقدار تولید محصول p در مرکز تولید j در دوره زمانی t	q_{jp}^t
مقدار موجودی محصول p در مرکز تولید j در دوره زمانی t	I_{jp}^t
مقدار تولید موادخام r در مرکز تولید تأمین کننده i در دوره زمانی t	qs_{ir}^t
مقدار تولید موادخام r در مرکز تولید تأمین کننده i' در دوره زمانی t	$qs_{i'r}^t$
مقدار موجودی موادخام r در مرکز تولید تأمین کننده i در دوره زمانی t	Is_{ir}^t
مقدار تولید محصول c در مرکز تولید تأمین کننده k' در دوره زمانی t	$qc_{k'c}^t$
مقدار موجودی محصول c در مرکز تولید تأمین کننده k' در دوره زمانی t	$Ic_{k'c}^t$
متغیر باینری؛ برابر با 1 اگر در سطح $l \in \mathcal{L}$ برای تأمین کننده i از توسعه ظرفیت صورت پذیرد؛ * در غیر این صورت.	y_{li}
متغیر باینری؛ برابر با 1 اگر در سطح $l \in \mathcal{L}$ برای کارخانه تولیدی j توسعه ظرفیت صورت پذیرد؛ * در غیر این صورت.	y_{lj}
متغیر باینری؛ برابر با 1 اگر در سطح $l \in \mathcal{L}$ برای مرکز سطح مشتریان k' توسعه ظرفیت صورت پذیرد؛ * در غیر این صورت.	$y_{lk'}$

با توجه به تعریف نمادها، مدل مسئله بدین صورت ارائه می شود که شامل هدف افزایش سود (رابطه ۱) و محدودیت های مرتبط با هدف (رابطه های ۲ تا ۲۰) است.

در این بخش یک مدل شبکه تأمین درهم آمیخته سه سطحی به صورت یک مدل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح ارائه شده است. هدف در این مدل بیشینه کردن سود کل شبکه است که شامل تفاضل فروش با هزینه های توسعه ظرفیت، تولید و حمل و نقل و انبارداری است که در رابطه ۱ آورده شده است. رابطه های ۲ و ۳ و ۴ به ترتیب مربوط به محدودیت ظرفیت تولید هر مرکز تأمین، مرکز تولید و مرکز در سطح مشتریان است که به طور مثال، می بایست میزان تولید در هر مرکز تولید، از ظرفیت تولید و میزان توسعه ظرفیت هر مرکز کمتر باشد. رابطه های ۵ و ۶ و ۷ به ترتیب مربوط به محدودیت ظرفیت انبار هر مراکز تأمین، مراکز تولید و مراکز در سطح مشتریان است که به طور مثال می بایست میزان انبارش در هر مرکز از ظرفیت انبار هر مرکز کمتر باشد. رابطه های ۸ و ۹ و ۱۰ محدودیت تعیین میزان انبارش در هر دوره زمانی است. رابطه های ۱۱ و ۱۲ محدودیت تقاضاست که باید تقاضای مشتری برآورده شود. رابطه های ۱۳ تا ۱۹ مربوط به مصرف ماده اولیه برای محصول در هر مرکز است. همچنین رابطه ۲۰ متغیرهای مدل را نشان می دهد.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z_1 = & \sum_j \sum_{k''} \sum_p \sum_t c_{jk''p} y_{jk''p}^t & \text{رابطه (١)} \\
 & + \sum_{k'} \sum_{k''} \sum_c \sum_t c_{k'k''c} z_{k'k''c}^t - \left(\sum_i \sum_l FC_{li} y_{li} \right. \\
 & + \sum_j \sum_l FC_{lj} y_{lj} + \sum_{k'} \sum_l FC_{lk'} y_{lk'} \\
 & + \sum_j \sum_p \sum_t cq_{jp} q_{jp}^t + \sum_i \sum_r \sum_t cqs_{ir} qs_{ir}^t \\
 & + \sum_{k'} \sum_c \sum_t cq_{k'c} qc_{k'c}^t + \sum_j \sum_p \sum_t ch_{jp} I_{jp}^t \\
 & + \sum_i \sum_r \sum_t chs_{ir} Is_{ir}^t + \sum_{k'} \sum_c \sum_t chc_{k'c} Ic_{k'c}^t \\
 & + \sum_i \sum_j \sum_r \sum_t cts_{ijr} x_{ijr}^t + \sum_i \sum_{i'} \sum_r \sum_t cts_{ii'r} x_{ii'r}^t \\
 & + \sum_j \sum_k \sum_p \sum_t ctm_{jkp} y_{jkp}^t \\
 & + \sum_j \sum_{i'} \sum_p \sum_t ctm_{ji'p} y_{ji'p}^t \\
 & + \sum_j \sum_{j'} \sum_p \sum_t ctm_{jj'p} y_{jj'p}^t \\
 & + \sum_{k'} \sum_j \sum_c \sum_t ct_{k'jc} z_{k'jc}^t \\
 & + \left. \sum_{k'} \sum_k \sum_c \sum_t ct_{k'kc} z_{k'kc}^t \right)
 \end{aligned}$$

$$qs_{ir}^t \leq caps_{ir}^t \left(1 + \frac{1}{100} \sum_l \delta_l y_{li} \right), \quad \forall i, r, t, \quad \text{رابطه (٢)}$$

$$q_{jp}^t \leq cap_{jp}^t \left(1 + \frac{1}{100} \sum_l \delta_l y_{lj} \right), \quad \forall j, p, t, \quad \text{رابطه (٣)}$$

$$qc_{k'c}^t \leq cap_{k'c}^t \left(1 + \frac{1}{100} \sum_l \delta_l y_{lk'} \right) \quad \forall k', c, t, \quad \text{رابطه (٤)}$$

$$Is_{ir}^t \leq capsh_{ir}^t, \quad \forall i, r, t, \quad \text{رابطه (٥)}$$

$$I_{jp}^t \leq caph_{jp}^t, \quad \forall j, p, t, \quad \text{رابطه (٦)}$$

$$Ic_{k'c}^t \leq capch_{k'c}^t \quad \forall k', c, t, \quad \text{رابطه (٧)}$$

$$Is_{ir}^t = Is_{ir}^{t-1} + qs_{ir}^t - \sum_j x_{ijr}^t - \sum_{i'} x_{ii'r}^t, \quad \forall i, r, t, \quad \text{رابطه (٨)}$$

$$I_{jp}^t = I_{jp}^{t-1} + q_{jp}^t - \sum_k y_{jkp}^t - \sum_{i'} y_{ji'p}^t - \sum_{j'} y_{jj'p}^t, \quad \forall j, p, t, \quad \text{رابطه ۹}$$

$$I_{k'c}^t = I_{k'c}^{t-1} + qc_{k'c}^t - \sum_j z_{k'jc}^t - \sum_k z_{k'kc}^t, \quad \forall k', c, t, \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_j y_{jk''p}^t \leq D_{k''p}^t, \quad \forall k'', p, t, \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\sum_{k'} z_{k'k''c}^t \leq D_{k''c}^t, \quad \forall k'', c, t, \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\sum_j y_{ji'p}^t \geq qs_{i'r}^t b_{i'pr}, \quad \forall i', p, r, t, \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_{i'} x_{i'i'r}^t \geq qs_{i'r}^t b_{i'r'r}, \quad \forall i', r', r, t, \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$\sum_i x_{ijr}^t \geq q_{jp}^t a_{jrp}, \quad \forall j, r, p, t, \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$\sum_{j'} y_{jj'p}^t \geq q_{jp}^t a_{jp'p}, \quad \forall j, p', p, t, \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\sum_{k'} z_{k'jc}^t \geq q_{jp}^t a_{jcp}, \quad \forall j, c, p, t, \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$\sum_j y_{jk'p}^t \geq qc_{k'c}^t d_{k'pc}, \quad \forall k', p, c, t, \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$\sum_{k'} z_{k'k'c}^t \geq qc_{k'c}^t d_{k'c'c}, \quad \forall k', c', c, t, \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$\begin{aligned} x_{ijr}^t, x_{ii'r}^t, y_{jkp}^t, y_{ji'p}^t, y_{jj'p}^t, y_{jk''p}^t, z_{k'jc}^t, & \quad \forall i, i', j, j', k, \\ z_{k'kc}^t, z_{k'k''c}^t, q_{jp}^t, I_{jp}^t, qs_{ir}^t, qs_{i'r}^t, Is_{ir}^t, & \quad k', k'', p, p', \\ qc_{k'c}^t, Ic_{k'c}^t \geq 0, & \quad r, r', c, c', t, l \end{aligned}$$

$$y_{li}, y_{lj}, y_{lk'} \leq 1$$

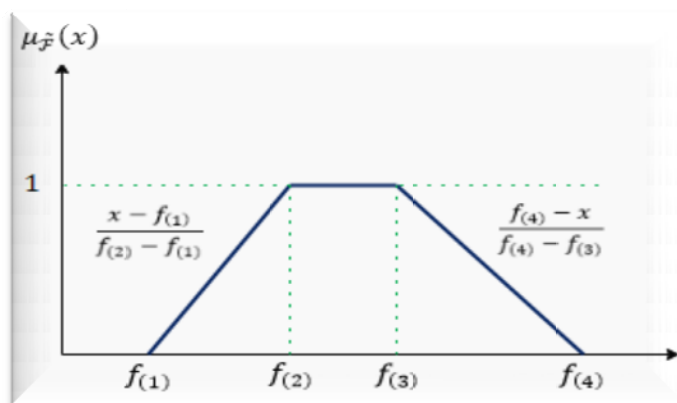
ج. مدل ریاضی در حالت عدم قطعیت

در صورتی که برخی از داده‌های یک مسئله بهینه‌سازی، به دلیل کمبود اطلاعات یا هر دلیل دیگری به صورت قطعی قابل بیان نباشند و به صورت کلامی طرح شده باشد؛ اما بیان تقریبی آنها به صورت اعداد فازی امکان‌پذیر باشد، رویکردهای

برنامه‌ریازی فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (جبارزاده، فهیم‌نیا، شو و مقدم^۱، ۲۰۱۶). اگر داده‌های فازی مسئله بهینه‌سازی به صورت اعداد فازی مثلثی یا در حالت کلی‌تر اعداد ذوزنقه‌ای (TFN)^۲ بیان شوند (شکل ۳) و درجه تحقق قیود مسئله مبتنی بر اندازه‌های فازی امکان (Pos)^۳ یا ضرورت (Nec)^۴ سنجیده شود، آنگاه برنامه‌ریزی مقید به شانس فازی (FCCP)^۵ مطرح می‌شود که فرم کلی آن به صورت زیر است:

$$\text{Cln}(Ax \leq \tilde{F}) \geq (1 - \epsilon) \quad \text{رابطه ۲۱}$$

که در آن $\text{Cln}(\cdot)$ یک اندازه فازی برای محاسبه شانس برقرار قیود فازی است؛ $\tilde{F} = (f_{(1)}, f_{(2)}, f_{(3)}, f_{(4)})$ داده‌های فازی مسئله (به صورت TFN) هستند. در اینجا $(1 - \epsilon)$ سطح اطمینان در ارضای قیود فازی را نشان می‌دهد (ϵ حداکثر ریسک در عدم ارضای قیود فازی است).



شکل ۳. تابع عضویت عدد فازی ذوزنقه‌ای (TFN)

برای کنترل قیود فازی یکی از اندازه‌های فازی پرکاربرد، اندازه اعتبار \hat{Cr} است که به صورت میانگین دو اندازه خوش‌بینانه Pos و بدبینانه Nec تعریف می‌شود ($\text{Cr}(\cdot) = \frac{1}{2}(\text{Pos}(\cdot) + \text{Nec}(\cdot))$) و در آن رابطه زیر برقرار است (خو و ژائو^۶، ۲۰۱۳):

$$\text{Cr}(Ax \geq \tilde{F}) \geq (1 - \epsilon) \Leftrightarrow Ax \geq f_{(3)} + (2(1 - \epsilon) - 1)(f_{(4)} - f_{(3)}) : \epsilon < 0.5 \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$\text{Cr}(Ax \leq \tilde{F}) \geq (1 - \epsilon) \Leftrightarrow Ax \leq f_{(2)} - (2(1 - \epsilon) - 1)(f_{(2)} - f_{(1)}) : \epsilon < 0.5$$

محدودیت تقاضای مدل را می‌توان در قالب رابطه‌های ۲۳ و ۲۴ نشان داد:

$$\sum_j y_{jk}^t \leq D_{k''p}^t + (2(1 - \epsilon) - 1)(D_{k''p}^t - D_{k''p}^t), \quad \forall k'', p, t, \quad \text{رابطه ۲۳}$$

1. Jabbarzadeh, Fahimnia, Sheu & Moghadam
2. Trapezoidal Fuzzy Number
3. Possibility
4. Necessity
5. Fuzzy Chance Constrained Programming
6. Credibility
7. Xu and Zhou

$$\sum_{k'} z_{k'k''c}^t \leq D_{k''c}^{t(2)} + (2(1 - \epsilon) - 1) (D_{k''c}^{t(2)} - D_{k''c}^{t(1)}), \quad \forall k'', c, t, \quad \text{رابطه ۲۴}$$

د. روش حل مسئله بهینه‌سازی دوهدفه و موازنه بین توابع هدف

حل مسئله RISNMP با تضمین تاب آوری یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه است. در حالت کلی، برای حل مسائل مدل‌سازی دو/چندهدفه (MODM) رویکردهای مختلفی ارائه شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش محدودیت اپسیلون (EC)^۲، محدودیت اپسیلون تقویت شده (AEC)^۳، لکسیکوگرافیک (Lex)^۴ اشاره کرد. در این تحقیق، برای به‌دست آوردن یک جبهه پارتو سراسری، روش AEC برای موازنه توابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد که توضیحات آن به شرح زیر است. در حالت کلی، یک مسئله MODM با دو هدف کمینه‌سازی به صورت رابطه ۲۵ قابل بیان است.

$$\min_{x \in X} (O_1(x), O_2(x)) \quad \text{رابطه ۲۵}$$

که در آن $x \in X$ بیان‌کننده قیود است. فرض کنید هدف اول به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و هدف دوم به کران بالای اپسیلون محدود می‌شوند و در قیود مسئله اعمال می‌شوند. در این صورت، روش EC مطرح می‌شود که بر اساس آن مدل بهینه‌سازی دو هدفه رابطه ۲۶ حاصل می‌شود که در آن، هدف اول به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و هدف دوم به حداکثر مقدار e محدود می‌شود.

$$\begin{cases} \min O_1(x) \\ O_2(x) \leq e \\ x \in X \end{cases} \quad \text{رابطه ۲۶}$$

در روش EC، با تغییر مقادیر e جواب‌های مختلفی به‌دست می‌آید که ممکن است کارا^۵ نباشند (کارای ضعیف^۶ هستند). با اصلاح/تکمیل جزئی مدل EC می‌توان مشکل مذکور را رفع کرد که به روش AEC معروف است. در روش AEC ابتدا باید بازه مناسب تغییرات e مشخص شود و سپس به ازای مقادیر مختلف e در بازه به‌دست آمده، جبهه پارتو را به‌دست آورده می‌شود. به‌منظور یافتن بازه مناسب برای e ، ابتدا برای هر یک از اهداف به‌صورت جداگانه حل می‌شود و قطر اصلی ماتریس پیامد اهداف، مقدار بهینه آن‌ها می‌شود. حال، مقدار یک هدف در حالت بهینه قرار می‌گیرد و هدف دیگر مشروط به بهینگی آن تا حد امکان کمینه می‌شود. نهایتاً، مدل روش AEC به صورت رابطه ۲۷ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \min \frac{O_1(x)}{R_1^*} - \phi \frac{s}{R_2^*} \\ O_2(x) + s = e \\ x \in X \end{cases} \quad \text{رابطه ۲۷}$$

که در آن $s \geq 0$ یک متغیر کمکی است و $\phi > 0$ یک ضریب کنترلی است که معمولاً $\phi = 10^{-6}$ در نظر

1. Multi Objective Decision Making
2. Epsilon Constraint
3. Augmented Epsilon Constraint
4. Lexicographic
5. Efficient
6. Weakly Efficient

گرفته می‌شود. همچنین R_1^* و R_2^* تفاضل بهترین مقدار و بدترین مقدار برای تابع هدف یک و دو است (ماورتس^۱)، (۲۰۰۹).

متناظر با استراتژی تاب‌آوری جداسازی تأمین‌کننده (SS)^۲، نسبت مواد و محصولات ورودی/تأمین‌شده برای یک گروه مقصد مشخص که یک گروه مبدأ دیگر دریافت کرده است، به کل ورودی آن گروه مقصد، هرچه کمتر باشد، بهتر است. در واقع در این استراتژی هدف آن است که تأمین مواد مصرفی موردنیاز هر گروه شبکه به چند گروه واگذار شود تا در صورت بروز اختلال در ظرفیت گروه تأمین‌کننده، گروه متقاضی کمترین اختلال را داشته باشد و اختلال در شبکه پخش نشود. بر این اساس، هدف دوم که کاهش ریسک است، به‌صورت رابطه‌های ۳۰ تا ۳۴ زیر بیان می‌شود و بر اساس روش AEC رویکرد مدل بهینه‌سازی دوهدفه پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

$$\text{رابطه } (28) \quad \text{MIN } \frac{O_1}{R_1^*} - \phi \frac{s}{R_2^*}$$

$$\text{رابطه } (29) \quad O_1 = -Z_1$$

$$\text{رابطه } (30) \quad y_{ji'p}^t + s \leq e \cdot \sum_j y_{ji'p}^t$$

$$\text{رابطه } (31) \quad x_{ii'r}^t + s \leq e \cdot \sum_i x_{ii'r}^t$$

$$\text{رابطه } (32) \quad y_{jkp}^t + s \leq e \cdot \sum_j y_{jkp}^t$$

$$\text{رابطه } (33) \quad y_{jj'p}^t + s \leq e \cdot \sum_j y_{jj'p}^t$$

$$\text{رابطه } (34) \quad z_{k'kc}^t + s \leq e \cdot \sum_{k'} z_{k'kc}^t$$

$$\text{رابطه } (35) \quad \text{Constraints } (2 - 10)(13 - 20)(27 - 28)$$

$$\text{رابطه } (36) \quad s \geq 0$$

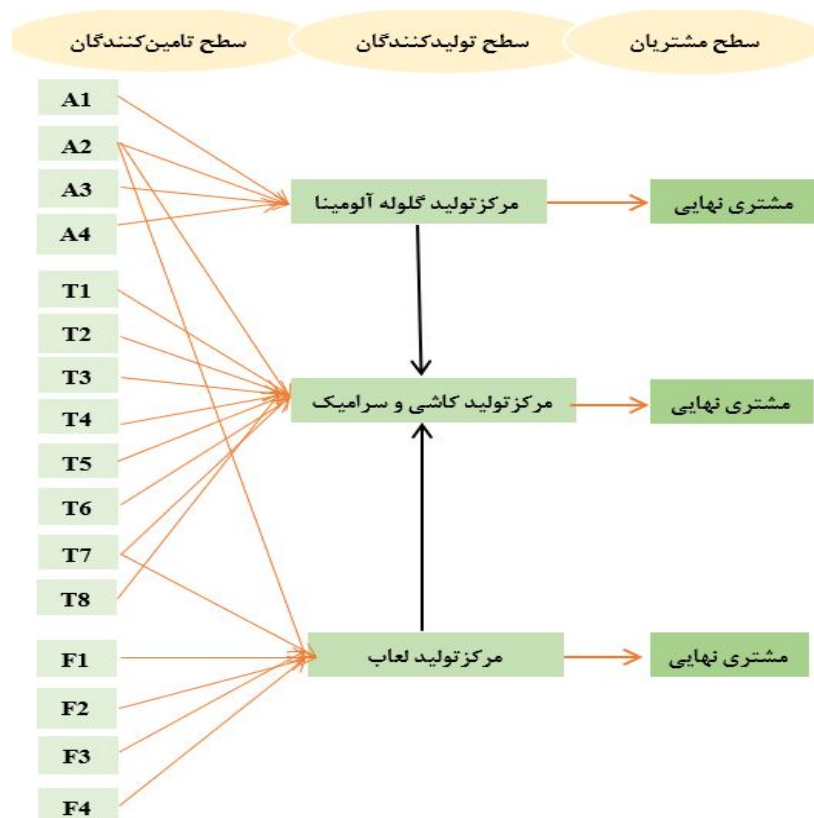
یافته‌های پژوهش

جهت ارزیابی و آزمودن صحت و درستی مدل، یک مسئله شبکه‌تأمین کاشی و سرامیک با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده که شامل سه زنجیره تأمین گلوله آلومینایی، لعاب‌سازی و کاشی و سرامیک است که مجموع تأمین‌کنندگان ۱۹ و مجموع مراکز تولید ۳ و مجموع تعداد مشتریان نهایی ۳ است و دوره زمانی شش ماه در نظر گرفته شده است. هر کدام

از این زنجیره تأمین‌ها گلوله آلومینایی، لعاب‌سازی و کاشی و سرامیک، مشتریان و تقاضای مربوط به خودشان را دارد. بنابراین شبکه تأمین درهم آمیخته صنعت کاشی و سرامیک به صورت شماتیک در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به فرمولاسیون خطی روابط ریاضی فوق و همچنین، دامنه مختلط متغیرهای تصمیم‌گیری، مدل پیشنهادی این تحقیق برای مسئله برنامه‌ریزی چنددوره‌ای شبکه تأمین، یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته (MILP) است که قابل حل توسط سالور کارایی از جمله CPLEX است. ابعاد و داده‌های مربوط به مسئله در جدول‌های ۳ و ۴ و نتایج برنامه‌ریزی شبکه تأمین درهم آمیخته در حالت قطعی (مقدار میانگین تقاضا در نظر گرفته شده است) در جدول ۵ و در حالت غیرقطعی در جدول ۶ برای شبکه تأمین کاشی و سرامیک ارائه شده است (نتایج به دلیل زیاد بودن فقط در دوره زمانی یک گزارش شده است). شکل ۵ نیز تفاوت اهداف در دو حالت قطعی و غیرقطعی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ابعاد مطالعه موردی مدل

اجزا	<i>I</i>	<i>R</i>	<i>J</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>L</i>
شرح	تأمین‌کنندگان	مواد اولیه	تولیدکنندگان	محصول	مشتریان	محصول	دوره زمانی	سطح توسعه ظرفیت
تعداد	۱۶	۱۶	۳	۳	۳	۰	۶	۳



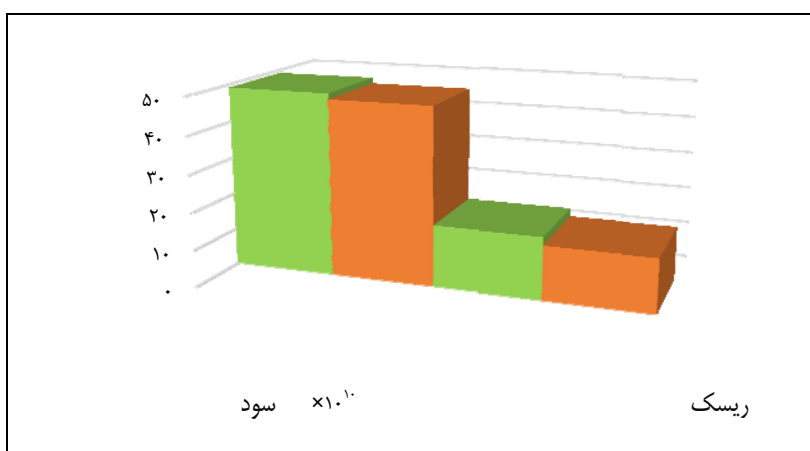
شکل ۴. گراف شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک

جدول ۴. داده‌های مسئله

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
cq_{jp}	تومان (۳۵۰۰۰ تا ۵۶۰۰۰)	cap_{jp}^t	۴۰۰۰۰۰ گرم ۱۸۰۰۰۰ متر ۵۰۰۰۰۰ گرم	$cqc_{k'c}$	۰
$capc_{k'c}^t$	۰	$caph_{jp}^t$	۱۵۰۰۰۰ گرم و متر	$chs_{i'r}$	۰
$capch_{k'c}^t$	۰	$D_{k''p}^t$	(۶۰۰۰۰۰ و ۶۲۰۰۰۰ و ۶۵۰۰۰۰ و ۷۰۰۰۰۰) گرم (۱۵۰۰۰۰ و ۱۷۰۰۰۰ و ۱۸۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰) متر (۴۰۰۰۰۰ و ۴۸۰۰۰۰ و ۵۴۰۰۰۰ و ۶۳۰۰۰۰) گرم	$chc_{k'c}$	۰
ch_{jp}	تومان (۳۰ تا ۳۵۰)	$D_{k''c}^t$	۰	$cts_{i'r}$	۰
$b_{i'pr}$	۰	$c_{jk''p}$	تومان (۸۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰ و ۷۰۰۰۰۰)	$ctm_{ji'p}$	۰
$b_{i'r'r}$	۰	$c_{k'k''c}$	۰	$ctc_{k'jc}$	۰
cts_{ijr}	تومان (۲۵۰ تا ۳۰۰۰)	a_{jrp}	درصد (۰/۰۲ تا ۰/۰۹)	$ctc_{k'kc}$	۰
ctm_{jkp}	تومان ۲۰۰۰	a_{jpp}	درصد (۰/۰۰۵۰۴ و ۰/۰۰۸۴)	$caps_{ir}^t$	۰
$ctm_{jj'p}$	تومان ۱۰۰	a_{jcp}	۰	$capsh_{ir}^t$	۰
$\delta_{s,m,l}$	درصد ۰/۷۵ و ۰/۵ و ۰/۲۵	$d_{k'pc}$	۰	cqs_{ir}	۰
FC_{li}	۰	FC_{sj}	تومان (۳۰۰۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰۰۰۰۰)	$FC_{lk'}$	۰

جدول ۵. نتایج اهداف در حالت قطعی

هدف اول (سود) (تومان)	هدف دوم (ریسک) (درصد)	
$۴/۷۴.۰۶۴ \times ۱۰^{۱۱}$	۱۶/۴۲	نتایج در حالت قطعی
$۴/۸۹۷.۰۹ \times ۱۰^{۱۱}$	۱۵/۲۹	نتایج در حالت غیر قطعی
۳ + درصد	۷ - درصد	درصد تغییرات



شکل ۵. مقایسه اهداف در دو حالت قطعی و غیر قطعی

همان طور که در جدول نتایج ۶ گزارش شده است، مقدار سود برای سه زنجیره تأمین به هم پیوسته در حالت غیرقطعی $10 \times 4/89709$ تومان و میزان ریسک $15/29$ به دست آمده است. همچنین میزان بهینه توسعه ظرفیت برای مراکز و حمل و نقل و تولید و انبار نیز مشاهده می شود. مدل برای مرکز تولید یک (گلوله آلومینا) در سطح کوچک (۲۵ درصد) و برای مرکز تولید سه (لعاب) در سطح متوسط (۵۰ درصد) افزایش ظرفیت داده است. می توان ظرفیت را از طریق تجهیزات پشتیبان یا پیمانکاری با دیگر شرکت ها افزایش داد.

جدول ۶. نتایج برنامه ریزی شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک در حالت غیر قطعی

متغیرها	مقادیر	متغیرها	مقادیر	متغیرها	مقادیر
y_{s1} (تولید کننده)	۱	y_{m3} (تولید کننده)	۱	Z_1	$4/10 \times 89709$ تومان
$x_{11a_1}^1$	۴۳۸۹۴/۰۸ گرم	$x_{21a_2}^1$	۹۷۵۴/۲۲۴ گرم	$x_{22a_2}^1$	۱۴۲۸۰ گرم
$x_{23a_2}^1$	۲۶۷۴۲۰/۸ گرم	$x_{31a_3}^1$	۲۴۳۸۵/۵۶ گرم	$x_{41a_4}^1$	۱۴۶۳۱/۳۳۶ گرم
$x_{52t_1}^1$	۷۱۴۰۰۰ گرم	$x_{62t_2}^1$	۳۵۷۰۰۰ گرم	$x_{72t_3}^1$	۱۶۲۶۴۹۲ گرم
$x_{82t_4}^1$	۷۴۳۹۸۸ گرم	$x_{92t_5}^1$	۱۴۲۸۰ گرم	$x_{102t_6}^1$	۱۴۲۸۰ گرم
$x_{112t_7}^1$	۲۸۵۶۰ گرم	$x_{113t_7}^1$	۱۱۳۶۵۳/۸۴ گرم	$x_{122t_8}^1$	۸۵۶/۸ گرم
$x_{143f_2}^1$	۱۰۰۲۸۲/۸ گرم	$x_{153f_3}^1$	۲۰۰۵۶/۵۶ گرم	$x_{163f_4}^1$	۱۱۳۶۵۳/۸۴ گرم
$x_{123f_1}^1$	۵۳۴۸۴/۱۶ گرم	$x_{ii'r}^t$	.	$x_{i'i'r}^t$	.
$y_{11p_1}^1$ (تولید کننده ۱ و مشتری ۱)	۴۸۰۰۰۰ گرم	$y_{22p_2}^1$ (تولید کننده ۲ و مشتری ۲)	۱۷۰۰۰۰ متر	$y_{33p_3}^1$ (تولید کننده ۳ و مشتری ۳)	۶۲۰۰۰۰ گرم
$y_{ji'p}^t$	.	$y_{12p_1}^1$ (تولید کننده ۱ و تولید کننده ۲)	۷۷۱۱/۲ گرم	$y_{32p_3}^1$ (تولید کننده ۳ و تولید کننده ۲)	۴۸۵۵۲ گرم
$z_{k'jc}^t$	.	$z_{k'kc}^t$	.	$z_{k'k''c}^t$	.
$q_{1p_1}^1$	۴۸۷۷۱۱/۲ گرم	$q_{2p_2}^1$	۱۷۰۰۰۰ متر	$q_{3p_3}^1$	۶۶۸۵۵۲ گرم
I_{jp}^t	.	qs_{ir}^t	.	Is_{ir}^t	.

ماتریس پیامد اهداف و جواب های پارتو

در مسئله RISNMP مورد بررسی در این تحقیق دو هدف پیشینه سازی سود و کمینه سازی ریسک در شبکه در نظر گرفته شد و جدول ۷ نشان دهنده ماتریس پیامد اهداف است. افزایش ریسک، به معنای در نظر نگرفتن تاب آوری است که باعث می شود، هزینه هایی که استراتژی جداسازی تأمین کننده ایجاد می کند، حذف شود و سود افزایش یابد؛ بنابراین اهداف با یکدیگر در تضاد است. همان طور که در مجموعه جواب های پارتو در شکل ۶ و جدول ۸ نمایش داده شده،

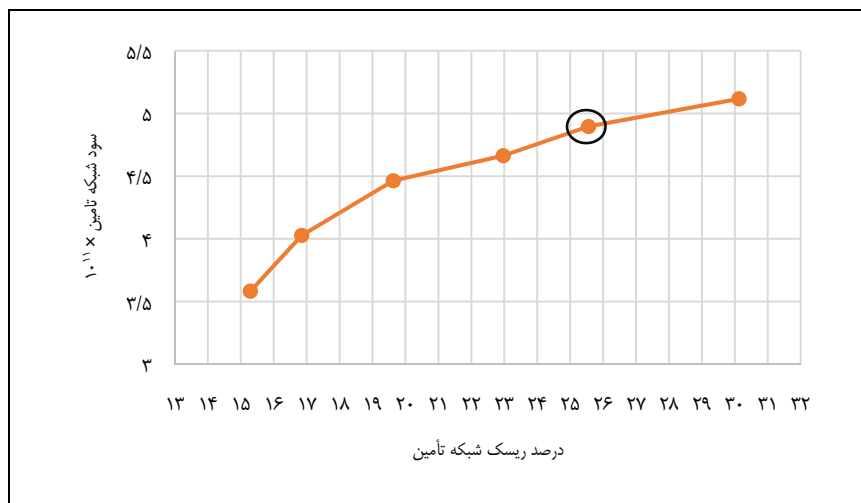
جواب شماره پنجم انتخاب می‌شود؛ زیرا این جواب نسبت به سایر دیگر جواب‌ها از نظر شاخص کشش^۱ بهتر است و کاهش ریسک، مقدار کاهش سود کمتر را باعث می‌شود.

جدول ۷. ماتریس پیامد اهداف

Z_2	Z_1	
$3/10 \times 58265$	$5/10 \times 11719$	Z_1
۱۵/۲۹	۳۰/۱۳	Z_2

جدول ۸. مجموعه جواب پارتو

مقدار هدف دوم (ریسک)	مقدار تابع هدف اول (سود)	جواب پارتو
۱۵/۲۹	$3/10 \times 58265$	۱
۱۶/۸۵	$4/10 \times 2847$	۲
۱۹/۶۳	$4/10 \times 46413$	۳
۲۲/۹۷	$4/10 \times 66419$	۴
۲۵/۵۶	$4/10 \times 19709$	۵
۳۰/۱۳	$5/10 \times 11719$	۶

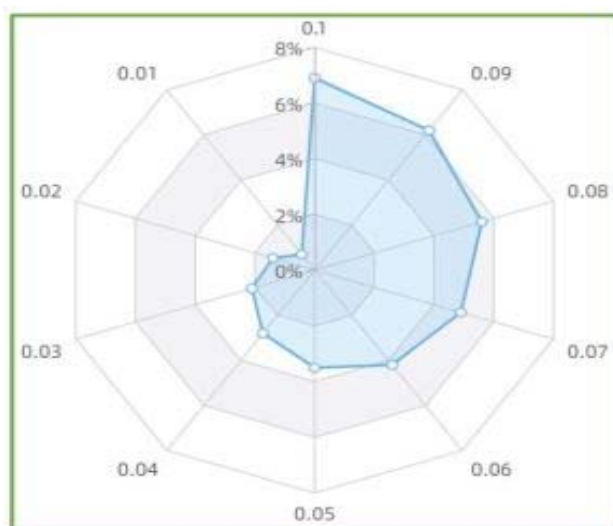


شکل ۶. نمودار پارتو

تحلیل حساسیت اپسیلون (سطح اطمینان) در برنامه‌ریزی فازی

در این قسمت به تحلیل پارامتر سطح اطمینان (الزام در برقراری قیود فازی) پرداخته می‌شود و مقدار مناسب آن تنظیم می‌شود. همان طور که اشاره شد، ϵ سطح خطا در عدم ارضای قیود فازی با روش برنامه‌ریزی مقید به شانس فازی است.

مقدار $(\epsilon-1)$ سطح اطمینان ارضای قیود با پارامتر فازی \tilde{T} است. تنظیم یک مقدار مناسب برای حداکثر خطا (ϵ) در عدم ارضای قیود فازی مدل پیشنهادی ضرورت دارد. برای این منظور، تأثیر تغییرات مقدار ϵ بر روی افزایش سود سنجیده می‌شود. همان طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، می‌توان با $\epsilon = 0.05$ تا بیش از ۲ درصد و با $\epsilon = 0.1$ حدود ۷ درصد سود را افزایش داد.



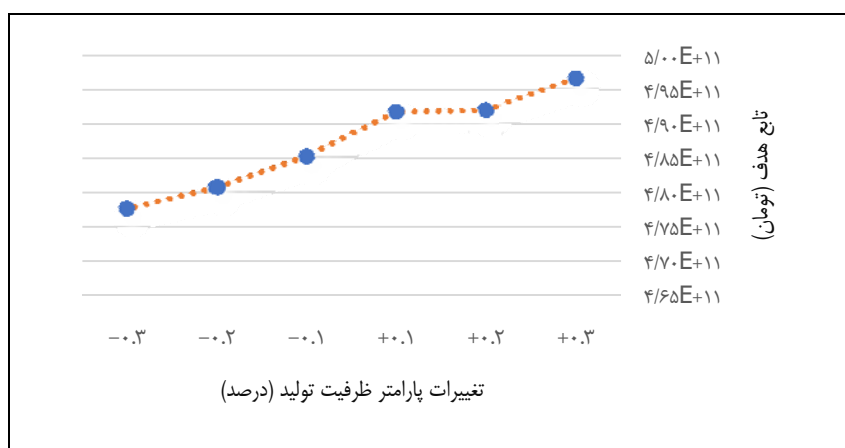
شکل ۷. تغییرات اسیلون روی تغییرات تابع هدف

تحلیل حساسیت پارامتر ظرفیت تولید

همان طور که از رابطه تقاضا و میزان ظرفیت مراکز در مدل مشخص است، به تحلیل پارامتر ظرفیت تولید پرداخته شده است. با توجه به جدول ۹ و شکل ۸ با کاهش ظرفیت، مدل به دنبال ارتقای توسعه ظرفیت در سطوح بالا (بزرگ و متوسط) است و مقدار سود قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش ظرفیت، مدل تعداد متغیر توسعه ظرفیت کمتری خواهد داشت؛ به طوری که در افزایش ۳۰ درصدی ظرفیت‌ها دیگر توسعه ظرفیت صورت نگرفت و سود افزایش یافت. بنابراین میزان ظرفیت بهینه برای مدیران مراکز این شبکه بسیار شایان توجه خواهد بود. میزان بهینه پارامتر ظرفیت برای مرکز تولید ۱ (آلومینا)، افزایش ۲۰ درصدی و برای مرکز تولید ۲ (کاشی)، افزایش ۱۰ درصدی و برای مرکز تولید ۳ (لعاب)، افزایش ۳۰ درصدی است.

جدول ۹. تغییرات پارامتر ظرفیت تولید روی هدف افزایش سود

درصد تغییرات پارامتر ظرفیت تولید	+۰/۳	+۰/۲	+۰/۱	-۰/۱	-۰/۲	-۰/۳
مقدار تابع هدف اقتصادی	۹۶۴۷۱×۴/۱۰ ^{۱۱}	۹۲۰۱۸×۴/۱۰ ^{۱۱}	۹۱۷۴۹×۴/۱۰ ^{۱۱}	۸۵۱۲۸×۴/۱۰ ^{۱۱}	۸۰۶۷۵×۴/۱۰ ^{۱۱}	۷۷۶۳۱×۴/۱۰ ^{۱۱}
درصد تغییرات تابع هدف	+۱/۳۸	+۰/۴۷۲	+۰/۴۷	-۰/۹۳۵	-۱/۸۴	-۲/۴۷



شکل ۸. تغییرات پارامتر ظرفیت تولید بر روی هدف افزایش سود

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش به طراحی شبکه تأمین درهم‌آمیخته تاب‌آور، تحت شرایط اختلال و عدم قطعیت پرداخته است و از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده برای حل مدل دوهدفه (افزایش سود، کاهش ریسک) استفاده کرده است. مدل پژوهش با استفاده از داده‌های واقعی شبکه تأمین کاشی و سرامیک میبد حل و اعتبارسنجی شده است. در تحقیقات ایوانف (۲۰۲۳)، فیض‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱)، رن و همکاران (۲۰۲۴) و اچفاج و همکاران (۲۰۲۴)، از مدل‌سازی ریاضی برای شبکه تأمین درهم‌آمیخته استفاده نشده است. برای هر سه سطح در زنجیره‌های تأمین مختلف مراکز تولید، رابطه بین زنجیره‌ای (شامل رابطه برگشتی: تولیدکننده یک زنجیره به تأمین‌کننده زنجیره‌های دیگر و رابطه میان مراکز یک سطح: تأمین‌کننده یک زنجیره به تأمین‌کننده‌های زنجیره‌های دیگر، رابطه تولیدکننده با تولیدکننده‌های زنجیره‌های دیگر) در نظر گرفته شده است که در تحقیقات قبلی دیده نشده است. مدل در مواجهه با اختلال‌ها در مراکز شبکه و افزایش تاب‌آوری، از استراتژی جداسازی تأمین‌کننده و استراتژی توسعه ظرفیت بهره گرفته است که در سه سطح کوچک (۲۵ درصد)، متوسط (۵۰ درصد)، بزرگ (۷۵ درصد) مراکز توانایی افزایش ظرفیت داشتند.

در مواجهه با عدم قطعیت پارامتر تقاضا که در شبکه تأمین کاشی و سرامیک مشهود است، از روش برنامه‌ریزی مقید به شانس فازی و بر اساس شاخص اعتبار که ترکیبی از خوش‌بینانه و بدبینانه است، استفاده شد تا مدل بتواند در مقابله با شرایط عدم قطعیت توانمند به پاسخ‌گویی باشد که در تحلیل حساسیت تغییر مقدار اپسیلون (میزان خطا) از صفر به ۰/۰۵ و از ۰/۰۵ به ۰/۱ به ترتیب باعث افزایش دو تا هفت درصدی سود می‌شود. همچنین پارامتر مؤثر در تابع هدف، مانند ظرفیت تولید نیز مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت. افزایش پارامتر ظرفیت به دلیل کاهش هزینه‌های توسعه‌های ظرفیت باعث افزایش سود می‌شود. همچنین میزان بهینه ظرفیت به مدیران شبکه تأمین کاشی پیشنهاد شده است. در حالت مطلوب میزان افزایش ظرفیت در مرکز تولید گلوله آلومینا، ۲۰ درصد و در مرکز تولید کاشی ۱۰ درصد و در مرکز تولید لعاب ۳۰ درصد است که مدیران این مراکز می‌توانند از طریق همکاری با دیگر مراکز و پیمانکاری با دیگر شرکت‌ها و تجهیزات پشتیبان ظرفیت‌های خود را افزایش دهند.

به منظور افزایش سود حاصل از فروش محصولات سه زنجیره تأمین به هم پیوسته شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک تحت شرایط عدم قطعیت، مدیران می توانند با پیروی از مدل پیشنهادی، میزان تولید و انبار را به بهینه ترین شکل ممکن انتخاب کنند و مدل با استفاده از استراتژی های توسعه ظرفیت و جداسازی تأمین کننده توانسته به تقاضاهای متغیر پاسخ دهد و مقدار ریسک خود را کاهش دهد. همان طور که در جدول ۵ و شکل ۶ نشان داده شد، مدل در حالت غیر قطعی نسبت به حالت قطعی، مقدار سود را سه درصد افزایش داد و میزان ریسک هفت درصد کاهش یافت. مدیران مراکز در شبکه تأمین درهم آمیخته می توانند با استفاده از روش های منبع یابی مشترک، برنامه ریزی تولید و مدیریت موجودی هماهنگ به یکپارچگی در سراسر شبکه دست پیدا کنند و مدل پیشنهادی را با سیستم های برنامه ریزی منابع سازمان برای کمک به مدیریت اختلال ها ادغام کنند تا با استفاده از داده ها و قابلیت های محاسباتی، امکان تصمیم گیری آگاهانه در مورد مدیریت ریسک فراهم شود. در شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک به دلیل تأمین کننده های مشترک میان سه زنجیره تأمین به هم پیوسته لعاب، کاشی و گلوله آلومینا می توان از سیستم های اطلاعاتی مشترک برای مدیریت تأمین کننده ها استفاده کرد و همچنین استراتژی های یکپارچه سازی تأمین برای تمامی مراکز ایجاد کرد؛ مانند اشتراک گذاری موجودی ها. همچنین مدیران زنجیره تأمین ها در شبکه می توانند با استفاده از برنامه ریزی تولید هماهنگ، مواد خام را بدون اینکه موجودی آن را افزایش دهند، به صورت بهینه استفاده کنند و موجودی اطمینان برای مراکز بحرانی در شبکه به زنجیره ها کمک می کند تا در زمان افزایش تقاضا به تأمین کننده های پشتیبان کمتری نیاز باشد.

محدودیت های این تحقیق عدم وجود سامانه مناسب برای رصد مقدار دقیق پارامترهای مدل بهینه سازی پیشنهادی است. در صورتی که شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک به صورت متمرکز و یکپارچه مدیریت شوند و داده های دقیق مربوط به زنجیره عرضه محصولات آن ها در دسترس باشد، اجرای مدل استراتژیک و عملیاتی پیشنهادی بسیار مفید خواهد بود. همچنین عدم برآورد میزان تقاضا در بازارهای خارجی نیز دیگر محدودیتی است که ممکن است در اجرای کارای مدل پیشنهادی خلل ایجاد کند؛ زیرا در این مدل فرض می شود که یک برآورد از تقاضای بازار داخلی در دسترس است و مشروط به آن برای طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین، مقدار تولید، موجودی و ... برنامه ریزی می شود. می توان با استفاده از نظرسنجی از مشتریان خارجی، بررسی روندهای بازارهای جهانی، مدل سازی شبیه سازی و هوش مصنوعی به آن دست پیدا کرد.

مدل ارائه شده در این پژوهش به صورت عمومی ارائه شده است و صنایع دیگر می توانند با توجه به ساختار شبکه خود نیز از آن استفاده کنند. در تحقیقات آتی، پیشنهاد می شود در مطالعات شبکه تأمین های مشابه به برنامه ریزی دیگر با اهداف دیگر مانند پایداری، مانایی و ... و تصمیمات دیگر مانند جریان های مالی و اطلاعاتی و ... پرداخته شود. این تحقیق مبحث ضایعات و بازیافت توجه نداشته است، پیشنهاد می شود که پژوهشگران علاقمند، متغیرهای مربوط به این بحث را در مدل گنجانده و نتایج حاصل را تحلیل کنند. همچنین در این تحقیق بین اجزای شبکه تأمین مباحث رقابتی در نظر نگرفته شده است. پیشنهاد می شوند پژوهشگران علاقمند این مبحث را در مدل گنجانده و با استفاده از مدل های نظریه بازی و یا لیدر/فالوور به آن بپردازند.

منابع

- بهادران، مریم؛ فدایی اشکیکی، مهدی؛ طالقانی، محمد و همایون فر، مهدی (۱۴۰۱). طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال با رویکرد مالوی. *مدیریت صنعتی*، ۱۴(۴)، ۵۹۵-۶۱۷
- تقی‌زاده یزدی، محمدرضا؛ امراللهی بیوکی، ناهید و محمدی بالانی، عبدالکریم (۱۳۹۵). سنجش روابط میان عوامل تأثیرگذار بر پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تأمین سبز و رتبه‌بندی شرکت‌های حاضر در زنجیره تأمین (مطالعه موردی: صنعت کاشی و سرامیک استان یزد). *نشریه مدیریت صنعتی*، ۸(۴)، ۵۵۵-۵۷۴.
- خلیلی، سید محمد؛ پویا، علیرضا؛ کاظمی، مصطفی و فکور ثقیه، امیرمحمد (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.
- رحمانی میبدی، فرحناز؛ عالم تبریز، اکبر؛ زندیه، مصطفی و طالبی، داوود (۱۴۰۱). طراحی مدل شبکه تأمین درهم‌آمیخته با محوریت تاب‌آوری. *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۱۰(۲۰)، ۷۷-۸۹.
- شیشه‌بری، داوود؛ عبدالعظیمی، امید و عندلیب اردکانی، داوود (۱۴۰۰). زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و تاب‌آور دارو با تأمین‌کننده پشتیبان تحت شرایط بیماری کرونا (کووید ۱۹). *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۹(۱۹)، ۳۳-۵۳.
- صدیق‌پور، عبدالرضا (۱۳۹۸). *مدل زنجیره تأمین ارتجاعی در صنایع دارویی ایران*. پایان‌نامه دکتری مدیریت صنعتی، تهران: دانشگاه شهید بهشتی.
- موسوی، مهسا؛ جمالی، غلامرضا و قربانپور، احمد (۱۴۰۰). ارائه مدل بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین سبز - تاب‌آور در صنایع سیمان. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۲)، ۲۲۲-۲۴۵.

References

- Bahadoran, M., Fadaei Ashkiki, M., Taleghani, M. & Homayounfar, M. (2022). Designing a Resilient Closed-Loop Supply Chain Network under Operational Risk and Disruption Conditions by the Mulvey Approach, *Industrial Management Journal*, 14(4), 595-617. (in Persian)
- Bhat, S. & Aljuneidi, T. (2023). Viable Intertwined Supply Network: Modelling and Dynamic Analysis Using Artificial Neural Networks. Available at SSRN 4381244.
- Bier, T., Lange, A. & Glock, C. H. (2020). Methods for mitigating disruptions in complex supply chain structures: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1835-1856.
- Chen, J., Sohal, A. S. & Prajogo, D. I. (2013). Supply chain operational risk mitigation: A collaborative approach. *International Journal of Production Research*, 51(7), 2186-2199.

- Chibani, A., Delorme, X., Dolgui, A. & Pierreval, H. (2018). Dynamic optimisation for highly agile supply chains in e-procurement context. *International journal of production research*, 56(17), 5904-5929.
- Cordeau, J. F., Klibi, W. & Nickel, S. (2021). Logistics network design. *Network design with applications to transportation and logistics*, 599-625.
- Dehshiri, S. J. H. & Amiri, M. (2024). Considering the circular economy for designing closed-loop supply chain under hybrid uncertainty: A robust scenario-based possibilistic-stochastic programming. *Expert Systems with Applications*, 238, 121745.
- Dehshiri, S. J. H., Amiri, M., Olfat, L. & Pishvae, M. S. (2023). A robust fuzzy stochastic multi-objective model for stone paper closed-loop supply chain design considering the flexibility of soft constraints based on Me measure. *Applied Soft Computing*, 134, 109944.
- Dubey, R., Gunasekaran, A. & Papadopoulos, T. (2019b). Disaster Relief Operations: Past, Present and Future. *Annals of Operations Research*, 283 (1-2), 1–8.
- Echefaj, K., Charkaoui, A., Cherrafi, A. & Ivanov, D. (2024). Design of resilient and viable sourcing strategies in intertwined circular supply networks. *Annals of Operations Research*, 1-40.
- Feizabadi, J., Gligor, D. M. & Choi, T. Y. (2023). Examining the resiliency of intertwined supply networks: A jury-rigging perspective. *International Journal of Production Research*, 61(8), 2432-2451.
- Fracascia, L., Giannoccaro, I. & Albino, V. (2017). Rethinking resilience in industrial symbiosis: conceptualization and measurements. *Ecological Economics*, 137, 148-162.
- Ghanei, S., Contreras, I. & Cordeau, J. F. (2023). A two-stage stochastic collaborative intertwined supply network design problem under multiple disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 170, 102944.
- Golan, M. S., Jernegan, L. H. & Linkov, I. (2020). Trends and applications of resilience analytics in supply chain modeling: systematic literature review in the context of the COVID-19 pandemic. *Environment Systems and Decisions*, 40(2), 222-243.
- Gorbaneva, O. & Ougolnitsky, G. (2022). Sustainability of Intertwined Supply Networks: A Game-Theoretic Approach. *Games*, 13(3), 35.
- Hosseini, S., Ivanov, D. & Dolgui, A. (2019). Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 125, 285-307.
- Ivanov, D. (2023). Collaborative emergency adaptation for ripple effect mitigation in intertwined supply networks. *Annals of Operations Research*, 1-17.
- Ivanov, D. & Dolgui, A. (2019). Low-Certainty-Need (LCN) supply chains: a new perspective in managing disruption risks and resilience. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 5119-5136.

- Ivanov, D. & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2904-2915.
- Ivanov, D., Dolgui, A. & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3), 829-846.
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sheu, J. B., & Moghadam, H. S. (2016). Designing a supply chain resilient to major disruptions and supply/demand interruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 121-149.
- Khalili, S., M., Pooya, A., Kazemi, M., Fakoor Saghieh, A., M., (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)
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
- Mousavi, M., Jamali, G. & Ghorbanpour, A. (2022). A Green-resilient Supply Chain Network Optimization Model in Cement Industries. *Industrial Management Journal*, 13(2), 222-245. (in Persian)
- Rahmani Meybodi, F., Alem Tabriz, A., Zandiyeh, M. & Talabi, D. (2022). Designing a Model for Intertwined Supply Network Based on Resilience. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 10(20), 77-89. doi: 10.22084/ier.2023.27187.2108 (in Persian)
- Ren, H., Wang, C., Mu, D., Lim, M. K., Yue, X., Hu, X., ... & Tsao, Y. C. (2024). Resilience strategies in an intertwined supply network: Mitigating the vulnerability under disruption ripple effects. *International Journal of Production Economics*, 109419.
- Sedighpour, A. (2019). *Resilient Supply Chain Model in Iran Pharmaceutical Industries*. PHD Thesis Industrial Management, Shahid Beheshti University. (in Persian)
- Shekarian, M. & Mellat Parast, M. (2021). An Integrative approach to supply chain disruption risk and resilience management: a literature review. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 24(5), 427-455.
- Shishebori, D., Abdolazimi, O., Andalib Ardakani, D., (2022). Sustainable and Resilient Closed-Loop Drug Supply Chain with Backup Suppliers under Coronavirus Disease Pandemic (COVID-19). *Journal of Industrial Engineering Research in production systems*, 9(19), 33-53. (in Persian)
- Taghzadeh Yazdi, M. R., Amrollah Biuky, N. & Mohammadi Balani, A. (2017). Analyzing the Relationships between Green Supply Chain Management Implementation Factors and Ranking the Organizations in the Supply Chain (Case Study: Ceramic Tile Industry in Yazd Province). *Industrial Management Journal*, 8(4), 555-574. (in Persian)

- Tsao, Y. C., Thanh, V. V., Lu, J. C. & Wei, H. H. (2021). A risk-sharing-based resilient renewable energy supply network model under the COVID-19 pandemic. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 484-498.
- Wang, J., Dou, R., Muddada, R.R. & Zhang, W. (2018). Management of a Holistic Supply Chain Network for Proactive Resilience: Theory and Case Study. *Computers and Industrial Engineering* 125: 668–677.
- Wang, M. & Yao, J. (2023). Intertwined supply network design under facility and transportation disruption from the viability perspective. *International Journal of Production Research*, 61(8), 2513-2543.
- 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.