



Modeling the Resilient Supply Chain Location-Allocation Problem under Demand Uncertainty

Malihe Ebrahimi* 

Correspondence: Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Kosar University of Bojnord, Bojnord, Iran. Email Address: maliheebrahimi@kub.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 28 July 2025

Received in revised form: 23 December 2025

Accepted: 30 May 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Resilience

Supply Chain

Location-Allocation

Fuzzy Programming

ABSTRACT

Today, resilience and sustainability are important issues in supply chain network design. Supply chain sustainability leads to competitive advantages and better efficiency of organizations. On the other hand, disruptions in the supply chain lead to high costs that are not recoverable in some situations. Designing a resilient supply chain is a good idea to protect against these disruptions. In this paper, a resilient supply chain location-allocation problem is modeled as a two-objective problem. The first objective is to minimize the cost and maximize the quality of products and consumed raw materials. The proposed supply chain includes suppliers, manufacturers, distributors, retailers, and customers. Disruptions in suppliers, manufacturers, and distributors are considered and mitigation strategies are included to manage disruptions for them. Improving and repairing strategy, consolidating strategy, and directly connecting centers strategy are disruption reduction strategies in this new model. In this model, the best suppliers are selected based on the quality of raw materials, resilience, and cost. Demand is considered as a trapezoidal fuzzy number. Finally, sensitivity analysis is performed on some parameters.

Cite this article: M. Ebrahimi, "Modeling the Resilient Supply Chain Location-Allocation Problem under Demand Uncertainty, vol. 28, no. 1, pp. 51-66, 2026. DOI: <https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1651>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

Introduction

Today, resilience and sustainability are important issues in supply chain network design. Supply chain sustainability leads to competitive advantages and better efficiency of organizations. On the other hand, disruptions in the supply chain lead to high costs that are not recoverable in some situations. Designing a resilient supply chain is a good idea to protect against these disruptions.

In this paper, locating manufacturers, distributors, and retailers, and selecting suppliers in the supply chain are considered simultaneously, that issues such as capacity constraints, the possibility of suppliers disruption, manufacturers disruption, and distributors disruption, also the resilience have been addressed.

It is very important that the new proposed location allocation model suggests the best supplier based on the quality of raw materials, their resilience and costs. So the best of our knowledge is to consider supplier selection, location of manufacturers, distributors, retailers, and allocation of supply chain centers and resilience simultaneously that demand is considered uncertain.

Research innovations includes:

- selection of resilient suppliers based on their raw material quality.
- Simultaneous modeling of multiple disruption reduction strategies in a multi-level network
- Considering supplier selection in the resilient location-allocation model
- Considering demand uncertainty with a fuzzy programming in a two-objective model

The proposed model

A two-objective reliable location-allocation supply chain is formulated, which is multi-product, five-level. The network consists of suppliers, manufacturers, distributors, retailers, and customers. The first objective function minimizes the total cost, the second objective function maximizes the quality of raw materials and products. In this way, the quality parameter of each raw material in each supplier and the quality parameter of each product in each factory are considered, which are multiplied by the amount of raw material from that supplier and the amount of product produced by that factory, respectively, which ultimately yields the quality level. Demand in the presented model is considered as a trapezoidal fuzzy number. A new nonlinear location-allocation model with resilience under possible disruption conditions is proposed. Every supplier and manufacturer has a penalty cost, recovery cost, and recovery time to be fully usable after a disruption. Disrupted suppliers or manufacturers must pay a penalty fee during their recovery time to be served immediately. It is noticeable that manufacturers who use reinforcement when building a factory will not be disrupted. For distributors who experience

disruption, products are shipped directly from the manufacturer to retailers, which incurs a higher cost.

Results and Discussion

The proposed new model is evaluated using a numerical example. GAMS software is used to solve the model. The new proposed model was converted to single-objective and solved using two methods: weighted sum and LP-metric, the results are shown in table (1).

Objective function	The L-P metric method	weighted sum method
	P=1	W1=0.6, W2=0.4
First Objective	241185400	241185400
second Objective	7618601.565	7618601.565
Integrated objective	0.997	1.092

Table (2) shows the two cases of occurrence of a disruption in the distributor and no disruption in the distributor, according to the possible disruption values of the supplier and producer.

Objective function	Possibility of disruption in supplier and manufacturers $P(s) = \text{uniform}(0.2, 0.3)$, $p(m) = \text{uniform}(0.1, 0.25)$	
	Disruption in the distributor $P(d) = 1$	No disruption in the distributor $P(d) = 0$
cost	932389100	241178300
quality	7618601.565	7618601.565

Further investigation of the model, sensitivity analysis on demand parameters, transportation cost and distance parameter from the manufacturer to the retailer has been performed. According to the values obtained in Table (3), for two objective functions, as demand increases, the value of the first objective function (cost) increases, which is very logical.

Percentage of parameter changes	Objective functions	
	cost	quality
-0.2	192861900	6094881.252
-0.1	217075600	6856742.408
0	241077400	7618601.565
+0.1	265185200	8380461.721
+0.2	289292900	9142321.878

Conclusion

Many supply chains today face unexpected issues and disruptions throughout the chain. Therefore, identifying and predicting disruptions and considering resilience strategies can greatly help to have better chain efficiency and performance.

In this paper, a bi-objective uncertain resilient supply chain is modeled. The supply chain includes suppliers, manufacturers, distributors, retailers, and customers. The problem addresses decisions related to location, allocation, and resilience simultaneously. These decisions must be coordinated that making them simultaneously will greatly assist managers in making better decisions. Because there may be some restrictions in one part that are not taken into account in other parts.

Disruptions in suppliers, manufacturers, and distributors are considered. For suppliers, the repair resilience strategy is used, taking into account the recovery time and recovery cost. For manufacturers, the repair resilience strategy is used, taking into account the recovery time and recovery cost and reinforcement. For distributors, direct contact between the manufacturer and the retailer was also used as a resilience strategy. In the proposed model, the best supplier is selected based on the resilience, cost and quality of raw materials. Sensitivity analysis on transportation cost and demand parameters showed that the first objective function was more sensitive to these parameters.

For further studies, robust optimization can be used to address model uncertainty, also used other reduction strategies for the model. Solving the model in large dimensions using Benders methods and Lagrange algorithm or meta-heuristic methods are other ideas that can be used in future research.

مدلسازی مساله مکان یابی - تخصیص زنجیره تامین تاب آور در شرایط عدم قطعیت تقاضا

ملیحه ابراهیمی^{۱*}

^۱استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: maliheebrahimi@kub.ac.ir

چکیده

امروزه تاب آوری و پایداری موضوع مهمی در طراحی شبکه زنجیره تامین است. پایداری زنجیره تامین منجر به مزیت های رقابتی و کارایی بهتر سازمان ها می شود. از طرفی اختلالات در زنجیره تامین منجر به هزینه های بالایی می شود که در بعضی شرایط جبران پذیر نیست. طراحی یک زنجیره تامین تاب آور راهی برای محافظت در برابر این اختلالات است. در این مقاله مساله مکان یابی-تخصیص زنجیره تامین تاب آور به صورت دو هدفه مدل سازی شده است. هدف اول مربوط به کمینه سازی هزینه و بیشینه کردن کیفیت محصولات و مواد خام مصرفی است. زنجیره تامین مورد نظر شامل تامین کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع کنندگان، خرده فروشان و مشتریان است. به طوری که اختلال در تامین کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع کنندگان در نظر گرفته شده و راهبردهای کاهش برای مدیریت اختلال برای آنها لحاظ شده است. راهبردهای بهبود و تعمیر، مستحکم سازی و ارتباط مستقیم بین مراکز، راهبردهای کاهش اختلال در این مدل است. در این مدل، بهترین تامین کننده بر اساس کیفیت مواد اولیه، توانایی تاب آوری و هزینه، انتخاب شده اند. تقاضا به صورت عدد فازی دوزنقه ای لحاظ شده است. در نهایت نیز تحلیل حساسیت روی برخی مولفه ها انجام شده است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

کلیدواژه ها:

تاب آوری

زنجیره تامین

مکان یابی

برنامه ریزی فازی

استناد: ابراهیمی، ملیحه، "مدلسازی مساله مکان یابی-تخصیص زنجیره تامین تاب آور در شرایط عدم قطعیت تقاضا، دوره ۲۸، شماره ۱،

DOI: <https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1651>

صفحات ۵۱-۶۶، ۱۴۰۵

© نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین (ع).



۱- مقدمه

تاب‌آوری به طور همزمان است به طوری که تقاضا به صورت غیرقطعی لحاظ شده است.

نوآوری‌های پژوهش عبارتند از:

۱. ادغام کیفیت مواد اولیه در انتخاب تأمین‌کنندگان تاب‌آور
۲. مدل‌سازی هم‌زمان چند راهبرد کاهش اختلال در شبکه چندسطحی
۳. در نظر گرفتن انتخاب تأمین‌کننده در مدل مکان‌یابی-تخصیص تاب‌آور
۴. لحاظ عدم قطعیت تقاضا با رویکرد فازی در یک مدل دوهدفه

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه تاب‌آوری زنجیره تأمین انجام شده است. برخی مطالعات به صورت نظری به این موضوع پرداخته‌اند، برخی دیگر نیز مدل‌های ریاضی در ارتباط با موضوع پیشنهاد داده‌اند. از جمله، یوسفی بابادی و همکاران [۱]، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ($CLSC^2$) با در نظر گرفتن تاب‌آوری و پایداری ارائه نموده‌اند. آنها از تأمین‌کننده پشتیبان بعنوان راهبرد پایداری استفاده کرده و سپس با روش پی-استوار حل نموده‌اند. افزایش عملکرد محیطی، افزایش عملکرد اجتماعی و کاهش هزینه توابع هدف مربوط به بحث پایداری این مدل می‌باشد. البته عملکرد محیطی و عملکرد اجتماعی فقط بعنوان ویژگی تأمین‌کنندگان اصلی در دو تابع هدف لحاظ شده است. افشار و همکاران [۴]، مدل زنجیره تأمین حلقه بسته پایداری را مطرح کردند که سه تابع پایداری کاهش تأثیرات محیطی، کاهش هزینه و تأثیرات اجتماعی در آن لحاظ شده است. تقاضا به صورت عدد فازی لحاظ شده و مدل در سناریوهای مختلف بررسی شده‌اند. در این مدل در صورت وقوع اختلال به صورت مولفه‌های صفر و یک برای تولیدکنندگان و تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شده است که در صورت وقوع اختلال گروه تعمیر اختلال به آنجا اعزام می‌شوند و هزینه برای زنجیره ایجاد می‌کنند. در مطالعه‌ای دیگر نیز یک زنجیره تأمین حلقه بسته در حوزه تولید لاستیک ارائه شده است که مفاهیم پایداری (هزینه، مصرف انرژی، آلودگی و فرصت‌های شغلی) و تاب‌آوری (راهبرد منابع چندگانه) را در آن در نظر گرفته‌اند. از آنجایی که تولید لاستیک نیاز به هشت ماده خام دارد، راهبرد منابع چندگانه می‌تواند در زمان اختلالات تأمین‌کننده موثر باشد [۵]. زمانیان و

طراحی شبکه زنجیره تأمین ($SCND^1$) موضوعی قابل توجه در سازمان‌ها است که هزینه، کیفیت، انعطاف‌پذیری، پایداری، چابکی موضوعاتی هستند که بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. امروزه تاب‌آوری و پایداری اولویت اصلی در طراحی شبکه زنجیره تأمین است [۱]. تاب‌آوری به معنی توانایی بهبود سریع و موثر یک اختلال است که یک مفهوم کلیدی و چند وجهی در مدیریت ریسک زنجیره تأمین می‌باشد. تاب‌آوری، توانایی انطباق تصمیمات و بازیابی عملکرد در شرایط اختلالات را با استفاده از اقدامات بهبود فراهم می‌کند [۲]. تاب‌آوری یک شبکه زنجیره تأمین در برابر اختلالات به توانایی آن در حفظ عملیات و اتصالات سامانه مربوط می‌شود، در حالی که در برخی از اجزا یا قطعات کمبود وجود دارد. سه راهبرد برای بهبود تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین وجود دارد که عبارتند از: ارائه ویژگی‌های ریخت‌شناسی شبکه، سخت شدن یا محافظت از عناصر حیاتی، ارائه اجزای پشتیبان با ظرفیت انعطاف‌پذیر، و سخت شدن یا محافظت از عناصر حیاتی [۳].

از طرفی پایداری نیز موضوع مهمی از قرن ۲۱ به بعد می‌باشد که در شبکه زنجیره تأمین مورد توجه قرار گرفته است. برای پایداری زنجیره تأمین، سه موضوع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی لحاظ می‌شود. پایداری زنجیره تأمین منجر به عملکرد بهتر سازمان می‌شود. کاهش هزینه، کاهش بیکاری، حفاظت و سلامت افراد، کیفیت بهتر محصول، حفاظت از محیط‌زیست، افزایش انگیزه و بهره‌وری کارکنان فواید و نتایج زنجیره تأمین پایدار هستند [۱].

در این مقاله مساله مکان‌یابی تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان و انتخاب تأمین‌کننده در زنجیره تأمین به طور همزمان در نظر گرفته می‌شود به طوری که ویژگی‌های مختلفی مانند محدودیت ظرفیت، احتمال اختلال تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان و تاب‌آوری را در خود دارد. بسیار مهم است که مدل جدید تخصیص و مکان‌یابی ارائه شده، بهترین تأمین‌کننده را بر اساس کیفیت مواد اولیه، توانایی تاب‌آوری و هزینه آنها پیشنهاد می‌کند. بنابراین بهترین نوآوری ما در نظر گرفتن انتخاب تأمین‌کننده، محل تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان و تخصیص مراکز زنجیره تأمین و

² Closed-loop supply chain network

¹ Supply chain network design

نقل جانبی بین تاسیسات در همان سطح و نگهداری موجودی از استراتژی‌های تاب‌آوری مدل پیشنهادی آنها می‌باشد. استراتژی‌های ظرفیت اضافی در پایگاه، خطوط لوله مستحکم و پشتیبان قبل از وقوع اختلال، راهبرد بهبود برای بازیابی ظرفیت‌های از دست رفته تسهیلات بعد از وقوع اختلال، در مطالعه‌ای بعنوان راهبردهای تاب‌آوری برای شبکه انتقال گاز طبیعی استفاده شده‌اند [۱۳]. بهبودی بعد از وقوع اختلال بسیار حائز اهمیت است که در مطالعه‌ی خمس و همکاران [۱۴]، به آن پرداخته شده است. آنها یک مدل پویا ارائه داده‌اند که زمان و هزینه بهبود برای بازگرداندن شرایط به حالت قبل از وقوع اختلال در آن در نظر گرفته‌اند که کاربرد مدل مربوطه در زنجیره تامین دوسطحی مرگداری شرح داده‌اند. کاهش هزینه و کاهش عدم تاب‌آوری شبکه، اهداف یک مدل بهینه‌سازی تصادفی در زمینه طراحی شبکه زنجیره تامین تاب‌آور هستند [۱۵]. افزایش تقاضای برآورده شده و کاهش هزینه، اهداف یک مدل تاب‌آور هستند به طوری که اختلال جزئی مراکز توزیع و اختلال کامل خطوط ارتباط بین مراکز توزیع و خرده فروشان در نظر گرفته شده است. منابع چندگانه، انتقال مستقیم از تامین کنندگان به خرده فروشان، حمل و نقل جانبی بین مراکز توزیع، استراتژی‌های مدل مربوطه هستند [۱۶].

والی سیر و روغنیان [۱۷]، یک زنجیره تامین ترکیبی حلقه باز و بسته را مطرح کردند به طوری که در آن استراتژی تاب‌آوری شامل منبع‌یابی چندگانه، تقویت تسهیلات، ظرفیت‌های تولید اضافی در نظر گرفته‌اند. همتی و همکاران [۱۸]، مدل دو هدفه افزایش درآمد و کاهش زمان تحویل برای محصولات فسادپذیر ارائه نموده‌اند به طوری که محصولاتی که عمر آنها تمام شده است با قیمت کمتر فروخته می‌شوند. در ابتدا تامین کنندگان با توجه به معیارهای تاب‌آوری و چابکی و با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها انتخاب می‌شوند. به منظور افزایش چابکی زنجیره تامین یکپارچه، بین مراکز توزیع رابطه وجود دارد. از طرفی تقاضا به صورت عدد فازی لحاظ شده است. در مدل اسفندیاری و همکاران [۳]، سه مدل فرمول نویسی و بررسی شده است. ابتدا راهبرد سخت کردن تسهیلات و تامین کننده پشتیبان در یک مدل غیرخطی بررسی شده است و در مدلی دیگر راهبرد تعمیر و هزینه‌های مربوطه لحاظ شده است. آنها دو مدل اول را در مدل سوم ترکیب نموده و حل کرده‌اند.

چندین مقاله مروری در زمینه تاب‌آوری تدوین شده است، از جمله آنها می‌توان به مطالعه‌ی سودان و همکاران [۱۹] اشاره

همکاران [۶]، مدل چند هدفه‌ای برای زنجیره تامین گاز طبیعی فرمول نویسی نموده‌اند. افزایش درآمد، کاهش هزینه و کاهش گاز گلخانه‌ای منتشر شده (اثر محیطی) اهداف مرتبط به پایداری و کاهش جریمه ظرفیت استفاده نشده و افزایش سطح سرویس اهداف مدل برای بحث تاب‌آوری هستند. در مطالعه‌ای دیگر، هزینه‌های مربوط به سه راهبرد تاب‌آوری برای پاسخ به سه سناریوی مختلف اختلال، هزینه حمل و نقل و زمان بعنوان توابع هدف مدل مطرح شده‌اند. راه‌اندازی مجدد پایگاه، اشتراک ظرفیت تولید، اشتراک ظرفیت تولید و حمل و نقل، بعنوان راهبردهای تاب‌آوری در نظر گرفته شده‌اند [۷]. قزوینی و همکاران [۸] مولفه‌های تاب‌آوری را در یک شرکت تولید قطعات خودرو بررسی و شناسایی نموده‌اند به طوری که به دنبال تناظر بین مولفه‌های تاب‌آوری و گونه‌های نوآورانه تاب‌آوری بوده‌اند. ملاشاهی و همکاران [۹] رقابت و پایداری را در یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه پویا و یکپارچه یک زنجیره تأمین حلقه بسته رقابتی و پایدار استفاده نموده‌اند. بطوریکه مدل مورد نظر برای یک کالای زوال‌پذیر بوده و در رقابت بین دو زنجیره تأمین با توجه به مسأله زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آوری مورد بررسی قرار گرفته است. احمدپور و همکاران [۱۰] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه، چند محصولی، چند دوره‌ای، چند مواد اولیه و چند سطحی ارائه نموده‌اند. مدل ارائه شده یک زنجیره تامین سبز، تاب‌آور و انعطاف‌پذیر است که عدم قطعیت‌های موجود در عرضه و تقاضا را به طور مؤثری مدیریت می‌نماید. برای عدم قطعیت‌هایی که در ارتباط با عرضه و تقاضا است، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شده است. جمشیدی و همکاران [۱۱] به شناسایی و رتبه بندی عوامل انسانی مؤثر در تاب‌آوری زنجیره تامین ناب پرداخته‌اند. با مطالعه تحقیقات گذشته هر یک از عوامل انسانی مؤثر بر زنجیره تامین تاب‌آور و زنجیره تامین ناب از طریق رویکرد تحلیل محتوای مقوله‌ای شناسایی شدند. بطوریکه جامعه آماری تحقیق، مقالات علمی- پژوهشی موجود در پایگاه‌های علمی معتبر خارجی و داخلی از سال ۲۰۱۲ میلادی و سال ۱۳۹۰ شمسی به بعد بوده است.

بیوکی و همکاران [۱۲] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای را برای محصولات فسادپذیر فرمول نویسی کردند که استراتژی‌های مختلف تاب‌آوری و حداقل سطح خدمت مورد پذیرش بررسی شده است. امضای قرارداد با تامین کنندگان پشتیبان، ذخیره ظرفیت اضافی در تاسیسات تولیدی، حمل و

به عنوان بهترین راهبرد انتخاب شد [۲۵]. اختلالات در نیروی کار شامل محدودیت‌های نیروی کار می‌شود در یک ساختار شبکه نظریه بازی زنجیره تامین بررسی شده است. سه سناریوی مختلف شامل محدودیت دسترسی نیروی کار در پیوندهای زنجیره تامین، محدودیت دسترسی نیروی کار در سرتاسر یک لایه از زنجیره تامین و یک محدودیت واحد بر نیروی کار در اقتصاد شبکه زنجیره تامین، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۲۶]. خدادادی دیدانی و همکاران [۲۷]، پایداری را در زنجیره تامین صنعت کشتیرانی مطالعه نموده‌اند به طوری که الگوی توسعه منابع انسانی را طراحی نموده‌اند. برای گردآوری داده‌ها از مصاحبه نیمه‌ساختاریافته و پرسشنامه محقق ساخته استفاده شده است.

۳- مدل ارائه شده

یک زنجیره تامین تخصیص و مکان‌یابی قابل اعتماد دو هدفه فرموله شده است که چند محصولی، پنج سطحی می‌باشد. این شبکه متشکل از تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان و مشتریان است. تابع هدف اول هزینه کل را استخراج می‌کند، تابع هدف دوم کیفیت مواد خام و محصولات را به حداکثر می‌رساند. بطوریکه مولفه کیفیت هر ماده خام در هر تامین‌کننده، و پارامتر کیفیت هر محصول در هر کارخانه در نظر گرفته شده است که به ترتیب در میزان ماده خام آن تامین‌کننده و در مقدار محصول تولیدی آن کارخانه ضرب می‌شود که در نهایت میزان کیفیت بدست می‌آید. تقاضا در مدل ارائه شده به صورت عدد فازی ذوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است. مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی تخصیص و مکان‌یابی جدید با قابلیت تاب‌آوری در شرایط اختلال احتمالی پیشنهاد شده است. هر تامین‌کننده و تولیدکننده دارای هزینه جریمه، هزینه بازیابی و زمان بازیابی است که پس از یک اختلال به طور کامل قابل استفاده است. تامین‌کنندگان یا تولیدکنندگان مختل شده باید هزینه جریمه‌ای را در طول زمان بازیابی خود بپردازند تا به صورت آبی سرویس داده شوند. البته تولیدکنندگانی که در هنگام ایجاد کارخانه از استحکام سازی استفاده می‌کنند، دچار اختلال نمی‌شوند. برای توزیع کنندگانی که دچار اختلال شدند، محصولات از تولیدکننده به صورت مستقیم به خرده فروشان ارسال می‌گردد که مستلزم هزینه بالاتری است.

نمود. آنها در ارتباط باراهبردهای کاهش، موجودی قبل از موقعیت و تامین‌کنندگان پشتیبان خارج از محل منبع اولیه را نام بردند که باعث تاب‌آوری زنجیره می‌شود. استراتژی‌های منابع دوگانه نیز باعث افزایش تاب‌آوری و نگهداشتن جریان پیوسته مواد خام می‌شود. راهبرد مسیر انعطاف‌پذیر، یکپارچه‌سازی زنجیره تامین، انتقال تولید، تحلیل خطر زنجیره تامین و مدیریت امنیت شرکای زنجیره تامین نیز از جمله راهبردهای کاهش به شمار می‌آیند. در مقاله مروری دیگر، با تحلیل منابع عدم قطعیت و در معرض خطر قرار گرفتن زنجیره تامین، عوامل کلیدی تصادفی محیطی بررسی و ماهیت رویدادهای تهدید کننده زنجیره تامین مورد بحث قرار گرفتند [۲۰]. نتایجی که از بررسی ۲۲۰ مقاله بدست آمده است نشان می‌دهد که مدل‌های بهینه‌سازی بیشتر جنبه‌های اقتصادی و محیطی را در نظر گرفته‌اند و کمتر به جنبه‌های اجتماعی پرداخته‌اند. این مقالات از جهت مدل‌های تحقیق در عملیات (OR^1) بکار رفته در آنها، سطوح تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده و شیوه‌های پایداری، مورد بررسی قرار گرفته بودند [۲۱].

اندازه‌گیری تاب‌آوری موضوعی است که در برخی تحقیقات دیده می‌شود. هزینه از دست رفته، زمان پاسخدهی و سطح خدمت شاخص‌هایی هستند که با آنها می‌توان راهبرد مطرح شده را اندازه‌گیری نمود. اندازه‌گیری تاب‌آوری زنجیره تامین شاخصی است که توانایی زنجیره تامین را برای نگهداری عملیات به صورت نرمال در برخورد با چالش‌ها و اختلالات مختلف، ارزیابی می‌کند [۲۲]. کروود و همکاران [۲۳]، یک مدل شبکه تحلیل پوششی داده‌ها ($NDEA^2$) را در یک شبکه‌ی زنجیره تامین که شامل تامین‌کنندگان، تولیدکننده و مشتریان بوده است، برای ارزیابی راهبردهای کاهش خطر ارائه داده‌اند. هزینه‌ی راهبردها، نتایج عملکرد و وابستگی‌های متقابل بین قسمت‌های مختلف زنجیره تامین، موضوعاتی بودند که مورد ارزیابی قرار گرفتند. سه معیار تاب‌آوری، سبز بودن و سنتی بودن بعنوان معیارهای انتخاب تامین‌کننده در شرکت پتروشیمی فن‌آوران بررسی شده است که تاب‌آوری بعنوان اولین معیار انتخاب شد [۲۴].

سه راهبرد نگهداری موجودی، ذخیره ظرفیت پشتیبان در تامین‌کنندگان و منابع چندگانه در یک زنجیره تامین رقابتی اتومبیل مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت نگهداری موجودی

¹ Operation Research

² Network data envelopment analysis

جدول (۱): مروری بر مطالعات گذشته

مقالات مروری	اندازه گیری تاب آوری	مکانیابی	کیفیت	انتخاب تامین کننده	عدم قطعیت	راهبرد تاب آوری										
						ارتباط مستقیم بین مراکز	نگهداری موجودی	منابع چندگانه	کاهش گره بحرانی	تامین کنندگان پشتیبان	تولید کنندگان پشتیبان	تعمیر و بهبود	استحکام سازی	سایر		
										*						[۱]
										*		*	*			[۳]
						فازی						*				[۴]
								*						*		[۵]
														*		[۶]
						سناریو								*		[۷]
														*		[۸]
														*		[۹]
				استوار						*	[۱۰]					
					*			*		*	[۱۲]					
								*	*	*	[۱۳]					
								*	*		[۱۴]					
									*	*	[۱۵]					
					*		*			*	[۱۶]					
						*				*	[۱۷]					
				*						*	[۱۸]					
*											[۱۹]					
*											[۲۰]					
*											[۲۱]					
	*										[۲۲]					
	*										[۲۳]					
	*										[۲۴]					
					*	*		*			[۲۵]					
		*	*	*	فازی	*				*	*	مدل ارائه شده				

شاخص ها:		وسيله v	
r	مواد خام	مقدار مورد نیاز از ماده خام r در هر واحد	$\mu_{p,r}$
p	محصول نهایی	محصول p	
s	مکان تامین کننده	حداکثر ظرفیت تامین کننده s برای فراهم	$Mrs_{r,s}$
m	مکان بالقوه کارخانه	کردن ماده خام r	
d	توزیع کننده	حداکثر ظرفیت تولید محصول p در	$Mpm_{p,m}$
re	خرده فروش	کارخانه m	
c	مکان مشتریان	وزن هر ماده خام r	gr_r
v	وسيله نقليه	وزن هر محصول p	gp_p
پارامترها:		ظرفیت وسیله ی نقلیه ی v	Wei_v
$Dep_{p,c}$	تقاضای مشتری c از کارخانه m برای محصول p	کل بودجه برای ترمیم	REC
$Exr_{r,s}$	هزینه تامین ماده خام r از تامین کننده s	کل بودجه برای جریمه	PEN
Exs_s	هزینه انتخاب تامین کننده مکان s	کل بودجه سخت شدن	HAR
$QUs_{s,r}$	کیفیت ماده خام r در تامین کننده مکان s	متغیرها:	
PS_s	احتمال اختلال تامین کننده s	متغیرهای مربوط به انتخاب تامین کننده	XS_s
TRS_s	زمان ترمیم تامین کننده s	انتخاب تامین کننده s	
CRS_s	هزینه ترمیم تامین کننده s	مقدار ماده خام r که از تامین کننده s به	
CPS_s	هزینه جریمه تامین کننده s	تولیدکننده m با وسیله v در دوره t ارسال می شود	$Vtr_{r,s,m,v}$
$LS_{s,m}$	فاصله تامین کننده s از مکان کارخانه m	متغیرهای مربوط به تخصیص	
Exm_m	هزینه ایجاد کارخانه در مکان m	مقدار محصول p که در تولیدکننده m تولید میشود	$Vtp_{p,m}$
$QUm_{m,p}$	کیفیت محصول p در کارخانه در مکان m	مقدار محصول p که از تولیدکننده m با وسیله v به توزیع کننده d ارسال میشود	$Vtd_{p,m,d,v}$
PM_m	احتمال اختلال کارخانه m	مقدار محصول p که از به توزیع کننده d به خرده فروش re با وسیله v ارسال میشود	$Vtre_{p,d,re,v}$
TRM_m	زمان ترمیم کارخانه m	مقدار محصول p که از کارخانه در مکان m به خرده فروش re با وسیله v ارسال میشود	$Vtmre_{p,m,re,v}$
CRM_m	هزینه ترمیم کارخانه m	مقدار محصول p که از خرده فروش re به مشتری c با وسیله v ارسال میشود	$Vtc_{p,re,c,v}$
CPM_m	هزینه جریمه کارخانه m	متغیرهای مربوط به مکان یابی	
$CHM_{m,p}$	هزینه سخت شدن کارخانه m برای محصول p	باز کردن کارخانه در مکان m	X_m
$Exp_{m,p}$	هزینه تولید محصول p در کارخانه m	باز کردن توزیع کننده در مکان d	Xd_d
Pd_d	احتمال اختلال توزیع کننده d	باز کردن خرده فروش در مکان re	Xre_{re}
Exd_d	هزینه ایجاد توزیع کننده در مکان d	متغیرهای مربوط به تاب آوری	
$Exre_{re}$	هزینه ایجاد خرده فروش در مکان re	سخت شدن کارخانه در مکان m برای محصول p	XH_m
$lm_{m,d}$	فاصله مکان کارخانه m از توزیع کننده d		
$Lre_{d,re}$	فاصله مکان توزیع کننده d از خرده فروش re		
$Lmre_{m,re}$	فاصله مکان کارخانه m از خرده فروش re		
$Lcre_{re,c}$	فاصله مکان خرده فروش re از مشتری c		
Exv_v	هزینه حمل و نقل به ازای هر کیلومتر با		

در معادله ۱۰ بیان شده است. اگر تولیدکننده m ایجاد شود، محصول p می‌تواند در آنجا تولید شود (معادله ۱۱). و به همین ترتیب معادلات ۱۲ تا ۱۸ نیز در ارتباط با ایجاد هر مرکز و متغیرهای مربوط به آن مرکز می‌باشد که در صورتی آن متغیرها مقدار می‌گیرند که مرکز مربوطه ایجاد شده باشند. معادله ۱۹ ارتباط بین متغیر صفر و یک با متغیر مثبت مربوط به مقدار ماده خام r از تامین کننده s به تولیدکننده m با وسیله نقلیه v است. معادله ۲۰ ارتباط بین متغیر صفر و یک با متغیر مثبت مربوط به مقدار محصول p تولید شده در تولیدکننده m است. معادلات ۲۱ تا ۲۵ مربوط به ظرفیت هر وسیله نقلیه است که در انتقالات مواد خام و محصولات باید رعایت شود. حداکثر بودجه برای پرداخت جریمه و حداکثر بودجه برای ترمیم و مستحکم‌سازی، به ترتیب در معادله ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ بیان شده است. معادلات ۲۹ و ۳۰ به ترتیب مربوط به حداکثر ظرفیت تهیه ماده خام از تامین کننده و حداکثر ظرفیت تولید محصول نهایی است. معادله شماره ۳۱ هم متغیرهای مساله را نشان می‌دهد.

۳-۱- مدلسازی مساله

$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \sum_s \sum_r \sum_m \sum_v \sum_p Exs_s.XS_s + Exr_{r,s}.Vtr_{r,s,m,v} + Exv_v.Ls_{s,m}.Vtr_{r,s,m,v} + PS_s.Xtr_{r,s,m,v}.TRS_s.CPS_s \\ & + PS_s.CRS_s.XS_s \\ & + Exm_m.X_m + Exp_{m,p}.Vtp_{p,m} + (Exv_v.Lm_{m,d}.Vtd_{p,m,d,v} + Exv_v.Lre_{d,re}.Vtre_{p,d,re,v}).(1 - Pd_d) \\ & + Exv_v.Lmre_{m,re}.Vtmre_{p,m,re,v}.(Pd_d) \\ & + Exv_v.Lcre_{c}.Vtc_{p,re,c,v} \\ & + Exd_d.Xd_d + Exre_{re}.Xre_{re} \\ & + PM_m.(1 - XH_m).Xtp_{p,m}.TRM_m.CPM_m \\ & + PM_m.(1 - XH_m).CRM_m.X_m \\ & + CHM_{m,p}.XH_m \end{aligned} \quad (1)$$

$$\max Z_2 = QUs_{s,r}.Vtr_{r,s,m,v} + QUm_{m,p}.Vtp_{p,m} \quad (2)$$

$$\sum_v \sum_{re} Vtc_{p,re,c,v} = Dep_{p,c} \quad (3)$$

$$\sum_s \sum_v Vtr_{r,s,m,v} = \sum_c \sum_v \sum_p \mu_{p,r}.Vtp_{p,m} \quad (4)$$

$$Vtp_{p,m} \geq \sum_d \sum_v (1 - Pd_d).Vtd_{p,m,d,v} + \sum_{re} \sum_v Pd_d.Vtmre_{p,m,re,v} \quad (5)$$

$$\sum_m \sum_v Vtd_{p,m,d,v} \geq \sum_{re} \sum_v Vtre_{p,d,re,v} \quad (6)$$

$$\sum_d \sum_v (1 - Pd_d).Vtre_{p,d,re,v} + \sum_m \sum_v (Pd_d).Vtmre_{p,m,re,v} \geq \sum_c \sum_v Vtc_{p,re,c,v} \quad (7)$$

$$Xtr_{r,s,m,v} \leq XS_s \quad (8)$$

$$Xtr_{r,s,m,v} \leq X_m \quad (9)$$

$$XH_m \leq X_m \quad (10)$$

$$Xtp_{p,m} \leq X_m \quad (11)$$

تابع هدف اول مربوط به هزینه می‌باشد که شامل هزینه انتخاب تامین کنندگان، ایجاد مراکز تولید، هزینه تهیه مواد، تولید محصولات و حمل و نقل می‌باشد. تابع هدف دوم کیفیت ماده خام هر تامین کننده و محصول تولیدی هر تولیدکننده را حداکثر می‌سازد، به عبارتی این تابع هدف باعث می‌شود تامین کننده و تولیدکننده‌ای را انتخاب کنیم که بهترین کیفیت را داشته باشد. میزان محصولی که از تمام خرده‌فروشان به هر مشتری ارسال می‌گردد باید برابر با میزان تقاضا (معادله ۳). میزان مورد نیاز از هر نوع ماده خام در معادله ۴ بیان شده است که باید از تامین کنندگان تامین شود. معادله ۵، معادله تعادلی برای هر تولیدکننده است که میزان ورودی‌ها و خروجی‌های آن باید توازن داشته باشد. به همین ترتیب معادله شماره ۶، معادله تعادلی برای هر توزیع کننده است. ورودی‌ها و خروجی‌های هر خرده فروش در معادله ۷ بیان شده است. در صورتی از تامین کننده s ماده خام تهیه می‌شود که انتخاب شده باشد (معادله ۸). در صورتی ماده خام از تامین کننده وارد تولیدکننده m می‌شود که در مکان m ایجاد شده باشد (معادله ۹). در صورتی تولیدکننده m مستحکم می‌شود که تصمیم به ایجاد آن در مکان m گرفته شده باشد که

$$Vtmre_{p,m,rs,v} \leq Mbig.X_m \quad (12)$$

$$Vtmre_{p,m,rs,v} \leq Mbig.Xre_{rs} \quad (13)$$

$$Vtd_{p,m,d,v} \leq Mbig.X_m \quad (14)$$

$$Vtd_{p,m,d,v} \leq Mbig.Xd_d \quad Vtd_{p,m,d,v} \leq Mbig.Xd_d \quad Vtd_{p,m,d,v} \leq Mbig.Xd_d \quad (15)$$

$$Vtre_{p,d,rs,v} \leq Mbig.Xd_d \quad (16)$$

$$Vtre_{p,d,rs,v} \leq Mbig.Xre_{rs} \quad (17)$$

$$Vtc_{p,rs,c,v} \leq Mbig.Xre_{rs} \quad (18)$$

$$Vtr_{r,s,m,v} \leq Mbig.Xtr_{r,s,m,v} \quad (19)$$

$$Vtp_{p,m} \leq Mbig.Xtp_{p,m} \quad (20)$$

$$\sum_r Vtr_{r,s,m,v} \cdot gr_r \leq Wei_v \quad (21)$$

$$\sum_p Vtd_{p,m,d,v} \cdot gp_p \leq Wei_v \quad (22)$$

$$\sum_p Vtre_{p,d,rs,v} \cdot gp_p \leq Wei_v \quad (23)$$

$$\sum_p Vtmre_{p,m,rs,v} \cdot gp_p \leq Wei_v \quad (24)$$

$$\sum_p Vtc_{p,rs,c,v} \cdot gp_p \leq Wei_v \quad (25)$$

$$\sum_p \sum_m (TRM_{m,p} \cdot CPM_{m,p} \cdot \sum_c \sum_v Xtp_{p,m}) + \sum_s \sum_r (TRS_{s,r} \cdot CPS_{s,r} \cdot \sum_m \sum_v Xtr_{r,s,m,v}) \leq PEN \quad (26)$$

$$CPM_{m,p} \cdot X_m + CRS_{s,r} \cdot XS_s \leq REC \quad (27)$$

$$CHM_{m,p} \cdot XH_{m,p} \leq HAR \quad (28)$$

$$\sum_m \sum_v Vtr_{r,s,m,v} \leq Mrs_{r,s} \quad (29)$$

$$Vtp_{p,m} \leq Mpm_{p,m} \quad (30)$$

$$Vtr_{r,s,m,v}, Vtp_{p,m,c,v}, Vtd_{p,m,d,v}, Vtre_{p,d,rs,v}, Vtmre_{p,m,rs,v}, Vtc_{p,rs,c,v} \geq 0$$

$$XS_s, X_m, XH_{m,p}, Xtr_{r,s,m,v}, Xtp_{p,m,c,v}, Xd_d, Xre_{rs} = 0,1 \quad (31)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج محاسباتی

در این قسمت مدل جدید پیشنهادی با استفاده از یک مثال عددی ارزیابی می‌شود. مساله مورد نظر با ابعاد $p=2$ و $r=5$ و $v=1$ و $m=1$ و $c=5$ و $d=1$ و $re=5$ و $s=1$ مورد حل قرار گرفته است. مقادیر مربوط به مولفه‌ها در جداول (۲) و (۳) آورده شده است. برای حل مدل از نرم افزار گمز استفاده می‌شود. مدل مورد نظر غیرخطی است و امکان استفاده از الگوریتم‌های دقیق گمز نیست و باید از الگوریتم‌های بارون و ... استفاده کرد. مدل پیشنهادی جدید با دو روش مجموع وزنی و LP-متریک به تک هدفه تبدیل و حل شد که نتایج آن در جدول (۴) نشان داده می‌شود. در روش LP-متریک از $p=1$ استفاده شده است. در روش مجموع وزنی نیز از مقادیر وزنی $w_1=0.6$ و $w_2=0.4$ استفاده شده است. سپس مقادیر دو تابع هدف و تابع ادغامی بدست آمد.

مدل جدید پیشنهادی یک مدل دو هدفه است که برای نزدیک شدن مساله به واقعیت، تقاضا به صورت عددفازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است چرا که عدم قطعیت در دنیای واقعی اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین ابتدا باید مساله با روش رزمجویی و همکاران [۲۳]، به صورت قطعی تبدیل شود. بنابراین معادله شماره ۴ به صورت زیر تغییر می‌کند. مقادیر پارامترها در چهار حالت به صورت جدول (۲) می‌باشد.

$$\sum_v \sum_{rs} Vtc_{p,rs,c,v} = \frac{Dep1_{p,c} + Dep2_{p,c} + Dep3_{p,c} + Dep4_{p,c}}{4} \quad (32)$$

سپس با روش LP-متریک که در معادله شماره ۳۳ نشان داده شده است، مدل دو هدفه به مدل تک هدفه تبدیل می‌شود [۲۴].

$$\min Z = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^* - f_i}{f_i^*} \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (33)$$

مقادیر توابع هدف با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف اختلال، با روش مجموع وزنی ($w_1=0/6$ و $w_2=0/4$) بدست آمده است. جدول (۵) دو حالت وقوع اختلال در توزیع‌کننده و عدم وقوع اختلال در توزیع‌کننده با توجه به مقادیر احتمالی اختلال تامین‌کننده و تولیدکننده را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بدست آمده، مقادیر تابع هدف دوم (کیفیت) در دو حالت یکسان است اما مقدار تابع هزینه در حالت وقوع اختلال بیشتر است اما تفاوت زیادی ندارد که نشان دهنده کارکرد راهبردهای مورد استفاده در مدل است.

جدول (۵): بررسی اختلال توزیع‌کننده

توابع هدف	احتمال اختلال در تامین‌کننده و تولیدکننده $P(s) = \text{uniform}(0/2, 0/3)$, $p(m) = \text{uniform}(0/1, 0/25)$	
	عدم اختلال در توزیع‌کننده $P(d)=0$	وقوع اختلال در توزیع‌کننده $P(d)=1$
هزینه	۲۴۱۱۷۸۳۰۰	۹۳۲۳۸۹۱۰۰
کیفیت	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵

جدول (۶)، مقادیر توابع هدف در حالت‌های اختلال تامین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان و عدم اختلال در کل زنجیره است. در اینجا نیز از روش مجموع وزنی ($w_1=0/6$ و $w_2=0/4$) استفاده شده است. مقدار تابع هزینه در حالت وقوع اختلال در توزیع‌کننده بیشتر از حالت وقوع اختلال در تامین‌کننده و تولیدکننده است و هزینه در حالت وقوع اختلال تولیدکننده از دو حالت دیگر کمتر است. بنابراین می‌توان گفت راهبردهای بکار رفته برای وقوع اختلال تولیدکننده کارکرد بیشتری نسبت به راهبرد وقوع اختلال توزیع‌کننده و تامین‌کننده دارد. در هر سه حالت اختلال تابع هدف اول (هزینه) بیشتر از حالت عدم وقوع اختلال است اما مقادیر تابع هدف دوم (کیفیت) در دو حالت تفاوتی ندارد. عدم تغییر تابع هدف کیفیت بدین علت است که در مدل کمبود لحاظ نشده و باید تقاضا در هر حالت به دست مشتری برسد. البته در حل مدل با ابعاد بالا و تنوع کیفیتی و محصولی و تعداد بالای تولیدکننده و تامین‌کننده، مقدار این تابع نیز تغییر خواهد کرد.

جدول (۶): بررسی اختلال‌ها

توابع هدف	اختلال در تامین‌کننده	اختلال در تولیدکننده	عدم اختلال
هزینه	۲۳۸۵۹۹۳۰۰	۲۳۸۴۴۴۰۰	۲۳۸۴۲۰۹۰۰
کیفیت	۷۳۳۶۲۸۵	۷۳۳۶۲۸۵	۷۳۳۶۲۸۵

جدول (۲): مقادیر پارامترهای تقاضا

dep1(p,c)	uniform (۲۰۰, ۲۵۰)
dep2(p,c)	uniform (۲۳۰, ۲۶۰)
dep3(p,c)	uniform (۲۵۵, ۲۸۰)
dep4(p,c)	uniform (۲۸۵, ۳۰۰)

جدول (۳): مقادیر پارامترها

پارامتر	مقادیر
dep (p,c)	Uniform (۲۰۰, ۳۰۰)
exs(s)	uniform(۵۰, ۶۰)
exm(m)	uniform(۷۰, ۹۰)
exp(m,p)	uniform(۲۰, ۲۵)
exr(r,s)	uniform(۳۰, ۴۰)
exv(v)	uniform(۱۰, ۲۵)
exd(d)	uniform(۵۰, ۶۰)
exre(re)	uniform(۵۰, ۶۰)
ls(s,m)	uniform(۶, ۸)
lm(m,d)	uniform(۷, ۱۰)
lre(d,re)	uniform(۷, ۱۰)
lmre(m,re)	uniform(۹۶۰, ۱۰۸۰)
lc(re,c)	uniform(۷, ۱۰)
ps(s)	uniform(0/2, 0/3)
chm(m)	uniform(۵۰, ۱۰۰)
crm(m)	uniform(۴۰, ۷۰)
cpm(m)	uniform(۱۵, ۲۵)
cps(s)	uniform(۱۰, ۲۰)
crs(s)	uniform(۴۰, ۷۰)
trm(m)	uniform(۳۰, ۵۰)
trs(s)	uniform(۵۰, ۶۰)
pm(m)	uniform(0/1, 0/25)
pd(d)	۱

جدول (۴): مقادیر توابع هدف

تابع هدف	مقدار LP-متریک $P=1$	مقدار مجموع وزنی $w_1=0/6, w_2=0/4$
تابع هدف اول	۲۴۱۱۸۵۴۰۰	۲۴۱۱۸۵۴۰۰
تابع هدف دوم	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵
تابع هدف ادغامی	۰/۹۹۷	۱/۰۹۲

۴-۲- تحلیل حساسیت

در این قسمت برای بررسی بیشتر مدل، تحلیل حساسیت روی مولفه‌های تقاضا، هزینه حمل و نقل و مولفه فاصله تولیدکننده از خرده‌فروش انجام شده است. تغییرات مولفه هزینه حمل و نقل از کاهش ۱۰۰٪ پارامتر تا افزایش ۲۰٪ آن در نظر گرفته شده است. در این بررسی از مجموع وزنی با مقادیر ($w_1=0/5$ و $w_2=0/5$) برای تک هدفه نمودن مساله استفاده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول (۷)، برای دو تابع هدف، با افزایش هزینه حمل و نقل مقدار تابع هدف اول (هزینه) افزایش می‌یابد که بسیار منطقی است. مقادیر تابع هدف دیگر (کیفیت) در کاهش ۱۰۰٪ مولفه هزینه حمل و نقل، افزایش می‌یابد و برای تغییرات دیگر این مولفه، تغییری در این دو تابع هدف ایجاد نشده است. در کاهش ۱۰۰٪ این مولفه، مقدار این پارامتر به صفر می‌رسد که منجر به افزایش کیفیت (تابع هدف دوم) می‌شود. چرا که با در نظر نگرفتن هزینه حمل و نقل، تمایل به تولید بیشتر می‌شود و به دنبال آن کیفیت محصولات بالاتر می‌رود.

جدول (۷): تحلیل حساسیت روی پارامتر هزینه حمل و نقل به ازای

هر کیلومتر

درصد تغییر پارامتر	توابع هدف	
	هزینه	کیفیت
	$P(d)=0$	$P(d)=1$
-۰/۲	۲۴۱۰۷۷۴۰۰	۷۸۴۹۶۶۰۰
-۰/۱	۲۴۱۰۷۷۴۰۰	۸۵۸۷۱۰۷۰۰
۰	۲۴۱۰۷۷۴۰۰	۹۳۲۳۵۸۴۰۰
+۰/۱	۲۴۱۰۷۷۴۰۰	۱۰۰۶۱۰۰۰۰
+۰/۲	۲۴۱۰۷۷۴۰۰	۱۰۷۹۸۴۳۰۰

۴- نتیجه گیری

امروزه بسیاری از زنجیره‌های تامین با مسائل غیرمنتظره و اختلالات در سرتاسر زنجیره مواجه می‌شوند. بنابراین شناسایی و پیش‌بینی اختلالات و در نظر گرفتن راهبردهای تاب‌آوری می‌تواند کمک شایانی در کارایی و عملکرد بهتر زنجیره داشته باشد. در این مقاله یک زنجیره تامین تاب‌آور غیرقطعی دوهدفه، مدلسازی شده است. زنجیره تامین مورد نظر شامل تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و مشتریان است. مساله مورد نظر تصمیمات مربوط به مکان‌یابی، تخصیص و تاب‌آوری را به طور همزمان مورد بررسی قرار می‌دهد. این تصمیمات باید با هم هماهنگ و در راستای هم اتخاذ شوند که تصمیم‌گیری همزمان آنها کمک شایانی به مدیران برای تصمیم‌گیری می‌کند. چرا که شاید یکسری محدودیت‌هایی در یک قسمت باشد که در قسمت‌های دیگر به آنها توجه نشود. اختلال در مراکز تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان در نظر گرفته شده است برای تامین‌کنندگان از راهبرد تاب‌آوری تعمیر با در نظر گرفتن زمان بهبود و هزینه بهبود، برای تولیدکنندگان از راهبرد تاب‌آوری تعمیر با در نظر گرفتن زمان بهبود و هزینه بهبود و مستحکم سازی استفاده شده است. برای

درصد تغییر پارامتر	توابع هدف	
	هزینه	کیفیت
-۱۰۰٪	۵۵۸۹۴۱۶۰	۷۸۱۹۴۸۵/۴۰۷
-۰/۲	۲۰۳۶۳۲۵۰۰	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵
-۰/۱	۲۲۲۳۰۲۰۰۰	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵
+۰/۱	۲۵۹۸۵۲۹۰۰	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵
+۰/۲	۲۷۸۶۲۸۳۰۰	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵

تغییرات مولفه تقاضا از کاهش ۲۰٪ پارامتر تا افزایش ۲۰٪ آن در نظر گرفته شده است. در این بررسی از مجموع وزنی با مقادیر ($w_1=0/5$ و $w_2=0/5$) برای تک هدفه نمودن مساله استفاده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول (۸)، برای دو تابع هدف، با افزایش تقاضا مقدار تابع هدف اول (هزینه) افزایش می‌یابد که بسیار منطقی است. مقادیر تابع هدف دیگر نیز بیشتر می‌شود که این امر به دلیل نیاز بیشتر به محصولات بیشتر است.

جدول (۸): تحلیل حساسیت روی پارامتر تقاضا

درصد تغییر پارامتر	توابع هدف	
	هزینه	کیفیت
-۰/۲	۱۹۲۸۶۱۹۰۰	۶۰۹۴۸۸۱/۲۵۲
-۰/۱	۲۱۷۰۷۵۶۰۰	۶۸۵۶۷۴۱/۴۰۸
۰	۲۴۱۰۷۷۴۰۰	۷۶۱۸۶۰۱/۵۶۵
+۰/۱	۲۶۵۱۸۵۲۰۰	۸۳۸۰۴۶۱/۷۲۱
+۰/۲	۲۸۹۲۹۲۹۰۰	۹۱۴۲۳۲۱/۸۷۸

- [10] A. Khamseh, E. Teimoury, K. Shahanaghi, "Integrating time and cost in dynamic optimization of supply chain recovery," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 4(13), pp. 124-141, 2021.
- [11] F. Sabouhi, M. S. Jabalameli, "A stochastic bi-objective multi-product programming model to supply chain network design under disruption risks," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 3(12), pp. 196-209, 2019.
- [12] A. Ghavamifar, F. Sabouhi, A. Makui, "An integrated model for designing a distribution network of products under facility and transportation link disruptions," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 1(11), pp. 113-126, 2018.
- [13] M. M. Vali-Siar, E. Roghanian, "Resilient Mixed Supply Chain Network Redesign Under Operational And Disruption Risks: A Case Study," *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, vol. 8(16), pp. 113-135, 2020. <https://doi.org/10.22084/ier.2020.20467.1915> (in Persian).
- [14] H. Hemmati, R. Baradaran Kazemzadeh, E. Nikbakhsh, I. Nakhai Kamalabadi, "Designing an agile supply chain network for perishable products with resilient suppliers," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 3(14), 121-148, 2022.
- [15] T. Sudan, R. Taggar, P. K. Jena, D. Sharma, "Supply chain disruption mitigation strategies to advance future research agenda: A systematic literature review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 425, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138643>
- [16] W. Klibi, A. Martel, A. Guitouni, A. "The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review," *European Journal of Operational Research*, vol. 2(203), pp. 283-293, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.011>
- [17] A. P. Barbosa-Povoa, C. D. Silva, A. Carvalho, "Opportunities and Challenges in Sustainable Supply Chain: An Operations Research Perspective," *European Journal of Operational Research*, vol. 2(268), pp. 399-431, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036>
- [18] W. Li, X. Song, K. Gong, B. Sun, "A product family-based supply chain hyper network resilience optimization strategy," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 187, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109781>
- [19] R. Kraude, S. Narayanan, S. Talluri, "Evaluating the performance of supply chain risk mitigation strategies using network data envelopment analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 3(303), pp. 1168-1182, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.016>
- [20] A. Mansory, A. Nasiri, N. Mohammadi, "Proposing an Integrated Model for Evaluation of Green and Resilient Suppliers by Path Analysis, SWARA and TOPSIS," *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, vol. 2(8), pp. 129-149, 2021. <https://10.22105/jarie.2021.256316.1206>
- [21] S. Rezapour, R. Z. Farahani, M. Pourakbar, "Resilient Supply Chain Network Design under Competition: A Case Study," *European Journal of Operational Research*, vol. 3(259), pp. 1017-1035, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.041>
- [22] A. Nagurney, "Supply chain game theory network modeling under labor constraints: Applications to the Covid-19 pandemic," *European Journal of Operational Research*, vol. 3(293), pp. 880-891, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.054>
- [23] V. Razmjooei, I. Mahdavi, M. M. Paydar, "A Fuzzy Bi-objective Optimization Algorithm," *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 9(3), pp. 360-378, 2022.
- [24] A. Goli, A. M. Golmohammadi, "Multi-objective Optimization of Location and Distribution in a Closed-loop Supply Chain by Considering Market Share in Competitive Conditions," *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 9(4), pp. 483-495, 2022.
- [25] F. Ghasedi Ghazvini, F. Faezi Razi, M. M. Movahedi, K. Fathi Hafshejani, "Fuzzy Modeling for Measuring and Promoting Innovation Resilience of Supply Chains - Case Study: Automotive

توزیع‌کنندگان نیز از ارتباط مستقیم تولیدکننده با خرده‌فروش به عنوان راهبرد تاب‌آوری استفاده شد. در مدل مطرح شده، بهترین تامین‌کننده بر اساس کیفیت مواد اولیه، توانایی تاب‌آوری و هزینه، انتخاب شده است. تقاضا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده که برای قطعی کردن آن از عدد فازی دوزنقه‌ای استفاده شده است. تحلیل حساسیت روی پارامترهای هزینه حمل و نقل و تقاضا نشان از حساسیت بیشتر تابع هدف اول به این مولفه‌ها بود. برای مطالعات بیشتر می‌توان از بهینه‌سازی استوار برای بحث عدم قطعیت مدل بهره برد. همچنین راهبردهای کاهش دیگری برای مدل استفاده کرد. حل مدل در ابعاد بزرگ با روش‌های بندرز و الگوریتم لاگرانژ یا روش‌های فراابتکاری از موارد دیگری است که می‌توان در تحقیقات آتی از آنها بهره برد.

۵- مراجع

- [1] A. Yousefi-Babadi, N. Soleimani, D. Shishebori, "Capacitated Sustainable Resilient Closed-Loop Supply Chain Network Design: A Heuristics Algorithm," *Advances in Industrial Engineering*, vol. 55(4) pp. 447-479, 2021.
- [2] G. Behzadi, M. J. Sullivan, T. L. Olsen, "On metrics for supply chain resilience," *European Journal of Operational Research*, vol. 287(1), pp. 145-158, 2020.
- [3] Z. Esfandiari, M. Bashiri, R. Tavakkoli -Moghaddam, "Analysis of the Hardening and Resilience Ability in Location - Allocation Problems," *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, vol. 1(31), pp. 35 - 50, 2022
- [4] M. Afshar, S. M. Hadji Molana, B. Rahmani Parchekelaie, "Developing multi-objective mathematical model of sustainable multi-commodity, multi-level closed-loop supply chain network considering disruption risk under uncertainty," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 3(14), pp. 280-302, 2022.
- [5] Y. Z. Mehrjerdi, M. Shafiee, "Multiple-Sourcing in Sustainable Closed-loop Supply Chain Network Design: Tire Industry Case Study," *International Journal of Supply and Operations Management*, Vol. 3(7), pp. 202-221, 2020.
- [6] M. R. Zamanian, E. Sadeh, Z. Amini Sabegh, R. Ehtesham Rasi, "A Multi-Objective Optimization Model for the Resilience and Sustainable Supply Chain: A Case Study," *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 1(7), pp. 51-75, 2020.
- [7] M. Khezeli, E. Najafi, M. Haji Molana, M. Seidi, "A Mathematical Model for Sustainable and Resilient Supply Chain By Considering Synchronization In the Production and Distribution Network," *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, vol. 2(33), pp. 1-33, 2022. <https://doi.org/10.22068/ijiepr.33.2.1>
- [8] M. Biuki, A. Kazemi, A. Alinezhad, "A two-stage stochastic programming model for a perishable products supply chain network design considering resiliency and responsiveness," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 3(13), pp. 153-171, 2021.
- [9] R. Daghighi, M. S. Pishvaei, M. S. Jabalameli, S. Pakseresht, "A possibilistic-stochastic programming approach to resilient natural gas transmission network design problem under disruption: A case study," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 1(14), pp. 137-162, 2022.

- [28] N. Ahmadpoor, S. Ghasimi, K. Chalaki, H. Soltanpanah, "Robust Scenario-Based Modeling for Green-Resilient Supply Chain Considering Backup Supplier and Hub Location-Allocation (Case Study: Automotive Industry)", *Industrial Management Perspective, Ind. Manag. Persp.* 2025, 15(2), 120-157; doi: 10.48308/JIMP.15.2.120.pp. 120-157. In Persian.
- [29] N. Jamshidi, M. Rabbani, M. Deghani Ashkzari, M. Henari, "Identifying and ranking human factors affecting lean supply chain resilience using fuzzy TOPSIS Technique", *Human Capital Empowerment Magazine*, vol. 7, N. 4, 2024, PP. 305-315. In Persian
- Parts Manufacturing Industry in Iran", *Journal of Supply Chain Management*, vol. 27, No. 1, Spring 2025, Serial No. 86, PP. 5-85. In Persian.
- [26] H. Khodadadi Didani, A. Sargolzaei, V. Pourshahabi, "Designing and Validating the Model of Human Resources Development in Order to Realize the Sustainability of the Supply Chain in the Shipping Industry", *Journal of Supply Chain Management*, vol. 26, No. 2, Summer 2024, Serial No. 83. In Persian.
- [27] H. Mollashahi, M. Bagher Fakhrazad, H. Hoseini Nasab, H. Khademi Zare, "Inter-Chain Competition Based on Sustainability and Resilience Indicators in the Problem of Supply Chain Network Design", *Scientific Journal of Supply Chain Management*, vol. 26, No. 1, Spring 2024, Serial No. 82. In Persian.