



## Designing a Resilient Closed-Loop Supply Chain Network under Operational Risk and Disruption Conditions by the Mulvey Approach

**Maryam Bahadoran** 

Ph.D. Candidate., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: bahadoran@phd.iaurasht.ac.ir

**Mehdi Fadaei Ashkiki** \* 

\*Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: fadaei@iaurasht.ac.ir

**Mohammad Taleghani** 

Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: taleghani@iaurasht.ac.ir

**Mahdi Homayounfar** 

Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: homayounfar@iaurasht.ac.ir

### Abstract

**Objective:** While the closed-loop supply chain network was created launch, to design, and exploit the flow of materials between chain centers, supply chains face different risks, including operational ones and disruption. Each of such risks can lead to irreparable damage. Therefore, designing or redesigning supply chains to make them resilient against different risks is one of the most important programs that potentially affect the supply chain's performance. The purpose of this research is to design a resilient closed-loop supply chain network under the operational risks and disruption conditions by the Mulvey approach in Tehran's food industry companies with multi-products.

**Methods:** In this research, the problem of the resilient closed-loop supply chain is considered as a network of nodes (production sites) that are connected by arcs (paths). The model is formulated as an integer programming, the objective function of which involves maximizing the number of nodes in estimating demand and minimizing costs based on a series of scenarios developed by the Mulvey approach.

**Results:** In the practical phase, first, a closed-loop supply chain consisting of 10 manufacturers, 300 distributors, and two types of products was considered for modeling.

Then, three more important scenarios with probabilities of 0.3, 0.2, and 0.5 were developed to present different amounts of customer demand and facilities capacity depending on the number of disruptions. Solving the problem for the multi-product food companies, using the LP metric model showed that despite no disruption in the supply chain, the robust optimal solutions for the first and second objective functions were equal to 99.484 and 790.50, respectively. In terms of manufactured products; in the first node, the amounts of products 1 and 2 did not change for the first and second scenarios but changed by 1.4 and 2.5 units in the third scenario. In the third node, the amount of product 1 did not change for the first scenario, but for the second and third scenarios, it changed by 10.60 and 6.8, respectively. The amount of product 2 did not change for the first and third scenarios but changed by 7.7 for the second scenario. In the 10th node, the amounts of products 1 and 2 did not change for the second scenario, but the amount of product 1 changed by 2.8 and 2.3 for the first and third scenarios. In addition, the amount of product 2 changed by 10.3 and 2.8 for the first and third scenarios, respectively. In the other nodes, the amounts of the products did not change. For both of the products in different nodes, except in nodes 4, 6, 7, and 9, and product 1 in node 8, some problems had to be fixed.

**Conclusion:** According to the findings, developing the proposed model reduces operational risks and disruption as the most important causes of inefficiency in the supply chain. So, it is necessary to design robust and resilient supply chains in all industries, especially in the food industry due to its significance.

**Keywords:** Disruption risk, Operational risk, Resilience closed-loop supply chain, Uncertainty theory.

**Citation:** Bahadoran, Maryam; Fadaei Ashkiki, Mehdi; Taleghani, Mohammad & Homayounfar, Mahdi (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)

---

Industrial Management Journal, 2022, Vol. 14, No 4, pp. 595-617  
Published by University of Tehran, Faculty of Management  
<https://doi.org/10.22059/IMJ.2022.336976.1007909>  
Article Type: Research Paper  
© Authors

Received: January 09, 2022  
Received in revised form: October 09, 2022  
Accepted: November 20, 2022  
Published online: January 20, 2023





## طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال با رویکرد مالی

مریم بهادران

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: bahadoran@phd.iurasht.ac.ir

مهدی فدایی اشکیکی\*

\* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: fadaei@iurasht.ac.ir

محمد طالقانی

دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: taleghani@iurasht.ac.ir

مهدی همایون‌فر

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: homayounfar@iurasht.ac.ir

### چکیده

**هدف:** شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با هدف طراحی، راه‌اندازی و بهره‌برداری از جریان مواد بین مراکز زنجیره‌ای ایجاد شده است؛ اما زنجیره‌های تأمین با ریسک‌های متفاوتی اعم از عملیاتی و اختلال مواجهند که هر یک از آن‌ها می‌تواند به خسارات جبران‌ناپذیری منجر شود؛ بنابراین طراحی یا بازطراحی زنجیره‌های تأمین جهت تاب‌آوری در برابر ریسک‌های متفاوت، یکی از برنامه‌های بسیار مهمی است که به‌طور بالقوه بر عملکرد زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارد. هدف از اجرای این پژوهش، طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال است که در یکی از شرکت‌های فعال در حوزه صنایع غذایی استان تهران با ملاحظات چند محصولی بودن، صورت پذیرفته است.

**روش:** در این پژوهش، مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور، به‌صورت شبکه‌ای از گره‌ها (مکان‌های تولیدی) در نظر گرفته شده است که از طریق یال‌ها (مسیرها) به یکدیگر متصل هستند. مدل به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح فرمول‌ندی شده است که توابع هدف آن، شامل بیشینه‌کردن تعداد گره‌ها در برآورد میزان تقاضا و کمینه‌سازی هزینه‌ها بر اساس یک‌سری از سناریوها با رویکرد مالی بررسی می‌شود.

**یافته‌ها:** الگوریتمی بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، جهت طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی و اختلال با رویکرد مالی بر پایه سناریو ارائه شده است.

**نتیجه‌گیری:** یافته‌ها نشان می‌دهد که با طراحی و ارائه مدل پیشنهادی بر اساس مدل سناریومحور مالی، چنانچه اختلال یا ریسک عملیات در زنجیره تأمین محصولات رخ دهد، طبق سناریوهای تعیین‌شده، شرکت از یک‌سو می‌تواند به‌میزان ۹۹/۴۸۴ واحد از تقاضاها را برآورده کند و از سوی دیگر، به مقدار ۷۹۰/۵۰ واحد هزینه‌ها را کاهش دهد.

**کلیدواژه‌ها:** تئوری عدم قطعیت، ریسک اختلال، ریسک عملیاتی، زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور.

**استناد:** بهادران، مریم؛ فدایی اشکیکی، مهدی؛ طالقانی، محمد و همایون‌فر، مهدی (۱۴۰۱). طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال با رویکرد مالی. مدیریت صنعتی، ۱۴(۴)، ۵۹۵-۶۱۷.

## مقدمه

زنجیره تأمین، شبکه‌ای از روابط درون شرکتی، بین سازمانی و واحدهای تجاری است که متشکل از تأمین کنندگان مواد، امکانات تولید، تدارکات و سیستم‌های مرتبط با تسهیل جریان رو به جلو و معکوس مواد، خدمات، امور مالی و اطلاعات است؛ به طوری که تولید کننده اصلی با ایجاد ارزش افزوده، سبب ایجاد کارایی و جلب توجه مشتریان و حداکثر سودآوری می‌شود (تورجی‌پور، سهراب‌پور، نظری‌پور، آغازی و فیشر<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). با توسعه به سمت جهانی شدن سازمان‌ها و فضای رقابتی، زنجیره تأمین، به تدریج به سیستم عظیم و پیچیده در بین شرکت‌ها و طراحی شبکه زنجیره تأمین، به یکی از فعالیت‌های مهم برنامه‌ریزی در شبکه تأمین تبدیل شده است که یک مسئله زیرساختی در مدیریت زنجیره تأمین است که در سطح فعالیت‌های عملیاتی و تاکتیکی اثر درازمدتی دارد (پیراوینان، جینگ، ماتوس و تودو<sup>۲</sup>، ۲۰۲۰). مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته، شامل تشکیل شبکه و راه‌اندازی جریان مواد بین مراکز زنجیره، جهت دستیابی هم‌زمان به اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است که ایجاد و ترویج توسعه پایدار را سبب می‌شود (ژانگ، تیان، فتح‌اللهی فرد و لی<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰).

امروزه شبکه‌های زنجیره تأمین با تغییرات آب‌وهوایی، قوانین اجتماعی و محیط آشفته و پیچیده در معرض ریسک‌های مختلفی قرار می‌گیرند که به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: ریسک‌های اختلال ناشی از حوادث پیش‌بینی‌ناپذیر خارجی، مانند بلایای طبیعی و حمله‌های دست‌ساز بشر که می‌توان این‌ها را اقدام‌های غیر رسمی دانست و به ندرت اتفاق می‌افتد؛ اما تولید را برای مدتی معین متوقف می‌کند و زیان‌های اقتصادی جدی و تأثیرهای اجتماعی به دنبال دارد. دسته دوم، ریسک‌های عملیاتی هستند که معمولاً از تنوع زیاد پارامترهای داخلی مانند تقاضا، تأمین و هزینه نشئت می‌گیرند و علی‌رغم تأثیر نامطلوب کمی که بر زنجیره تأمین می‌گذارند، با فرکانس نسبتاً بالاتری اتفاق می‌افتند. زنجیره تأمین نو، به دلیل ارائه خدمات شخصی بر اساس نیازهای مشتریان، چرخه عمر کوتاه‌تر محصولات و نوآوری‌های تکنولوژیکی، احتمال افزایش ریسک را دارد. به دلیل افزایش ریسک عملیاتی و پیامدهای مخرب ریسک اختلال، محققان به تجهیز زنجیره تأمین با توانایی پیشگیری مؤثر، پاسخ‌گویی به موقع و بهبود سریع ناشی از عوارض جانبی این ریسک‌ها، توجه بیشتری داشته‌اند (دیگزایت، ورما و تیواری<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰). این توانایی با عنوان تاب‌آوری در زنجیره تأمین شناخته شده است. ایجاد تاب‌آوری در طراحی زنجیره تأمین در مراحل برنامه‌ریزی، برای کاهش پیامدهای پیش‌بینی‌ناپذیر ضروری است؛ زیرا پیکربندی زنجیره تأمین، امری پرهزینه است و به محض ساخت و شکل‌گیری آن، برگشت‌پذیر نیست (صبحی، پیشوایی و جبل‌عاملی، ۱۳۹۶).

هدف از تاب‌آوری، بقای طولانی‌مدت سیستم مدنظر است و شبکه‌های زنجیره تأمین باید برنامه مقابله با هر نوع اختلال را آماده کنند. تاب‌آوری، طول عمر شرکت‌ها را از طریق مقابله با اختلال‌ها افزایش می‌دهد. از دیدگاه مدیریتی، تاب‌آوری، توانایی بازیابی حالت اولیه و رسیدن به شرایط بهتر، پس از اختلال است (زارع مهرجردی و شفییعی، ۱۳۹۹).

1. Toorajipour, Sohrabpour, Nazarpour, Oghazi & Fischl
2. Piraveenan, Jing, Matous, & Todo
3. Zhang, Tian, Fathollahi-Fard, & Li
4. Dixit, Verma, & Tiwari

ضمانت تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین معمولاً به اقدام‌های پیشگیرانه، رفتارهای واکنشی و استراتژی بازاریابی در برابر اختلال‌ها مرتبط است و این اختلال‌ها، به‌عنوان رویدادهای غیر منتظره‌ای تعریف می‌شوند که عملکرد عادی جریان کالا و خدمات را در شبکه زنجیره تأمین مختل می‌کنند (باقرصاد و زوبل<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور، محققان مطالعات گوناگونی از منظر مدیریت ریسک (دی‌اولیوریا، مارینز، روچا و سالومون<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷؛ ساگلم، کانکایا و سزن<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰)، نظریه کنترل (ایوانف، ستی، دالگوی و سوکولو<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸) و مدل‌سازی و شبیه‌سازی ریاضی (پاولف، ایوانف، دالگوی و سوکولو<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸) انجام داده‌اند. ساختار شبکه زنجیره تأمین، تأثیر چشمگیری بر تاب‌آوری دارد؛ زیرا ساختارهای مختلف شبکه در مقابل اختلال‌ها، تاب‌آوری متفاوتی از خود نشان می‌دهند؛ برای مثال، شبکه بدون مقیاس در برابر اختلال‌های هدف، آسیب‌پذیرتر است؛ در حالی که شبکه تصادفی تاب‌آور است؛ به همین صورت، خرابی موضعی در یک شبکه، ممکن است سبب خرابی کل زنجیره تأمین به‌دلیل تعامل بین شرکت‌ها شود که به آن خرابی‌های آبشاری یا اثرهای موج‌دار می‌گویند (دولگو و ایوانف<sup>۶</sup>، ۲۰۲۰). موضوع مهم دیگر، روش‌های کنترل عدم قطعیت است، هرچه عدم قطعیت به مسئله اضافه شود، مسئله پیچیده‌تر شده و بهینه‌سازی آن سخت‌تر است. با در نظر گرفتن حالت استوار و عدم قطعیت، از نظر علمی کار دشوارتر می‌شود. همچنین در حالت عدم قطعیت که سناریوهای مختلفی می‌تواند داشته باشد، ضرورت تحقیق نمایان می‌شود. با پیچیده شدن زنجیره‌های تأمین، اعضای زنجیره با اختلال‌های زیادی مواجه می‌شوند که بر عملکرد آن‌ها تأثیرهای منفی دارد. اگر برنامه مناسبی در این زمینه انجام نشود، خسارت‌های بسیاری را متوجه زنجیره خواهد کرد. اختلال، تأثیر منفی و مخربی بر عملکرد زنجیره دارد که پس از وقوع، به‌راحتی ترمیم نمی‌شود. پس با استفاده از یک برنامه بهبود در زنجیره، می‌توان تلفات ناشی از اختلال را کاهش داد و در نتیجه زیان‌های ناشی از آن را حداقل کرد. تیرکلاهی، مهدوی، اصفهانی و وبر<sup>۷</sup> (۲۰۲۰) روش برنامه‌نویسی تصادفی بهینه‌سازی استوار و در پژوهشی مشابه، تیرکلاهی، گلی و وبر<sup>۸</sup> در سال (۲۰۱۹) برنامه‌نویسی فازی و تموجین و وبر<sup>۹</sup> (۲۰۱۴) روش بهینه‌سازی تصادفی برای مواجهه با عدم قطعیت را پیشنهاد کردند.

در این مقاله به مفاهیم زنجیره تأمین حلقه بسته و تاب‌آوری آن در برابر ریسک اختلال‌ها و عملیاتی توجه شده و شکاف تحقیقات مرتبط تا حد امکان پوشش داده شده است. در این مطالعه، طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور، تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال در سطوح تولید کنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان بررسی شده است. ابتدا مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل‌سازی شده و به‌دلیل یکپارچگی بالای حل آن در مسائل بزرگ، رویکرد مالوی مورد استفاده قرار گرفته است.

در ادامه، ادبیات و پیشینه پژوهش زنجیره تأمین و اختلال‌های مختلف مرور شده است. در بخش سوم، روش‌شناسی

1. Baghersad & Zobel
2. de Oliveira, Marins, Rocha, & Salomon
3. Saglam, Çankaya & Sezen
4. Ivanov, Sethi, Dolgui, & Sokolov
5. Pavlov, Ivanov, Dolgui, & Sokolov
6. Dolgui & Ivanov
7. Tirkolaee, Mahdavi, Esfahani, & Weber
8. Tirkolaee, Goli, & Weber
9. Temoçin & Weber

پژوهش معرفی شده است. در بخش بعد، مدل زنجیره تأمین تاب‌آور پیشنهادی ارائه شده و سناریوهای مختلف اختلال، شبیه‌سازی شده است و در پایان، تجزیه و تحلیل، نتایج و پیشنهادهای کاربردی بیان خواهد شد.

### پیشینه پژوهش

زاهدی، صالحی امیری، حاجی آقایی کشتلی و دیابت (۱۴۰۰) به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن نمایندگی‌های فروش چندمنظوره و حمل و نقل چندحالتی با هدف حداکثر کردن سودآوری پرداختند. مدل پیشنهادی دارای چهار گام به جلو و پنج گام به عقب است. آن‌ها ابتدا خوشه‌ای متمایز از مشتریان را بر اساس چرخه عمر محصول در نظر گرفتند و سپس، در سطوح مختلف شبکه پیشنهادی، به منظور خرید محصولات نهایی، محصولات بازگشتی و محصولات بازیافتی را بررسی کردند.

تیان، شی، شی، لی و ژانگ<sup>۱</sup> (۲۰۲۱) به طراحی شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور با در نظر گرفتن خروج و انتخاب شرکت‌ها پرداختند. آن‌ها تأثیر ساختارهای شبکه را بر تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین از دیدگاه شبکه‌های پیچیده مطالعه کردند. مدل جدید شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی آن‌ها، بر اساس درجه، تناسب و فاصله با یکدیگر مرتبط بود. پس از آن، سناریوهای مختلف برای اختلال، شبیه‌سازی شد و انعطاف‌پذیری شبکه زنجیره تأمین تولید شده توسط مدل پیشنهادی با مدل‌های قبلی مقایسه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شبکه زنجیره تأمین تولید شده در برابر اختلال‌های تصادفی مقاوم است؛ اما در برابر اختلال‌های هدف، آسیب‌پذیر است. به طور خاص، انعطاف‌پذیری شبکه زنجیره تأمین هنگامی که اتحاد قوی - قوی شکسته شود، به طور جدی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ساختار مدل بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی است و برای تأیید کارایی مدل، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری و ترکیبی استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ویژگی‌های مراکز نمایندگی فروش و خوشه‌بندی مشتریان، هم مشکل درآمد کل و هم تعداد محصولات برگشتی را رفع می‌کند.

نیری، پایدار، اسدی گنگرج و امامی<sup>۲</sup> (۲۰۲۰) یک مدل چندهدفه زنجیره تأمین حلقه بسته را توسعه دادند که هدف آن حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن تأثیرهای اجتماعی بود. شبکه ارائه شده، تجهیزات و جریان کل محصولات را بهینه می‌کند.

آکورسی، باروفالدی و منزینی<sup>۳</sup> (۲۰۲۰) مدلی با تابع هدف حداقل کردن هزینه کل ارائه کردند. این پژوهش جنبه‌های تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی را در نظر گرفته است و با توسعه چند سناریو، پژوهشگران دریافتند که شبکه پیشنهادی می‌تواند به طور چشمگیری سودآوری را با استفاده از رفع مشکل بسته‌بندی، بهبود بخشد.

فتح‌اللهی‌فرد، حاجی آقایی کشتلی، تیان و لی<sup>۴</sup> (۲۰۲۰) یک شبکه زنجیره تأمین چند هدفه حلقه بسته ارائه کردند که به طور هم‌زمان هزینه‌های زنجیره تأمین و اثرهای زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند.

1. Tian, Shi, Shi, Li, & Zhang

2. Nayeri, Paydar, Asadi Gangraj & Emami

3. Accorsi, Baruffaldi, & Manzini

4. Fathollahi Fard, Hajiaghaei Keshteli, Tian & Li

شیر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۱) به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن معیارهای پایداری و تاب‌آوری با استفاده از مدل‌سازی برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای پرداختند که اهداف مدل پیشنهادی، حداقل کردن هزینه کل، آلودگی زیست‌محیطی، مصرف انرژی و حداکثر کردن فرصت‌های شغلی به‌عنوان عوامل اجتماعی است. برای حل مدل از روش LP متریک و روش لاگرائز استفاده شده است.

مهرجردی و شفیعی (۱۳۹۹) به طراحی مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن پایداری و تاب‌آوری پرداختند. آن‌ها اشتراک اطلاعات و منابع چندگانه را به‌عنوان استراتژی‌های اول و دوم انتخاب کردند و بر اساس این استراتژی‌ها، یک مدل ترکیبی برنامه‌ریزی چندهدفه برای زنجیره تأمین حلقه بسته طراحی کردند که ابعاد مختلف پایداری، از طریق کاهش هزینه کل، مصرف انرژی، آلودگی و افزایش فرصت‌های شغلی مدنظر قرار گرفته است و برای توسعه مدل، از تاب‌آوری بیشتر زنجیره تأمین در اشتراک‌گذاری اطلاعات و استراتژی‌های متعدد منابع استفاده شده است. این پژوهش بر مدیریت اختلال و ریسک عملیاتی در سطوح تولید کنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان تمرکز کرده است و تلاش می‌کند تا میزان تأثیر حاصل از اختلال کمینه شود. به همین علت، در جدول ۱ به بررسی مطالعات مرتبط با طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با ملاحظات تاب‌آوری پرداخته شده است تا سهم پژوهش حاضر در بحث دانش‌افزایی و مرتفع ساختن خلأ تحقیقاتی مطالعات پیشین مشخص شود.

جدول ۱. مطالعات مرتبط در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با ملاحظات تاب‌آوری

رویکرد تحلیل استواری	روش حل		تولید، توزیع، مشتری اختلال در سطوح	ریسک عملیاتی		نوع زنجیره		شبکه تأمین		تابع هدف	نویسنده و سال تحقیق
	فرا ابتکاری	دقیق		عدم قطعیت	خرابی	تاب‌آور	حلقه بسته	چند محصولی	تک محصولی	هزینه	
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	پژوهش حاضر (۱۴۰۱)
	✓	✓		✓		✓	✓	✓		✓	ولی‌سیار، روغنیان و جبارزاده <sup>۲</sup> (۲۰۲۲)
✓		✓		✓	✓		✓			✓	موندال و کومار روی <sup>۳</sup> (۲۰۲۱)
		✓				✓				✓	قربانپور، جمالی و موسوی (۱۴۰۰)
		✓		✓	✓		✓	✓	✓		زرشکی و مؤمنی (۱۳۹۹)
		✓				✓	✓		✓	✓	زارع مهرجردی و شفیعی (۱۳۹۹)

1. Shabbir et al.

2. Vali-Siar, Roghanian & Jabbarzadeh

3. Mondal & Kumar Roy

رویکرد تحلیل استواری	روش حل		تولید، توزیع، مشتری اختلال در سطوح	ریسک عملیاتی		نوع زنجیره		شبکه تأمین		تابع هدف	نویسنده و سال تحقیق
	فرا ابتکاری	دقیق		عدم قطعیت	خرابی	تاب‌آور	حلقه بسته	چند محصولی	تک محصولی	هزینه	
	✓	✓		✓			✓	✓		✓	زمانیان، نصراللهی و فتحی (۱۳۹۸)
	✓	✓					✓	✓		✓	آقایی و حاجیان حیدری (۱۳۹۸)
	✓	✓		✓			✓	✓		✓	محمدی، عالم تبریز و پیشوایی (۱۳۹۷)
✓	✓		✓	✓			✓	✓		✓	ژانگ، تیان، فتح‌اللهی فرد و لی (۲۰۲۰)
		✓					✓	✓		✓	امین طهماسبی، راهب و جعفریه <sup>۱</sup> (۲۰۱۸)
				✓			✓	✓		✓	طلایی، فرهنگ مقدم، پیشوایی، بزرگی امیری، غلام‌نژاد (۲۰۱۶)
	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	صفار، شکوری گنجوی و رزمی (۱۳۹۳)
		✓		✓			✓	✓		✓	حسن‌زاده و ژانگ <sup>۲</sup> (۲۰۱۳)
✓		✓		✓			✓	✓		✓	رضائی، بشیری و توکلی مقدم (۲۰۱۲)

مطالعه متون و بررسی شکاف تحقیقاتی نشان می‌دهد که در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور، تحت شرایط عدم قطعیت و اختلال، در سطوح نام‌برده و با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار (با رویکرد مالوی) تحت سناریوهای موجود، در پژوهش‌ها و تحقیقات صورت گرفته با مفروضات مسئله پیش رو، مطالعه مشابهی وجود ندارد.

### روش‌شناسی پژوهش

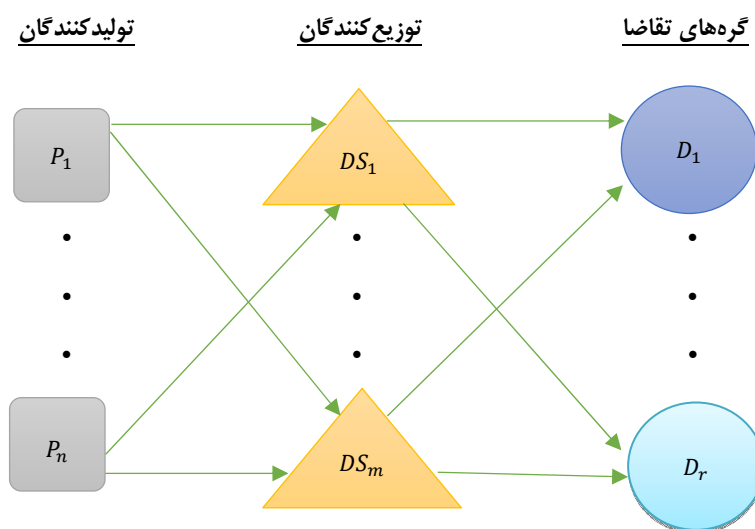
در این پژوهش از رویکرد مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح، مدل ریاضی مسئله فرموله می‌شود و سپس مدل به یک مدل استوار توسعه می‌یابد. بر اساس طبقه‌بندی جان واکر<sup>۳</sup> (۱۹۹۸)، روش پژوهش حاضر، تحلیلی - ریاضی و از نظر هدف، کاربردی است. برای جمع‌آوری داده‌ها از بانک‌های اطلاعاتی یکی از شرکت‌های فعال در حوزه صنایع غذایی استان تهران استفاده شده است. این مطالعه موردی، به شکل چند محصولی است و مفروضات مسئله تحقیق، در شرایط

1. Amin-Tahmasbi, Raheb, & Jafariyeh  
 2. Hasanzadeh & Zhang  
 3. Jan Wacker



عدم قطعیت جهت ارائه مدل سازی ریاضی در نظر گرفته شده است. حل مدل سازی پژوهش در نرم افزار لینگو<sup>۱</sup> انجام گرفته است. مدل ارائه شده مرتبط با یک زنجیره تأمین چند محصولی با دو هدف حداکثرسازی تاب آوری و حداقل سازی هزینه است که به تصمیم گیرنده قدرت می دهد تا با توجه به شرایط مسئله موجود جواب بهینه را انتخاب کند. به طور خلاصه، مدل ارائه شده، تعیین کننده میزان ظرفیت تولید برای هر گره<sup>۲</sup>، ظرفیت های هر یال<sup>۳</sup> و برنامه عملیاتی برای تعیین مقدار تولید، مکان تولید و همچنین مسیر تولید هر محصول است.

در این مدل، بهینه سازی هزینه ها با تصمیم گیری طراحی شبکه (گسترش تولید و ظرفیت)، سطح تولید و مسیریابی مرتبط است. با توجه به ملاحظات اختلال (آسیب پذیری در شرایط عدم قطعیت) در مدل، تابع هدف اول با توجه به وزن تقاضای ورودی به گره تقاضا، بهینه سازی شده است. شکل ۱، نمای تصویری از شبکه زنجیره تأمین مسئله است؛ گره های  $P_1$  تا  $P_n$  تولید کننده محصول  $P$  ( $P = \sum P_i, \forall i = 1, 2, \dots, n$ )، گره های  $DS_1$  تا  $DS_m$  ( $DS = \sum DS_i, \forall i = 1, 2, \dots, m$ ) توزیع کننده محصول  $P$  و گره های  $D_1$  تا  $D_r$  ( $D = \sum D_i, \forall i = 1, 2, \dots, r$ ) گره های تقاضا برای محصول با توجه به تعداد تقاضای ورودی به گره هستند.



شکل ۱. نمای تصویری از شبکه زنجیره تأمین مسئله

### بیان مسئله و ارائه مدل پیشنهادی

ابتدا مسئله در دست بررسی تشریح می شود و پس از آن با استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح، مدل ریاضی مسئله فرموله می شود و سپس به یک مدل استوار توسعه می یابد. در مرحله اول، مدل بهینه سازی دو هدفه برای طراحی شبکه های زنجیره تأمین تاب آور با در نظر گرفتن اختلال در تأمین و مسیر، ارائه شده است. در این مدل، پارامترهای  $DIN^4$  و

1. Lingo  
2. Node  
3. Arc  
4. Disruption in Node

DIA<sup>۱</sup> تعریف شده‌اند. با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف، S به مسئله اضافه شده است تا امکان مدل‌سازی مسئله به شکل سناریو محور امکان‌پذیر باشد. بنابراین، اگر گره  $i$  در سناریو S برقرار باشد،  $i$  برابر با ۱ و اگر گره  $i$  در سناریو S مختل باشد، برابر با صفر است. به‌طور کلی، احتمال رخداد اختلال در گره و یا رخداد اختلال در یال در هر سناریو وجود دارد. از آنجا که بیش از یک سناریو لحاظ شده است، مدل غیر قطعی است. در مرحله بعد، مدل بهینه‌سازی استوار دوهدفه بر مبنای رویکرد مالوی برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین تاب‌آور با در نظر گرفتن اختلال در تأمین و مسیر ارائه شده است. در این قسمت، مدل اولیه تحقیق با ملاحظه رویکرد بهینه‌سازی استوار، یک مرحله دیگر توسعه یافته است. در این مدل تابع هدف به دو بخش تفکیک می‌شود که شامل استواری در مدل و جواب می‌شود. در استواری مدل ممکن است، در بعضی از قسمت‌های مدل، جواب غیرموجه داشته باشیم. بنابراین استواری، میزان غیرموجه بودن در سناریوهای غیر موجه را کمینه می‌سازد؛ ولی در استواری جواب، اگر جواب بهینه، همان جواب بهینه استوار باشد، بهینگی تحت هیچ شرایطی تغییر نمی‌کند. در زنجیره تأمین مدنظر، ظرفیت یال‌ها، مستقل از تقاضا بوده است. کمبود تقاضا مجاز نیست و امکان اختلال در مراکز وجود دارد. رخداد یا عدم رخداد اختلال در سناریوهای مختلف، متفاوت است. امکان اختلال در یال‌ها وجود دارد. ظرفیت تولید در دو سطح بالا و پایین و به صورت قطعی تعریف شده است. ظرفیت انتقال کالا در یال‌ها در دو سطح بالا و پایین و به صورت قطعی تعریف می‌شود. شاخص تاب‌آوری زنجیره بر اساس تعداد یال‌های ورودی به گره‌های تقاضا تعیین می‌شود. مقدار تقاضای هر مشتری از هر محصول در سناریوهای مختلف، متفاوت است. در ادامه، پارامترها و متغیرهای اساسی مسئله، جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با لحاظ کردن تاب‌آوری زنجیره ارائه شده است.

### مؤلفه‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین بدون ملاحظات سناریو

#### مجموعه‌ها

$N$ : مجموعه‌ای از همه گره‌ها است.

$E$ : مجموعه‌ای از همه یال‌ها است.

$P$ : مجموعه‌ای از همه کالاها است.

$D_p, S_p$ : مجموعه‌ای از گره‌های تقاضا و تأمین است.

$FS(i)$ : مجموعه‌ای از همه گره‌هایی است که از گره  $i$  خارج می‌شوند.

$RS(i)$ : مجموعه‌ای از همه گره‌هایی است که به گره  $i$  وارد می‌شوند.

#### متغیرها

$z_{ip}$ : متغیر صفر و یک که اگر کالای نوع P را در گره  $i$  با ظرفیت بالا تولید کنیم برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.

$y_{ij}$ : متغیر صفر و یک که اگر کالای نوع  $z$  در یال  $i$  با ظرفیت بالا منتقل شود برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.  
 $w_{ip}$ : مقدار محصول  $P$  تولید شده در گره  $i$  است.  
 $x_{ijp}$ : جریان محصول  $P$  روی یال  $ij$  است.  
 $x_{ijkp}$ : یال‌های  $i$  و  $j$  برای رساندن محصول  $P$  به گره تقاضای  $k$ ، فعال است یا خیر.  
 $v_{kp}$ : تعداد گره‌هایی است که در مسیر تقاضای محصول  $P$  به گره تقاضای  $k$  ختم می‌شوند.

### پارامترها

$d_{ip}$ : تقاضا برای محصول  $P$  در گره  $i$  است.  
 $b_{ijp}$ : هزینه هر واحد جریان محصول  $P$  روی یال‌های  $i$  و  $j$  را نشان می‌دهد.  
 $c_{ip}$ : هزینه هر واحد از محصول  $P$  تولید شده روی گره  $i$  است.  
 $u_{ij}^+$ ,  $u_{ij}^-$ : جریان ظرفیت یال‌های  $i$  و  $j$  در سطوح بالا و پایین را نشان می‌دهد.  
 $r_{ip}^+$ ,  $r_{ip}^-$ : ظرفیت تولید برای محصول  $P$  روی گره  $i$  در سطوح بالا و پایین را نشان می‌دهد.  
 $f_{ij}$ : هزینه وارد شده به جریان ظرفیت یال‌های  $i$  و  $j$  است که اگر با ظرفیت بالا روی یال قرار بگیریم.  
 $g_{ip}$ : هزینه وارد شده به جریان ظرفیت گره‌های  $i$  و  $j$  است که اگر با ظرفیت بالا روی گره قرار بگیریم.

### مؤلفه‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین مبتنی بر سناریو

#### مجموعه‌ها

$S$ : سناریوهای مدل را نشان می‌دهد.

#### متغیرها

$\gamma_1$ : وزن استواری جواب در تابع هدف اول است.  
 $\gamma_2$ : وزن استواری جواب در تابع هدف دوم است.  
 $\theta_s$ : متغیر کمکی میزان انحراف‌ها در سناریو  $s$  است.  
 $\omega$ : وزن استواری مدل را نشان می‌دهد.  
 $\eta_{ips}$ : متغیری است که میزان ناموجه بودن مدل را نشان می‌دهد.

#### پارامترها

$DIN$ : احتمال رخداد خرابی برای گره  $i$  در سناریو  $s$  است.  
 $DIA$ : احتمال رخداد خرابی برای یال  $ij$  در سناریو  $s$  است.  
 در ادامه به شرح توابع هدف تحقیق به همراه محدودیت‌های مسئله جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال پرداخته می‌شود.

$$\text{Max } V = \sum_{p \in P} \sum_{k \in D_p} d_{ips} \cdot v_{kp} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Min } C = \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} (1 - DIN_{is}) \cdot (c_{ip} \cdot w_{ips} + g_{ip} \cdot z_{ip}) + \sum_{(i,j) \in E} (1 - DIA_{ijs}) \cdot (f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{p \in P} b_{ijp} \cdot x_{ijps}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

s.t:

$$\sum_{j \in RS(i)} x_{jips} + w_{ips} = \sum_{j \in FS(i)} x_{ijps} + d_{ips} \quad \forall p \in P, i \in N \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$w_{ips} \leq r_{ip}^- + (r_{ip}^+ - r_{ip}^-) \cdot z_{ip} \quad \forall p \in P, i \in N \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijps} \leq u_{ij}^- + (u_{ij}^+ - u_{ij}^-) \cdot y_{ij} \quad \forall (i, j) \in E \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$x'_{ijkp} \leq 1 - L_{\{u_{ij}^- = 0\}} (1 - y_{ij}) \quad \forall p \in P, k \in D_p, (i, j) \in E \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} \leq 1 - L_{\{r_{ip}^- = 0\}} (1 - z_{ip}) \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in S_p \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} \leq 1 \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in N \setminus (S_p \cup \{k\}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} - \sum_{j \in RS(i)} x'_{jikp} = 0 \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in N \setminus (S_p \cup \{k\}) \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_{i \in RS(j)} x'_{ijkp} = v_{kp} \quad \forall p \in P, k \in D_p$$

$$\sum_{i \in RS(j)} x'_{ijkp} = v_{kp} \quad \forall p \in P, k \in D_p \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$w_{ips} \leq (1 - DIN_{is}) \cdot M \quad \forall p \in P, i \in N \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijps} \leq (1 - DIA_{ijs}) \cdot M \quad \forall (i, j) \in E \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$x_{ijps} \geq 0 \quad \forall p \in P, (i, j) \in E, s \in S \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$w_{ips} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in N, s \in S$$

$$v_{kp} \geq 0 \quad \forall p \in P, k \in D_p$$

$$x_{ijkp} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, k \in D_p, (i, j) \in E$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in E$$

$$z_{ip} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, i \in N$$

تابع هدف ۱ عبارت است از، حداکثر کردن تعداد گره‌ها در تقاضاها. تابع هدف ۲، کمینه‌سازی هزینه‌ها است که هزینه‌های تولید یک واحد محصول در ساعات عادی، ساعات اضافه کاری، هزینه تأمین یک واحد محصول توسط تأمین‌کنندگان، توسط مرکز نگهداری و تعمیر، هزینه یک نفر کارگر در ساعت کار عادی، هزینه یک نفر کارگر در ساعت کار اضافه کاری، هزینه استفاده و اخراج نیروی انسانی، هزینه نگهداری یک واحد محصول در انبار تولید کننده را شامل می‌شود. رابطه ۳، محدودیت مرتبط با تقاضا است و برآورده‌سازی تقاضا را بیان می‌کند که در آن کمبود تقاضا مجاز نیست و تعادل تقاضا برقرار است؛ یعنی به ازای هر محصول و هر گره، مجموعه محصولاتی که از همه یال‌ها وارد آن گره می‌شوند، به اضافه مقدار تولیدی در آن گره، این مقدار برابر است با مقدار محصولی که از آن گره خارج می‌شود به اضافه مصرف خود آن گره.

محدودیت ۴، مربوط به رابطه بین تولید و متغیری صفر و یک است؛ به طوری که تعیین می‌کند تولید با ظرفیت سطح بالا یا سطح پایین صورت گرفته و روی گره‌ها اعمال شده است. همچنین چنانچه  $w$  برابر با صفر باشد، تولید نداریم. محدودیت ۵ مربوط به رابطه بین تولید و متغیری صفر و یک است؛ به طوری که تعیین می‌کند تولید با ظرفیت سطح بالا یا سطح پایین صورت گرفته و روی یال‌ها اعمال شده است. همچنین چنانچه  $x$  برابر با صفر باشد، تولید صورت نگرفته است. رابطه ۶ محدودیت تابع دو ضابطه‌ای روی پارامترها است؛ یعنی هنگامی که تولید کالای نوع  $z$  در یال  $i$  برابر با یک باشد، می‌توانیم با ظرفیت بالا روی یال‌ها جریان داشته باشیم و هنگامی که تولید کالای نوع  $z$  در یال  $i$  برابر با صفر باشد، می‌توانیم با ظرفیت پایین روی یال‌ها جریان داشته باشیم.

رابطه ۷ محدودیت یک تابع دو ضابطه‌ای می‌باشد؛ یعنی هنگامی که یالی وجود داشته باشد که جریان سطح بالا نداشته باشد و ظرفیت سطح پایین آن را هم صفر در نظر گرفته باشیم، یال نام‌برده برای رساندن محصول مدنظر، فعال نیست؛ بنابراین یال نام‌برده برای رساندن آن محصول به آن تقاضا فعال نیست و آن یال برای رساندن محصول به آن گره به کار گرفته نمی‌شود؛ پس در این صورت هیچ مسیری نمی‌توانیم داشته باشیم.

محدودیت ۸، به ازای یال‌هایی کار می‌کند که  $i$  آن‌ها تأمین کننده باشد و  $z$  آن‌هایی باشد که در حال خارج شدن از یال هستند. این محدودیت هنگامی برقرار است که به ازای هر گره تعیین کننده  $i$  عضو  $S_p$ ، آن‌ها یالی که می‌توانند

مجموع یال‌هایی را شامل شوند که آن یال‌ها به گره‌هایی که به گره  $i$  متصل هستند، وصل شوند. چنانچه جریان سطح بالا وجود نداشت و ظرفیت سطح پایین هم صفر در نظر گرفته شد، می‌توان گفت که از آن یال برای انتقال مسیر، هیچ استفاده‌ای نشده است. محدودیت ۹ بیان می‌کند که چنانچه گره‌ای تولید سطح بالا نداشت و ظرفیت تولید هم صفر بود، در این صورت آن یال نمی‌تواند برای رسیدن به آن محصول یا به آن تأمین‌کننده نقشی داشته باشد. محدودیت ۱۰ بیانگر فعال بودن یال  $i$  و  $j$  برای رساندن محصول  $P$  به گره تقاضای  $k$  است؛ یعنی تمام گره‌هایی که می‌توانستند به  $k$  ورود پیدا کنند. محدودیت ۱۱ بیانگر مقدار محصول  $P$  تولید شده در گره  $i$  است. محدودیت ۱۲ بیانگر جریان محصول روی یال و محدودیت ۱۳ نشان‌دهنده نوع و بازه متغیرها است.

### ارائه مدل پارامتریک بهینه استوار تحت رویکرد مالوی

در این مدل، تابع هدف به دو بخش شامل استواری در مدل و جواب تقسیم شد. در استواری مدل ممکن است در بعضی از قسمت‌های مدل، جواب غیر موجه داشته باشیم. بنابراین استواری میزان غیر موجه بودن در سناریوهای غیر موجه را کمینه می‌سازد؛ ولی در استواری جواب، اگر جواب بهینه ما، همان جواب بهینه استوار باشد، بهینگی تحت هیچ شرایطی تغییر نمی‌کند. بر اساس پژوهش‌های مروری انجام شده در حوزه بهینه‌سازی استوار، روشی که مالوی و روزینسکی<sup>۱</sup> (۱۹۹۵) ارائه کردند، قابلیت دارد که میزان ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده یا میزان سطح خدمت را در نظر بگیرد و همچنین این روش جواب‌هایی را ارائه می‌دهد که نسبت به تحقق داده‌های هر یک از سناریوهای موجود در مجموعه سناریوها، حساسیت کمی دارند. در این روش دو نوع محدودیت داریم: محدودیت‌های ساختاری و محدودیت‌های کنترلی. محدودیت‌های ساختاری، محدودیت‌هایی هستند که داده‌های ورودی این محدودیت‌ها دچار اغتشاش نمی‌شوند و عدم قطعیت در آن‌ها تأثیری ندارد. متغیرها نیز به دو دسته متغیرهای کنترلی و متغیرهای طراحی، تقسیم‌بندی می‌شوند. متغیرهای طراحی، متغیرهایی هستند که مقدار بهینه آن‌ها با تحقق هر سناریو تغییر نمی‌کند. ولی متغیرهای کنترلی، متغیرهایی هستند که در صورت وقوع هر مقدار از پارامترهای غیر قطعی، مقدار بهینه آن‌ها متفاوت خواهد بود و دستخوش تغییر می‌شود. در واقع مقدار بهینه آن‌ها بستگی به مقدار پارامترهای غیر قطعی که تحقق می‌یابد و مقدار بهینه متغیرهای طراحی دارد. معمولاً در این روش  $x \in R^{n1}$ ، بیانگر بردار متغیرهای طراحی است و  $y \in R^{n2}$ ، بیانگر بردار متغیرهای کنترلی است. فرم کلی مدل بهینه‌سازی استوار بر اساس این روش، به شکل زیر است:

$$\text{Min: } c^T x + d^T y \quad \text{رابطه ۱۴}$$

s.t:

$$Ax = b \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$Bx + Cy = e \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$x \geq 0, y \geq 0 \quad \text{رابطه ۱۷}$$

محدودیت ۱۵ بیانگر یک محدودیت ساختاری است که ضرایب آن ثابت است و اغتشاش‌ها روی آن‌ها تأثیری ندارد. محدودیت ۱۶ بیانگر محدودیت کنترلی است که ضرایب آن تحت تأثیر اغتشاشات قرار می‌گیرد. محدودیت ۱۷ برای اطمینان از مثبت بودن متغیرها است. در نظر داشته باشید که مسائل به‌وسیلهٔ این روش بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو با مجموعه‌ای از سناریوها به صورت  $\Omega = \{1,2,3, \dots, S\}$  فرموله می‌شود. تحت هر سناریو که  $s \in \Omega$  ضرایب محدودیت‌های کنترلی برابر با  $\{ds, Bs, Cs, e_s\}$  و با احتمال ثابت  $p_s$  خواهد بود که نشانگر احتمال وقوع هر سناریو  $s \in \Omega$  است؛ به طوری که  $\sum_{s=1}^S p_s = 1$  است. برای مدل‌سازی با این رویکرد، در ابتدا باید متغیرهای کنترلی  $y_s$  برای  $s \in \Omega$  و بردار خطا  $\delta_s$  که میزان نشدنی بودن مجاز در محدودیت‌های کنترلی را در هر  $s \in \Omega$  اندازه می‌گیرد، تعیین شود. مدل بهینه‌سازی استوار مینی بر سناریو برای مدل برنامه‌ریزی ریاضی بدین صورت فرموله می‌شود:

$$\text{Min } \sigma(x, y_1, \dots, y_s) + \omega \rho(\delta_1, \dots, \delta_s) \tag{۱۸}$$

s.t.

$$Ax = b \tag{۱۹}$$

$$B_s x + C_s y_s + \delta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega \tag{۲۰}$$

$$x \geq 0, y_s \geq 0, \delta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \tag{۲۱}$$

رویکرد بهینه‌سازی استوار فوق‌الذکر، چندین سناریو را در نظر می‌گیرد، اولین عبارت تابع هدف، یک هدف اجماع شده از رابطهٔ ۱۴ است.  $\xi = c^T x + d^T y$ ، یک متغیر تصادفی است که هر یک از مقادیر  $\xi_s = c^T x + d^T y_s$  با احتمال  $p_s$  در هر سناریو  $s \in \Omega$  می‌گیرد. در برنامه‌ریزی تصادفی خطی، یک مقدار میانگین  $\sigma(\cdot) = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s$  استفاده می‌شود. در این روش بر کاربردهای برنامه‌ریزی تصادفی غیر قطعی که به بهینه‌سازی استوار مدل منجر می‌شود، تمرکز شده است؛ به طوری که درجات بالاتر از توزیع  $\xi_s$  در مدل بهینه‌سازی معرفی شده است. در نتیجه، جواب بهینه در برابر داده‌ها غیر قطعی و اغتشاش داده‌ها حساسیت کمتری دارد. دومین عبارت تابع هدف،  $\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$ ، تابع جریمه است. به منظور جریمه نقض شدن محدودیت‌های کنترلی در بعضی از سناریوهاست. نقض شدن محدودیت‌های کنترلی، به این معنا است که در بعضی از سناریوها جواب نشدنی به دست آمده است. بر اساس توضیحات داده شده، مدل همتای استوار به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Max } V = \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{k \in D_p} q_s \cdot d_{kps} \cdot v_{kp} \tag{۲۲}$$

$$- \gamma_1 \sum_{s \in S} q_s \cdot \left( \sum_{p \in P} \sum_{k \in D_p} d_{kps} \cdot v_{kp} - \left( \sum_{s' \in S} q_{s'} \cdot \sum_{p \in P} \sum_{k \in D_p} d_{kps'} \cdot v_{kp} \right) + 2\theta_s^1 \right)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min}C = & \sum_{s \in S} q_s \cdot \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} (1 - \text{DIN}_{is}) \cdot (c_{ip} \cdot w_{ips} + g_{ip} \cdot z_{ip}) + \sum_{(i,j) \in E} (1 - \text{DIA}_{ijs}) \cdot \left( f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{p \in P} b_{ijp} \cdot x_{ijps} \right) \quad \text{رابطه (23)} \\
 & + \gamma_2 \sum_{s \in S} q_s \cdot \left\{ \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} (1 - \text{DIN}_{is}) \cdot (c_{ip} \cdot w_{ips} + g_{ip} \cdot z_{ip}) + \sum_{(i,j) \in E} (1 - \text{DIA}_{ijs}) \cdot \left( f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{p \in P} b_{ijp} \cdot x_{ijps} \right) \right\} \\
 & - \sum_{s' \in S} q_{s'} \cdot \left\{ \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} (1 - \text{DIN}_{is'}) \cdot (c_{ip} \cdot w_{ips'} + g_{ip} \cdot z_{ip}) + \sum_{(i,j) \in E} (1 - \text{DIA}_{ijs'}) \cdot \left( f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{p \in P} b_{ijp} \cdot x_{ijps'} \right) \right\} + 2\theta_s^2 \} \\
 & + \omega \sum_{s \in S} \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} q_s \cdot \eta_{ips}
 \end{aligned}$$

s.t:

$$\sum_{j \in RS(i)} x_{ijps} + w_{ips} = \sum_{j \in FS(i)} x_{ijps} + d_{ips} + \eta_{ips} \quad \forall p \in P, i \in N, s \in S \quad \text{رابطه (24)}$$

$$w_{ips} \leq r_{ip}^- + (r_{ip}^+ - r_{ip}^-) \cdot z_{ip} \quad \forall p \in P, i \in N, s \in S \quad \text{رابطه (25)}$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijps} \leq u_{ij}^- + (u_{ij}^+ - u_{ij}^-) \cdot y_{ij} \quad \forall (i, j) \in E, s \in S \quad \text{رابطه (26)}$$

$$x'_{ijkp} \leq 1 - L_{\{u_{ij}^- = 0\}} (1 - y_{ij}) \quad \forall p \in P, k \in D_p, (i, j) \in E \quad \text{رابطه (27)}$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} \leq 1 - L_{\{r_{ip}^- = 0\}} (1 - z_{ip}) \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in S_p \quad \text{رابطه (28)}$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} \leq 1 \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in N \setminus (S_p \cup \{k\}) \quad \text{رابطه (29)}$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} - \sum_{j \in RS(i)} x'_{jikp} = 0 \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in N \setminus (S_p \cup \{k\}) \quad \text{رابطه (30)}$$

$$\sum_{i \in RS(j)} x'_{ijkp} = v_{kp} \quad \forall p \in P, k \in D_p \quad \text{رابطه (31)}$$

$$w_{ips} \leq (1 - \text{DIN}_{is}) \cdot M \quad \forall p \in P, i \in N, s \in S \quad \text{رابطه (32)}$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijps} \leq (1 - \text{DIA}_{ijs}) \cdot M \quad \forall (i, j) \in E, s \in S \quad \text{رابطه (33)}$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in D_p} d_{kps} \cdot v_{kp} - \left( \sum_{s' \in S} q_{s'} \cdot \sum_{p \in P} \sum_{k \in D_p} d_{kps'} \cdot v_{kp} \right) + \theta_s^1 \geq 0 \quad s \in S \quad \text{رابطه (34)}$$

$$\begin{aligned}
 & \left( \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} (1 - \text{DIN}_{is}) \cdot (c_{ip} \cdot w_{ips} + g_{ip} \cdot z_{ip}) + \sum_{(i,j) \in E} (1 - \text{DIA}_{ijs}) \cdot \left( f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{p \in P} b_{ijp} \cdot x_{ijps} \right) \right) \quad \text{رابطه (35)} \\
 & - \sum_{s' \in S} q_{s'} \cdot \left( \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} (1 - \text{DIN}_{is'}) \cdot (c_{ip} \cdot w_{ips'} + g_{ip} \cdot z_{ip}) + \sum_{(i,j) \in E} (1 - \text{DIA}_{ijs'}) \cdot \left( f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{p \in P} b_{ijp} \cdot x_{ijps'} \right) \right) \\
 & + \theta_s^2 \geq 0 \quad s \in S
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 x_{ijps} &\geq 0 && \forall p \in P, (i, j) \in E, s \in S \\
 w_{ips} &\geq 0 && \forall p \in P, i \in N, s \in S \\
 v_{kp} &\geq 0 && \forall p \in P, k \in D_p \\
 x'_{ijkp} &\in \{0, 1\} && \forall p \in P, k \in D_p, (i, j) \in E \\
 y_{ij} &\in \{0, 1\} && \forall (i, j) \in E \\
 z_{ip} &\in \{0, 1\} && \forall p \in P, i \in N \\
 \theta_s^1, \theta_s^2 &\geq 0 && s \in S \\
 \eta_{ips} &\geq 0 && \forall p \in P, i \in N, s \in S
 \end{aligned}$$

(رابطه ۳۶)

### نتایج محاسباتی در مطالعه کاربردی

برای مدل ریاضی دو هدفه پیشنهادی از نرم‌افزار لینگو جهت حل مدل مسئله تحقیق استفاده شده است. مسئله پژوهش از ادبیات تحقیق توسعه یافته است که با استفاده از داده‌های واقعی مرتبط با صنایع غذایی حل شده است. در این زنجیره تأمین، ۱۰ تولید کننده و ۳۰۰ توزیع کننده مشارکت دارند و دو نوع محصول تولید می‌شود. تعداد سه سناریو در نظر گرفته شده است که احتمال وقوع سناریو اول ۰/۳، سناریو دوم ۰/۲ و سناریو سوم ۰/۵ است. سناریوها نشان‌دهنده وضعیت‌های مختلف از تقاضای مشتریان و ظرفیت تسهیلات با توجه به میزان اختلال‌ها است و بر اساس داده‌های موجود و نظر خبرگان مربوطه در نظر گرفته شده‌اند. سناریوهای مربوط به تقاضای محصولات و میزان اختلال بر مبنای توزیع نرمال با استفاده از داده‌های تاریخی موجود و نظر خبرگان تولید شده‌اند. تابع هدف اول بیانگر حداکثرسازی تاب‌آوری با وزن ۰/۵ بیان شده است و تابع هدف دوم بیانگر کاهش هزینه‌ها با وزن ۰/۵ است. وزن استواری جواب در تابع هدف اول و دوم برابر ۰/۸، میزان انحراف از محدودیت یا غیر موجه بودن از محصول P و گره i برابر ۰/۲ است. در جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب میزان تقاضای محصولات در دوره‌های مختلف و میزان هزینه‌های ایجاد شده در گره‌های شبکه تحت سناریوهای متفاوت، نشان داده شده است.

جدول ۲. میزان تقاضای محصول (اعداد به هزار واحد)

محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱
۸	۱۵	۲۱	۸	۱۰	۱۱	۱۰	۸
۹	۱۰	۲۲	۵	۱۳	۱۲	۶	۱۰
۹	۷	۲۳	۶	۱۱	۱۳	۱۵	۱۵
۸	۱۵	۲۴	۸	۷	۱۴	۱۳	۱۴
۶	۹	۲۵	۱۱	۱۱	۱۵	۱۴	۱۰
۷	۱۳	۲۶	۶	۸	۱۶	۶	۶
۱۵	۱۴	۲۷	۸	۵	۱۷	۱۴	۱۱
۱۰	۱۳	۲۸	۸	۱۵	۱۸	۵	۷
۱۵	۷	۲۹	۹	۷	۱۹	۱۴	۱۳
			۱۲	۷	۲۰	۱۱	۱۲

جدول ۳. خلاصه آماری میزان هزینه‌های مسئله در سناریوهای مختلف در گروه‌های متناظر

سناریو ۳	اختلال در گروه (عدد = ۱ اختلال، عدد = ۰ عدم اختلال)		هزینه وارده به جریان ظرفیت بالای تولید هر گروه (۱۰۰۰۰۰۰۰ تومان)		ظرفیت پایین تولید هر گروه (اعداد به هزار واحد)		ظرفیت بالای تولید هر گروه (اعداد به هزار واحد)		هزینه‌های روی گروه (۱۰۰۰۰۰۰۰ تومان)		گروه
	سناریو ۲	سناریو ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲		
	سناریو ۱	سناریو ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۱	محصول ۲	
۱	۱	۰	۲۹۹	۳۷۵	۶۳	۶۱	۹۰	۹۱	۲۰	۱۹	۱
۱	۱	۱	۳۹۳	۲۵۴	۷۲	۶۶	۸۶	۱۰۰	۱۵	۱۶	۲
۱	۰	۰	۲۴۱	۲۲۴	۶۵	۷۶	۹۷	۹۵	۱۸	۱۶	۳
۰	۰	۱	۲۰۰	۲۸۴	۰	۰	۰	۰	۱۸	۱۹	۴
۱	۰	۱	۲۵۴	۲۵۵	۰	۰	۰	۰	۱۹	۱۰	۵
۰	۱	۰	۲۲۰	۲۹۶	۰	۰	۰	۰	۱۱	۱۹	۶
۰	۰	۱	۲۲۲	۲۹۰	۰	۰	۰	۰	۱۵	۱۴	۷
۱	۱	۰	۳۳۲	۳۲۶	۰	۰	۰	۰	۱۶	۱۰	۸
۱	۰	۰	۲۰۹	۲۵۵	۰	۰	۰	۰	۲۰	۱۸	۹
۰	۱	۰	۳۷۵	۳۲۵	۶۳	۶۶	۸۸	۹۸	۱۹	۱۱	۱۰

نتایج مدل LP متریک نشان می‌دهد هر اختلالی در زنجیره تأمین محصولات رخ دهد، طبق سناریوهای شرکت به میزان ۹۹/۴۸۴ واحد از تقاضاها را برآورده و مقدار ۷۹۰/۵۰ واحد از هزینه‌ها کاهش پیدا می‌کند. مقادیر محصولات تولیدی هم تغییر می‌یابد. در گره اول، مقدار محصولات اول و دوم در سناریوهای اول و دوم، بدون تغییر می‌ماند؛ اما در سناریو سوم به میزان ۱/۴ و ۲/۵ واحد تغییر می‌کند. در گره سوم مقادیر محصول اول در سناریو اول بدون تغییر می‌ماند؛ اما در سناریو دوم، به میزان ۱۰/۶۰ و در سناریو سوم، به میزان ۶/۸ تغییر می‌کند. محصول دوم در سناریوهای اول و سوم بدون تغییر می‌ماند و در سناریو دوم به میزان ۷/۷ واحد تغییر می‌کند. در گره دهم، میزان محصولات اول و دوم در سناریو دوم بدون تغییر می‌ماند؛ اما میزان محصول اول در سناریو اول، مقدار ۸/۲ و در سناریو سوم، به میزان ۳/۲ تغییر می‌کند؛ میزان محصول دوم در سناریو اول ۱۰/۳ و در سناریو سوم ۸/۲ تغییر می‌کند؛ اما در گره هفتم و مابقی گره‌ها مقادیر محصولات بدون تغییر باقی می‌مانند. برای همه محصولات در گره‌های متفاوت، به‌جز ۴، ۶، ۷ و ۹ و محصول اول در گره ۸ اختلال وجود دارد که باید به رفع آن پرداخت. در نهایت، میزان  $\theta$  در سناریوهای مختلف بیان شده است. در جدول ۴ مقادیر تابع هدف ارائه شده است. همچنین تغییرات مقادیر محصولات تحت سناریوهای متفاوت و مقادیر ایجاد اختلال در گره‌های متفاوت در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. در نهایت، در جدول ۷ مقادیر  $\theta_1$  و  $\theta_2$  در سناریوهای متفاوت مشاهده می‌شود.

جدول ۴. مقادیر تابع هدف

تابع هدف اول	تابع هدف دوم
۹۹/۴۸۴	۷۹۰/۵۰

جدول ۵. تغییرات مقادیر محصولات تولیدی در سه سناریو

گره	محصول	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
اول	اول	۰	۰	۱/۴
اول	دوم	۰	۰	۲/۵۰
سوم	اول	۰	۱۰/۶۰	۶/۸
سوم	دوم	۰	۷/۷	۰
دهم	اول	۸/۲	۰	۳/۹
دهم	دوم	۱۰/۱۳	۰	۸/۲
هفتم	اول	۰	۰	۰

جدول ۶. اختلال در گره‌های دو محصول

گره	محصول ۱	محصول ۲	گره	محصول ۱	محصول ۲
۱	۱	۱	۶	۰	۰
۲	۱	۱	۷	۰	۰
۳	۱	۱	۸	۰	۱
۴	۰	۰	۹	۰	۰
۵	۱	۱	۱۰	۱	۱

جدول ۷. میزان ۵۱ و ۵۲ در سناریوهای متفاوت

سناریو ۱	۱۴/۳	۲۹۵/۰۴
سناریو ۲	۴/۳۰	۰
سناریو ۳	۰	۰

در این بخش نتایج محاسبات حاصل از تحلیل داده‌های کمی مسئله ارائه و میزان مطلوبیت توابع هدف در سناریوهای متفاوت حاصل شد. از سوی دیگر، بهینه‌سازی توابع در شرایط متضاد بودن نیز بررسی و وضعیت‌های متفاوت از تقاضای مشتریان و ظرفیت تسهیلات در سناریوهای مختلف ارائه شد.

### بینش‌های مدیریتی

در این تحقیق به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال در سطوح تولید کنندگان، توزیع کنندگان و مشتریان با ملاحظات چندمحصولی بودن در یک شرکت تولید کننده فعال در زمینه صنایع غذایی پرداخته شد. مدل تحقیق، دو هدف اساسی را ارضا نمود، بهینه‌سازی تاب‌آوری زنجیره تأمین و کمینه‌سازی هزینه‌ها بهینه شد؛ به گونه‌ای که هزینه‌های تولید با سطح ظرفیت پایین، هزینه‌های تولید با سطح ظرفیت بالا و همچنین هزینه‌های مسیر و هزینه‌های مازاد ایجاد شده به وسیله جریان‌های روی یال‌ها و گره‌ها کاهش یافت. مدل ارائه شده در این پژوهش به لحاظ خلأ تحقیقاتی، کامل کننده مطالعات مشابهی است که در فرایند طراحی شبکه زنجیره تأمین، اختلال را در سطوح تولید، توزیع و مشتری لحاظ کرده بودند (برای مثال، مطالعات ژانگ، تیان، فتح‌اللهی فرد و لی ۲۰۲۰؛ سیبویه، آذر و زندیه، ۱۴۰۰) و به لحاظ استفاده از بهینه‌سازی استوار و روش حل مسئله، کامل کننده تحقیق موندال و کومار روی (۲۰۲۱) بود.

تحقیق پیش رو در بحث تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین با ملاحظات حلقه بسته بودن در شرایط تولید چند نوع محصول، کامل کننده تحقیق امین طهماسبی، راهب و جعفریه (۱۳۹۷) و منطبق بر تحقیق ولی سیار، روغنیان و جبارزاده<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) است. علاوه بر این، عدم قطعیت در بیشتر مسائل فقط تقاضا را شامل می‌شد؛ ولی در این مدل، عدم قطعیت در بیشتر پارامترها بررسی شده است. تحقیقات گذشته هر کدام با دیدگاه خاصی به تاب‌آوری نگریسته‌اند، رویکردهای زیست‌محیطی، اقتصادی و سازمانی از جمله آن‌ها بوده است. بنابراین بررسی تحقیقات آتی با ملاحظات مباحث نظری نوین مانند پایداری می‌تواند موضوعی قابل توجه برای مدیران در طراحی شبکه زنجیره تأمین باشد. همچنین با توجه به رویکردهای مبتنی بر تصمیم‌گیری‌های کلان در طراحی شبکه زنجیره تأمین، می‌توان بحث اختلال را در تمامی سطوح زنجیره تأمین بررسی نمود.

با توجه به مؤلفه‌های پیش رو، اختلال در دنیای کنونی، زنجیره‌های تأمین بیش از پیش نیاز به طراحی به شکل استوار و تاب‌آور بودن دارند، بنابراین اهمیت صنایع غذایی به عنوان تولید کننده محصولات حیات بخش در حوزه نیازهای

بشری از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. همچنین در نظر گرفتن سایر ابعاد تاب‌آوری برای بررسی اثر آن‌ها بر زنجیره تأمین و ترکیب تاب‌آوری و پایداری و در نظر گرفتن مؤلفه‌های مرتبط در مدل ریاضی مفید و اثربخش است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به فرار گرفتن زنجیره تأمین در معرض ریسک‌های متفاوت که بخشی به دلیل عوامل طبیعی و بخشی هم جزء ریسک‌های عملیاتی است و با توجه به اثرهای مخرب این اختلال‌ها، مطالعات روی تاب‌آوری زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر، از منظر تأثیر زیست‌محیطی توسعه یافته است. رویکردهای متفاوتی جهت تاب‌آوری زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد شده است؛ اما این پژوهش به توسعه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال در سطوح تولید کنندگان، توزیع کنندگان و مشتریان، جهت افزایش تاب‌آوری با رویکرد سناریو محور بودن روش مالوی پرداخته است که به صورت یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه، جهت افزایش برآورده‌سازی تقاضاها و کاهش هزینه‌ها ارائه شده است. در این پژوهش از اطلاعات و داده‌های حقیقی مطالعه موردی (یک شرکت صنایع غذایی فعال در استان تهران) استفاده شد و مدل ریاضی در عمل، قابلیت پیاده‌سازی پیدا کرد. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که مدل طراحی شده با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی و اختلال، به طور میانگین ۹۹/۴۸ واحد از تقاضاها را برآورده کرده و به طور میانگین، ۷۹۰/۵۰ واحد از هزینه‌ها را کاهش داده است. در این پژوهش جهت مواجهه با عدم قطعیت، از روش بهینه‌سازی استوار استفاده شد که نسبت به دیگر روش‌های مشابه، مانند منطق فازی که بیشتر بر قضاوت خبرگان مبتنی است، نتایج مطلوب‌تری دارد. در تحقیقات آتی می‌توان از دیگر رویکردهای سناریو محور مبتنی بر روش مالوی، مانند روش رویکرد استوار (آغزاف، سیتومپال و نجید<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰) استفاده کرد که از مقدار بهینه حل قطعی مدل تحت سناریو معین، جهت کمینه‌سازی هزینه‌ها استفاده می‌کند.

یکی از چالش‌های موجود در طراحی زنجیره تأمین اقلام فسادپذیر (به ویژه اقلام فاسد شدنی حیاتی، مانند فرآورده‌های خونی) بحث عدم مواجهه با کمبود است، بنابراین در مطالعات بعدی می‌توان از ظرفیت دیگر منابع و مراکز جهت تأمین تقاضای مشتریان در قالب بهره‌مندی از سیاست انتقال جانبی استفاده کرد.

در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین مانند مطالعه پیش رو، عموماً اهداف متناقض تحقیق به شکل هم‌زمان بهینه می‌شوند، بنابراین در بُعد کمینه‌سازی هزینه‌ها، در مطالعات آتی می‌توان هزینه‌هایی مثل کاهش اعتبار برند جهت بازگشت محصول و نارضایتی مشتری را جهت ارائه مدلی با مفروضات یاد شده ارائه کرد. در بحث ملاحظات انواع ریسک در مدل تحقیق، ارائه مدلی با لحاظ کردن ریسک‌های مالی شرکت، می‌تواند خلأ تحقیقاتی مطالعه کنونی را مرتفع سازد. در نهایت مدل‌سازی زنجیره تأمین تحت مفروضات لحاظ شده در این تحقیق با دیگر مفاهیم نوین در طراحی شبکه زنجیره تأمین، از جمله ملاحظات انعطاف‌پذیری<sup>۲</sup> و مفاهیم زنجیره تأمین سبز<sup>۳</sup> و توسعه پایدار<sup>۴</sup>، مدل‌سازی مسئله را در سطوح بیشتر، به مفاهیم دنیای امروزی نزدیک‌تر می‌سازد.

1. Aghezzaf, Sitompul & Najid
2. Flexibility
3. Green Supply Chain
4. Sustainable Development

## منابع

- آقای، عبدالله؛ حاجیان حیدری، مستوره (۱۳۹۸). بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی زنجیره تأمین تصادفی با در نظر گرفتن اختلال تأمین کننده: مدل‌سازی مبتنی بر عامل و یادگیری تقویتی. *مجله بین‌المللی علم و فناوری، سایتیایرانیکا*، ۲۶(۶)، ۳۷۸۰-۳۷۹۵.
- امین طهماسبی، حمزه؛ راهب، مائده؛ سحر، جعفریه (۱۳۹۷). ارائه و حل یک مدل بهینه‌سازی سبز در زنجیره تأمین حلقه بسته با هدف افزایش سود و کاهش مشکلات زیست محیطی با در نظر گرفتن دوره ضمانت شده محصول. *تحقیق در عملیات در کاربردهای آن*، ۱۵(۳)، ۲۷-۴۴.
- زارع مهرجردی، یحیی و شفیعی، محمد (۱۳۹۹). منبع‌یابی چندگانه در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار: مطالعه موردی صنعت تابر. *مجله بین‌المللی مدیریت تأمین و عملیات*، ۷(۳)، ۲۰۲-۲۲۱.
- سیبویه، علی؛ آذر، عادل و زندیه، مصطفی (۱۴۰۰). ارائه مدل دو مرحله‌ای احتمالی استوار برای طراحی زنجیره تأمین خون تاب‌آور با در نظر گرفتن اختلال زلزله و بیماری واگیردار. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۴)، ۶۶۴-۷۰۳.
- صفار، محمدمهدی؛ شکوری گنجوی، حامد و رزمی، جعفر (۱۳۹۳). طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی در شرایط عدم قطعیت و حل آن با الگوریتم NSGA-2. *نشریه تخصصی مهندسی صنایع*، ۴۹(۱)، ۵۵-۶۸.
- فتحی، محمد رضا؛ نصراللهی، مهدی و زمانیان، علی (۱۳۹۸). مدل‌سازی ریاضی شبکه زنجیره تأمین پایدار در وضعیت عدم قطعیت و حل آن با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری. *مدیریت صنعتی*، ۱۱(۴)، ۶۲۱-۶۵۲.
- قربانپور، احمد؛ جمالی، غلامرضا و موسوی، مهسا (۱۴۰۰). ارائه مدل بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین سبز تاب‌آور در صنایع سیمان. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۲)، ۲۲۲-۲۴۵.
- محمدی، امیر سالار؛ عالم تبریز، اکبر و پیشوایی، میرسامان (۱۳۹۷). طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته همراه با تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت. *فصلنامه مدیریت صنعتی*، ۱۰(۱)، ۶۱-۸۴.
- مومنی، منصور و زرشکی، نیما (۱۳۹۹). مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته با بکارگیری از سناریوها در مواجهه با عدم قطعیت در کمیت و کیفیت برگشتی‌ها. *مدیریت صنعتی*، ۱۳(۱)، ۱۰۵-۱۳۰.

## References

- Accorsi, R. & Baruffaldi, G. & Manzini, R. (2020). A closed-loop packaging network design model to foster infinitely reusable and recyclable containers in food industry. *Sustainable Production Consump*, 24: 48 – 61.
- Aghaie, A. & Hajian-Heidary, M. (2019). Simulation-based optimization of a stochastic supply chain considering supplier disruption: Agent-based modeling and reinforcement learning. *International Journal of Science & Technology, Scientia Iranica*, 26 (6), 3780 – 3795. (in Persian)

- Aghezzaf, E. H. & Sitompul, C. & Najid, N.M. (2010). Models for robust tactical planning in multi-stage production systems with uncertain demands. *Computers & Operations Research*, 37 (5): 880 - 889.
- Alem Tabriz, A. & Pishvaei, M.S. & Mohammadi, A.S. (2018). Designing Green Closed-loop Supply Chain Network with Financial Decisions under Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 10 (1), 61 - 84. (in Persian)
- Amin-Tahmasbi, H. & Raheb, M. & Jafariyeh, S. (2018). A Green Optimization Model in the Closed-Loop Supply Chain with the Aim of Increasing Profit and Reducing Environmental Problems, with Regard to Product Guaranty Period. *Journal of Operations Research and Its Applications*, 58 (3), 27 - 44. (in Persian)
- Baghersad, M. & Zobel, C.W. (2021). Assessing the extended impacts of supply chain disruptions on firms: An empirical study. *International Journal of Production Economics*, 231, Art. No. 107862.
- de Oliveira, U.R. & Marins, F.A.S. & Rocha, H. M. & Salomon, V.A.P. (2017). The ISO 31000 standard in supply chain risk management. *J. Cleaner Prod*, 151: 616 – 633.
- Dixit, V. & Verma, P. & Tiwari, M.K. (2020). Assessment of pre and post-disaster supply chain resilience based on network structural parameters with CVaR as a risk measure. *International Journal of Production Economics*, 227, Doi: 10.1016/j.ijpe. 107655.
- Dolgui, A. & Ivanov, D. (2020). Ripple effect and supply chain disruption management: new trends and research directions. *Int. J. Prod. Res*, 59 (1): 102 – 109.
- Fathollahi-Fard, A.M. & Hajiaghaei-Keshteli, M. & Tian, G, & Li, Z. (2020). An adaptive Lagrangian relaxation-based algorithm for a coordinated water supply and wastewater collection network design problem. *Information Science*, 512: 1335 – 1359.
- Ghorbanpour, A. & Jamali, Gh.R. & Mousavi, M. (2021). A Green-resilient Supply Chain Network Optimization Model in Cement Industries. *Industrial Management Journal*, 13 (2), 222 - 245. (in Persian)
- Hassanzadeh, A.S. & Zhang, G. A. (2013). Multiobjective Facility Location Model for Closed-loop Supply Chain Network under Uncertain Demand and Return. *Applied Mathematical Modelling*, 37 (6): 4165 – 4176.
- Ivanov, D. & Sethi, S. & Dolgui, A. & Sokolov, B. (2018). A survey on control theory applications to operational systems, supply chain management, and industry 4.0. *Annu. Rev. Control*, 46: 134 – 147.
- Mondal, A. & Kumar Roy, S. (2021). Multi-objective sustainable opened- and closed-loop supply chain under mixed uncertainty during COVID-19 pandemic situation. *Computers & Industrial Engineering*, 159: 107 453.
- Mulvey, J.M. & Ruszczyński, A. (1995). A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization. *Operations research*, 43 (3), 477 - 490.
- Nayeri, S. & Paydar, M.M. & Asadi-Gangraj, E. & Emami, S. (2020). Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106716.

- Pavlov, D. & Ivanov, A. & Dolgui, B. & Sokolov, B. (2018). Hybrid fuzzy probabilistic approach to supply chain resilience. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 65 (2): 303 – 315.
- Piraveenan, M. & Jing, H. & Matous, P. & Todo, Y. (2020). Topology of international supply chain networks: A case study using factset reverse datasets. *IEEE Access*, 8: 154540 – 154559.
- Ramezani, M. & Bashiri, M. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). A Robust Design for a Closedloop Supply Chain Network under an Uncertain Environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66 (5-8), 825 - 843.
- Sabouhi, F. & Pishvae, M.S. & Jabalameli, M.S. (2018). Resilient supply chain design under operational and disruption risks considering quantity discount: A case study of pharmaceutical supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 657 – 672.
- Safar, M.M. & Shakuri-Ganjavi, H. & Razmi, J. (2014). Designing a green closed loop supply chain by considering operational risks under uncertainty and solving with NSGA II algorithm. *Industrial Engineering Specialized Journal*, 49 (1): 55 – 68. (in Persian)
- Saglam, Y.C. & Çankaya, S.Y. & Sezen, B. (2020). Proactive risk mitigation strategies and supply chain risk management performance: An empirical analysis for manufacturing firms in Turkey. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32 (6), 1224 - 1244.
- Shabbir, M.S., Mahmood, A., Setiawan, R., Nasirin, C., Rusdiyanto, R., Gazali, G., Arshad, M.A., Khan, S. & Batool, F. (2021). Closed-loop supply chain network design with sustainability and resiliency criteria. *Environmental Science and Pollution Research*, Doi: 10.1007/s11356-021-12980-0.
- Sibevei, A. & Azar, A. & Zandieh, M. (2021). 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. & Farhang-Moghaddam, B. & 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.
- Temoçin, B.Z. & Weber, G.W. (2014). Optimal control of stochastic hybrid system with jumps: a numerical approximation. *J. Comput. Appl. Math*, 259: 443 - 451.
- Tian, Y. & Shi, Y. & Shi, X. & Li, M. & Zhang, M. (2021). Research on Supply Chain Network Resilience Considering the Exit and Reselection of Enterprises. *IEEE ACCESS, Digital Object Identifier*, DOI:10.1109/ACCESS.2021.3090332.
- Tirkolae, E.B. & Goli, A. & Weber, G.W. (2019). Multi-objective Aggregate Production Planning Model Considering Overtime and Outsourcing Options under Fuzzy Seasonal Demand. *Advances in Manufacturing II. Springer, Cham*, 81 -96.
- Tirkolae, E.B. & Mahdavi, I. & Esfahani, M.M.S. & Weber, G.W. (2020). A robust green-allocation-inventory problem to design an urban waste management system under uncertainty. *Waste Manag*, 102: 340 - 350.



- Toorajipour, R. & Sohrabpour, V. & Nazarpour, A. & d Oghazi, P. & Fischl, M. (2021). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review. *Journal of Business Research*, 122: 502 – 517.
- Vali-Siar, M.M. & Roghanian, E. & Jabbarzadeh, A. (2022). Resilient mixed open and closed-loop supply chain network design under operational and disruption risks considering competition: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 172: Part A, October 2022, 108513.
- Wacker, J.G. (1998). A definition of theory: research guidelines for different theory-building research methods in operations management. *Journal of Operations Management*, 16: 361 – 385.
- Zahedi, A. & Salehi-Amiri, A. & Hajiaghaei-Keshteli, M. & Diabat, A. (2021). Designing a closed-loop supply chain network considering multi-task sales agencies and multi-mode transportation. *Soft Computing*, Doi: 10.1007/s00500-021-05607-6.
- Zamanian, A. & Nasrollahi, M. & Fathi, M. R. (2019). Mathematical Modeling of Sustainable Supply Chain Networks under Uncertainty and Solving It Using Metaheuristic Algorithms. *Industrial Management Journal*, 11 (4), 621 – 652. (in Persian)
- Zare-Mehrjerdi, Y. & Shafiee, M. (2020). Multiple-Sourcing in Sustainable Closed-loop Supply Chain Network Design: Tire Industry Case Study. *International Journal of Supply and Operations Management*, 7 (3), 202 – 221. (in Persian)
- Zare-Mehrjerdi, Y. & Shafiee, M. (2021). A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125 - 141.
- Zereshki, N. & Momeni, M. (2020). 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)
- Zhang, C. & Tian, G. & Fathollahi-Fard, A.M. & Li, Z. (2020). Interval-valued intuitionistic uncertain linguistic cloud Petri net and its application in risk assessment for subway fire accident. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, Doi: 10.1109/TASE.3014907.