



Development of a mathematical programming model to redesign the supply chain network with the possibility of changing the usage of facilities

Ali Abdoli*
Hadi Mokhtari**

Extended abstract

Introduction and objectives: Today, due to the competitive environment of the market, cooperation in the form of supply chain networks is necessary for the survival of businesses, and for efficient and effective cooperation between members, there is a need for coherent management of the supply chain. To realize this, there is a need for continuous coordination between supply chain performance on the one hand and market expectations on the other hand. One of the methods of maintaining this coordination is the continuous redesign of the supply chain network over time. In the supply chain network redesign problem, the goal is to improve an existing supply chain, while in the supply chain network design problem, a new supply chain is created from scratch. In real conditions; Often, the problem of redesigning the supply chain is more widely used than the problem of designing the supply chain, while in the literature, the vast majority of researches are focused on designing a supply chain from scratch. One of the decisions of the redesign problem that has been hidden from the attention of researchers is the decision to change the use of supply chain facilities. In other words; Changing the facility layer in the supply chain is considered as a new decision.

Methods: The decision to change the use of facilities in the traditional supply chain problem is challenging, because it changes not only the network flows but also the network structure (topology). Changing the basic structure of the supply chain network is a non-linear problem. In this research, an innovative innovation has been used to face this challenge, by first changing the perspective of the supply chain network from a traditional layered network to a rotating network and then presenting Innovative mathematical modeling based on the innovative perspective of the rotating supply chain network.

Findings: Redesigning the supply chain network with the possibility of changing the usage of facilities due to changes in the network structure is a non-linear problem. In this research, by changing the perspective and creating innovative variables and constraints, a linear mixed integer multi-period programming model has been presented for the problem.

Received: May. 03, 2024; Revised: Jun. 22, 2024; Accepted: Jul. 20, 2024; Published Online: Aug. 10, 2024.

**Master's degree, Department of Master of Business Administration (MBA), Faculty of Financial Sciences, Management and Entrepreneurship, University of Kashan, Kashan, Iran.

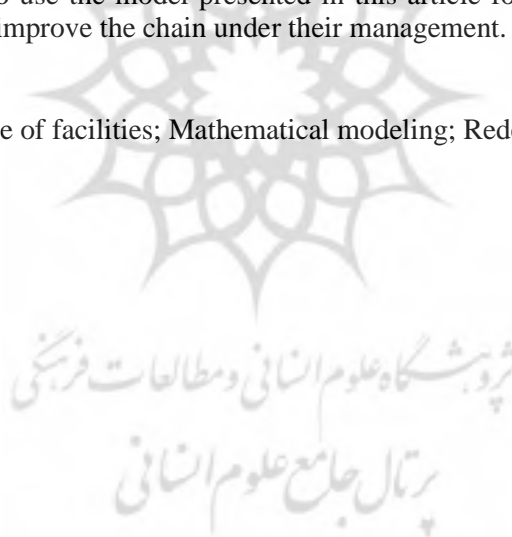
*Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.
Corresponding Author: mokhtari_ie@kashanu.ac.ir



Also, in this model, the transition mode of changing the usage of facilities from one layer to another layer is considered, and achieving this capability is one of the amazing results of using the innovative perspective of the rotating network of the supply chain. This model was solved using an example in GAMS software with the CPLEX method, and MATLAB software has been used to show the results of this model and an innovative view of the supply chain.

Conclusion: In the past, supply chain managers faced with the decision to change the usage of facilities in the supply chain network due to the limitations of the traditional layer view for mathematical modeling and optimal redesign of the network under their management. They have faced a challenge, which now the managers have the possibility to face it with the help of this innovative model and changing the perspective towards the supply chain network. As a management proposal, we can point out the need to use the principles of optimization and supply chain management as a new management approach and paradigm. At the strategic level of the supply chain, due to its wide nature and dimensions, the amount of costs is high and small improvements in it will lead to a significant competitive advantage increase for the supply chain under management. for this reason; Chain managers are advised to use the model presented in this article for chains in which it is possible to change the use of facilities, to improve the chain under their management.

Keywords: Changing the usage of facilities; Mathematical modeling; Redesign; Supply chain management.



How to Cite: Abdoli, Ali; Mokhtari, Hadi (2024). Development of a mathematical programming model to redesign the supply chain network with the possibility of changing the usage of facilities. *Ind. Manag. Persp.*, 14(3), 79-116 (In Persian).



توسعه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات

علی عبدلی*

هادی مختاری**

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: امروزه به دلیل فضای رقابتی بازار، همکاری در قالب شبکه‌های زنجیره تأمین لازمه ادامه حیات کسب‌وکارها است و برای همکاری کارا و اثربخش میان اعضا، مدیریت منسجم زنجیره تأمین مورد نیاز است. تحقق این امر، مستلزم هماهنگی پیوسته بین عملکرد زنجیره تأمین از یکسو و انتظارات بازار در سوی دیگر است. یکی از روش‌های حفظ این هماهنگی، بازطراحی مداوم و پیوسته شبکه زنجیره تأمین در طول زمان است. در مسئله بازطراحی شبکه زنجیره تأمین، هدف بهبود یک زنجیره تأمین موجود است در حالی که در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین، یک زنجیره تأمین جدید از ابتدا ایجاد می‌شود. در شرایط واقعی؛ اغلب، مسئله بازطراحی زنجیره تأمین، پراستفاده‌تر از مسئله طراحی زنجیره تأمین است، حال آنکه اکثر تحقیقات، بر طراحی یک زنجیره تأمین متمرکز شده‌اند. یکی از تصمیمات مسئله بازطراحی که از توجه پژوهشگران پنهان مانده، تصمیم به تغییر کاربری تسهیلات زنجیره تأمین است. به عبارت دیگر، تغییر لایه تسهیلات در زنجیره تأمین به عنوان یک تصمیم جدید لحاظ می‌گردد.

روش‌ها: تصمیم به تغییر کاربری تسهیلات در مسئله سنتی زنجیره تأمین، چالش‌زا است، زیرا نه تنها جریان‌های شبکه بلکه ساختار شبکه (توپولوژی) را نیز تغییر می‌دهد. تغییر ساختار اساسی شبکه زنجیره تأمین یک مسئله غیرخطی است. در این تحقیق، برای رویارویی با این چالش، از یک نوآوری مبتکارانه استفاده شده است، به این صورت که ابتدا تغییر در دیدگاه نسبت به شبکه زنجیره تأمین از شبکه لایه‌ای سنتی به یک شبکه دوار انجام شده و سپس مدل‌سازی ریاضی ابتکاری براساس دیدگاه نوآورانه شبکه دوار زنجیره تأمین ارائه گردیده است.

یافته‌ها: بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات به دلیل تغییرات ساختار شبکه، یک مسئله غیرخطی است. در این پژوهش، با استفاده از تغییر دیدگاه و ایجاد متغیرها و محدودیت‌های ابتکاری، یک مدل برنامه‌ریزی چند دوره‌ای عدد صحیح مختلط خطی برای مسئله ارائه شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰.

*کارشناسی ارشد، گروه مدیریت کسب و کار، دانشکده علوم مالی، مدیریت و کارآفرینی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

**دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

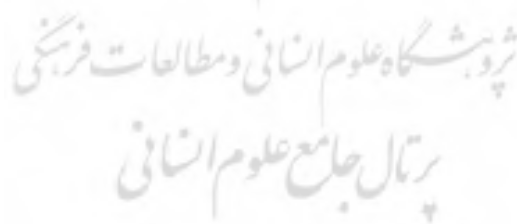


نوع مقاله: پژوهشی

همچنین در این مدل، حالت گذار تغییر کاربری تسهیلات از یک لایه به لایه‌ای دیگر در نظر گرفته شده است که دست‌یابی به این قابلیت از نتایج شگفت‌انگیز استفاده از دیدگاه نوآورانه شبکه دوار زنجیره تأمین است. این مدل، با استفاده از مثالی در نرم‌افزار گمز با روش سیپلکس حل شد و برای نمایش نتایج این مدل و دیدگاه نوآورانه به زنجیره تأمین از نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

نتیجه‌گیری: در گذشته، مدیران شبکه‌های زنجیره تأمین در مواجهه با تصمیم‌گیری برای تغییر کاربری تسهیلات در شبکه زنجیره تأمین با چالش روبه‌رو بوده‌اند. دلیل این چالش‌ها، محدودیت‌های دیدگاه سنتی لایه برای مدل‌سازی ریاضی و بازطراحی بهینه شبکه تحت مدیریت آنها بوده است. اکنون مدیران با کمک این مدل مبتکارانه و تغییر دیدگاه نسبت به شبکه زنجیره تأمین، امکان مواجهه با آن را دارند. به عنوان پیشنهاد مدیریتی می‌توان به لزوم بکارگیری اصول بهینه‌سازی و مدیریت زنجیره تأمین، به عنوان یک رویکرد و پارادایم جدید مدیریتی اشاره کرد. در سطح راهبردی زنجیره تأمین به دلیل ماهیت و ابعاد گسترده‌ای که وجود دارد، میزان هزینه‌ها زیاد بوده و بهبودهای اندک در آن منجر به افزایش مزیت رقابتی قابل توجهی برای زنجیره تأمین تحت مدیریت خواهد شد. به همین دلیل؛ به مدیران زنجیره توصیه می‌شود، برای زنجیره‌هایی که امکان تغییر کاربری تسهیلات در آنها وجود دارد، با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله، جهت بهبود زنجیره تحت مدیریت خود، اقدام کنند.

کلمات کلیدی: مدیریت زنجیره تأمین؛ شبکه زنجیره تأمین؛ بازطراحی؛ تغییر کاربری تسهیلات؛ مدل‌سازی ریاضی.



استناددهی: عبدلی، علی؛ مختاری، هادی (۱۴۰۳). توسعه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور بازطراحی شبکه‌ی زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۳)، ۷۹ – ۱۱۶.



۱. مقدمه

یک زنجیره تأمین شامل تمام فعالیت‌هایی است که به طور مستقیم یا غیرمستقیم در تأمین خواسته مشتری دخیل هستند. زنجیره تأمین نه تنها تولیدکننده و تأمین‌کنندگان را شامل می‌شود، بلکه شامل حمل‌ونقل، انبارها، خرده‌فروشان و حتی خود مشتریان نیز می‌شود [۳۱]. زنجیره‌های تأمین دارای سه جریان کالا یا خدمات، اطلاعات و پول هستند. برای ادامه بقا در بازار رقابتی، تنها بهبود و مدیریت فرایندهای داخلی شرکت‌ها کافی نیست، بلکه شرکت‌ها می‌بایست به صورت هماهنگ و با هدف ارائه بیشترین ارزش به مشتری، فعالیت نمایند [۳۰]. به بیان ساده، اگر شرکتی در مجموعه مدیریت زنجیره تأمین نباشد و به تنهایی فعالیت کند، به دلیل بازار رقابتی، احتمالاً با مشکلاتی روبه‌رو خواهد شد. همانطور که اشاره شد، که هدف زنجیره تأمین نباشد و به تنهایی فعالیت کند، به دلیل بازار رقابتی، احتمالاً با مشکلاتی ارزش به علت رقابت، افزایش می‌یابد. برای مثال، انتظار مشتریان از کاهش قیمت محصول در طول زمان، نمونه‌ای از این دست است. عملکرد مورد انتظار بازار از شبکه زنجیره تأمین یا نیامندی آن به پنج دسته کیفیت، سرعت، قابلیت اعتمادپذیری، قابلیت انعطاف‌پذیری و هزینه تقسیم می‌شود [۲۲].

بازطراحی زنجیره تأمین مانند طراحی آن، شامل تصمیم‌های اساسی و استراتژیک است؛ بنابراین، مسئله بازطراحی زنجیره تأمین، یک مسئله بسیار مهم برای شرکت‌ها به حساب می‌آید، همچنین قسمت بزرگی از سهم موفقیت مدیریت شبکه زنجیره تأمین در بازار به شدت رقابتی جهانی، در گرو این تصمیم‌ها است [۲]. ویژگی خاص مسئله بازطراحی، تصمیمات آن است. در مسئله بازطراحی، یک زنجیره تأمین وجود دارد که در سابق برای اهداف مشخصی به صورت بهینه طراحی شده است، در طول زمان، به دلیل شرایط رقابتی، انتظارات از مدیریت زنجیره تأمین تغییر می‌کند و یا تغییراتی در محیط رخ می‌دهد، پس احتمالاً شبکه زنجیره تأمین از حالت بهینگی خارج می‌شود، پس نیاز به بازطراحی زنجیره تأمین وجود دارد. همچنین خواسته مدیریت زنجیره تأمین در این شرایط، رسیدن به بهینگی جدید با کمترین هزینه در بهترین زمان است. تصمیم‌های بازطراحی بسیار مهم هستند؛ بعضی از تصمیم‌ها در مسئله بازطراحی هزینه زیادی دارند و یا دارای زمان پیاده‌سازی زیادی هستند؛ بر همین اساس، تصمیم‌های مسئله بازطراحی دسته‌بندی می‌شوند. معمولاً تلاش می‌شود تا با اتخاذ تصمیم‌های عملیاتی به اهداف مدیریت شبکه زنجیره تأمین نزدیک شوند؛ ولی اگر تصمیم‌های عملیاتی نتواند اهداف مدیریت زنجیره تأمین را برآورده سازد، به تصمیم‌های سطح بالاتر و استراتژیک نیاز است [۱۵]. به همین دلیل، مدیریت زنجیره تأمین خواستار مدلی برای بازطراحی شبکه زنجیره تأمین است که شامل طیف وسیعی از دسته‌بندی تصمیمات باشد تا بتواند به اهداف خود با کمترین هزینه در بهترین زمان برسد.

می‌توان تصمیم‌های بازطراحی را به چهار دسته ساختار زنجیره، کنترل زنجیره، سیستم اطلاعاتی زنجیره و سیستم حاکمیتی زنجیره دسته‌بندی کرد [۳۳]. دسته‌بندی دیگری که برای تصمیم‌های زنجیره تأمین ارائه شده است، به صورت تصمیم‌های استراتژیک، برنامه‌ریزی، عملیاتی است [۸]. دسته‌بندی دیگری که در کتاب اسلک و لوئیس^۱ (۲۰۱۴) برای تصمیم‌ها پیشنهاد شده است به صورت ظرفیت، شبکه تأمین، تکنولوژی فرایند، توسعه و سازماندهی است [۲۲]. دسته‌بندی پیشنهادی برای تصمیم‌های بازطراحی، بر اساس مدل‌سازی ریاضی مسئله و تحقیق‌های پیشین به صورت مکان‌یابی و تخصیص است [۲۶]. یکی از تصمیم‌هایی که برای مسئله بازطراحی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و تاکنون به آن توجه نشده است؛ تصمیم تغییر کاربری تسهیلات است. البته این تصمیم فقط در شبکه‌های زنجیره تأمینی قابل پیاده‌سازی است که امکان تغییر کاربری وجود داشته باشد. در شکل ۱، تصمیم‌هایی که تاکنون برای مسئله بازطراحی در پژوهش‌های قبلی انجام شده است به همراه تصمیم تغییر کاربری تسهیلات مشاهده می‌شود.



شکل ۱. تصمیم‌های باز طراحی

ادامه پژوهش حاضر بدین ترتیب سازمان یافته است: در بخش دوم، مروری بر پژوهش‌های گذشته در رابطه با مسئله باز طراحی زنجیره تأمین صورت گرفته است و در مورد خلاء تحقیقاتی درباره یکی از تصمیم‌های این مسئله اطلاع‌رسانی شده است. در بخش سوم ابتدا صورت‌بندی مسئله تبیین و سپس برای آن یک مدل‌سازی ریاضی با رویکردی جدید و ابتکارانه ارائه گردیده است. در بخش چهارم برای مدل ارائه شده یک مثال موردی به صورت دقیق حل و تحلیل حساسیت شده است و در نهایت، در بخش پنجم ابتدا خلاصه‌ای از پژوهش صورت گرفته و سپس نتیجه آن و پیشنهادهای برای تحقیقات آتی، ارائه شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

یکی از نخستین پژوهش‌ها در زمینه باز طراحی شبکه زنجیره تأمین توسط هویت^۱ (۱۹۹۴) انجام شده است. در این پژوهش بر لزوم باز طراحی زنجیره تأمین برای افزایش اثربخشی و کارایی تاکید شده است [۱۵]. کومار^۲ و همکاران (۲۰۰۸) پژوهشی در مورد باز طراحی زنجیره تأمین صنعت درمان در سنگاپور انجام داده‌اند. در این پژوهش، زنجیره تأمین برای رویکرد انجام کار به موقع یا به اختصار JIT^۳ باز طراحی شبکه صورت گرفته است. تصمیم‌های باز طراحی در این پژوهش شامل: ادغام تسهیلات و ایجاد تسهیلات جدید و جریان کالا و خدمات بوده است. تعریف مسئله باز طراحی در این مقاله، برای شبیه‌سازی با نرم‌افزار تجاری انجام شده و ادعا شده است در صورت باز طراحی شبکه زنجیره تأمین صنعت درمان سنگاپور، سطح سرویس‌دهی افزایش و هزینه‌ها کاهش خواهد یافت [۲۰]. ناهاراستی^۴ و همکاران (۲۰۰۸) مسئله مدیریت سرمایه و بودجه‌بندی را به مسئله باز طراحی زنجیره تأمین افزوده است. سپس یک مدل عدد صحیح خطی را با روش سیپلکس^۵ بهینه‌سازی کرده است. در این مقاله، با مطالعه موردی صنایع شیمیایی نشان داده شده است که باز طراحی باعث بهبود ۱۴ درصدی سود شبکه زنجیره تأمین می‌شود [۲۸]. وندرورست^۶ و همکاران (۲۰۰۹) زنجیره تأمین مواد غذایی برای نیازمندان را باز طراحی کرده‌اند. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار تجاری آلا دین^۷، زنجیره تأمین شبیه‌سازی شده و سپس به کمک آن، بهینه‌سازی برای باز طراحی شبکه اهداء غذا به نیازمندان با رویکرد پایداری انجام شده است [۳۴]. ناگورنی^۸ (۲۰۱۰) در پژوهش خود برای باز طراحی شبکه زنجیره تأمین و حل مدل ریاضی آن از الگوریتم تعادل و ضرایب لاگرانژ استفاده کرده است که در نوع خود جالب توجه و جدید بوده است. با روش حل این پژوهش می‌توان انواع مختلف سیستم‌ها را بهینه‌سازی کرد و مدل‌سازی و حل آن انعطاف عمل زیادی دارد [۲۷]. کاروالو^۹ و همکاران (۲۰۱۲) برای باز طراحی زنجیره تأمین ساخت خودرو با رویکرد تاب‌آوری در مقابل اختلال از روش شبیه‌سازی شبکه زنجیره تأمین استفاده کرده است. به این صورت که چند باز طراحی انجام شده، سپس با شبیه‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار آرنا بهترین طرح

1. Hewitt
2. Kumar
3. Just in time
4. Naraharisetti
5. CPLEX
6. Van Der Vorst
7. ALADINTM
8. Nagurney
9. Carvalho

در برابر اختلال برای بازرطراحی شبکه زنجیره تأمین ساخت خودرو انتخاب شده است [۷]. لاندین^۱ (۲۰۱۲) زنجیره تأمین پول نقد در سیستم‌های بانکی کشور سوئد و دستگاه‌های خودپرداز را که یک شبکه حلقه بسته است، برای مقابله با ریسک‌های موجود در سیستم پولی بازرطراحی کرده است [۲۴]. ملو^۲ و همکاران (۲۰۱۲) که یکی از پرستادترین مقالات بازرطراحی زنجیره تأمین بوده است، برای مسئله بازرطراحی زنجیره تأمین با برنامه‌ریزی در چند دوره زمانی از الگوریتم جست‌جوی ممنوعه استفاده کرده است. در این مقاله، تصمیم‌های مسئله بازرطراحی شامل بستن تسهیلات، اضافه کردن تسهیلات، جریان کالا بین تسهیلات، ظرفیت تسهیلات، کنترل موجودی و همچنین تخصیص بودجه است [۲۶]. بوداری^۳ و همکاران (۲۰۱۳) برای تصمیم‌گیری ادغام تسهیلات در مسئله بازرطراحی زنجیره تأمین محصولات کشاورزی از مدل مسئله دسته‌بندی خوشه‌ها و بهینه‌سازی گسسته استفاده کرده و برای حل مسئله روش شاخه و حد^۴ را پیشنهاد کردند [۶]. بینگ^۵ و همکاران (۲۰۱۵) برای زنجیره تأمین زباله‌های پلاستیکی در ابعاد جهانی با مد نظر قرار دادن تجارت کربن، یک بازرطراحی با رویکرد پایداری انجام داده‌اند [۵]. در مقاله ژائو^۶ و همکاران (۲۰۱۵) برای حل مدل مسئله بازرطراحی زنجیره تأمین از الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده شده است. تصمیم‌های بازرطراحی در این مقاله شامل بستن تسهیلات، ایجاد تسهیلات، جریان کالا و ظرفیت تسهیلات بوده و همچنین توابع هدف برنامه‌ریزی ریاضی آن شامل حداقل‌سازی هزینه تغییر شبکه، حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی و حداکثر کردن سطح سرویس بوده است. یکی از نکات جالب این پژوهش، توجه ویژه به هزینه‌های بازرطراحی و تغییر شکل شبکه زنجیره تأمین است [۳۷].

پژوهش خاتمی و همکاران (۲۰۱۵) که یکی از طولانی‌ترین پژوهش‌های اخیر در موضوع بازرطراحی زنجیره تأمین است، برای شبکه حلقه بسته چند کالایی و چند دوره‌ای با عدم قطعیت در تقاضا و بازگشت کالا در مسئله بازرطراحی زنجیره تأمین تعریف شده است. تصمیم‌های بازرطراحی شامل ایجاد تسهیلات جدید، بستن تسهیلات، تعیین ظرفیت تسهیلات، میزان جریان کالا بین تسهیلات و تعیین سطح موجودی است. این پژوهش برای بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی مسئله بازرطراحی از مدل ریاضی تصادفی عدد صحیح مختلط و برای حل آن از روش تجزیه بندرز^۷ استفاده شده است [۱۸]. خسروی (۱۳۹۶)، شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته و پویا را بازرطراحی کرده است. این پژوهش تصمیم‌گیری در مورد قیمت را به مسئله بازرطراحی وارد کرده و باعث توسعه برنامه‌ریزی مسائل بازرطراحی زنجیره تأمین شده است. همچنین برای حل مسئله از دو روش سیپلکس و تجزیه بندرز شتاب‌یافته استفاده و نشان داده شده است که روش حل تجزیه بندرز برای مدل مقیاس بزرگ این مسئله مناسب است و پیشنهاد می‌شود [۱۹].

عاقلان (۱۳۹۶)، بازرطراحی شبکه زنجیره تأمین را برای بهبود و ایجاد قابلیت تاب‌آوری انجام داده است. در این پژوهش، تصمیم تشکیل اتحادیه که یک نوع تصمیم ادغام است و تصمیم ایجاد زیرتسهیلات که همان ایجاد تسهیل جدید است به تصمیمات مسئله بازرطراحی اضافه شده است و تأثیر آن در بهبود، ارزیابی شده است. برای مدل‌سازی ریاضی مسئله، از بهینه‌سازی تصادفی عدد صحیح مختلط-سناریو محور استفاده شده است [۳]. فیتو^۸ و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود یک زنجیره تأمین معکوس بازیافت پلاستیک را با هدف پایداری در شرایط عدم قطعیت بازرطراحی کرده‌اند. آن‌ها برای این مسئله، یک برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح مختلط غیرخطی ارائه کرده‌اند. همچنین برای تأثیر شرایط محیط‌زیستی در این مسئله از شاخص اکو نود و نه^۹ استفاده شده است [۱۲]. اتابکی (۱۳۹۷)، بازرطراحی زنجیره تأمین را با هدف اضافه کردن زنجیره تأمین معکوس به زنجیره تأمین مستقیم کالاهای بادوام و تشکیل زنجیره تأمین واحد انجام داده است. در این پژوهش، عدم قطعیت پارامترها لحاظ شده و برای مسئله از بهینه‌سازی استوار استفاده شده است [۴]. جهانی و همکاران (۲۰۱۸)، بازرطراحی زنجیره تأمین سیمان در استرالیا را برای تغییر محصول با در نظر گرفتن کیفیت محصول و همچنین عدم قطعیت در تقاضا

1. Lundin
2. Melo
3. Boudahri
4. Branch and bound
5. Bing
6. Zhou
7. Benders decomposition
8. Feito
9. Eco-indicator 99

و قیمت انجام داده‌اند. در این پژوهش، یک مدل عدد صحیح مختلط غیرخطی برای مسئله ارائه شده و با روش حرکت هندسی براونی^۱ و سیپلکس حل شده است [۱۶].

فتحی و همکاران (۲۰۱۸) یک مسئله بازطراحی زنجیره تأمین با چند محصول و دارای عدم قطعیت در تقاضا و همچنین قیمت را به صورت پویا با چند دوره زمانی تعریف کرده‌اند. برای برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی این مسئله یک برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح مختلط چندسطحی و سناریو محور ارائه شده است و با روش تجزیه بندرز حل شده است [۱۰]. عبدی‌نژاد (۱۳۹۸)، مسئله بازطراحی شبکه زنجیره تأمین را با روند توسعه محصول ترکیب کرده و همچنین عدم قطعیت را در پارامترهای تقاضا، زمان جایگزینی و دوره عمر لحاظ کرده است. برای این مسئله، یک مدل بهینه‌سازی استوار سناریو محور ارائه شده و با نرم‌افزار تجاری گمز حل شده است. همچنین در این پژوهش، یک مطالعه موردی برای لوازم مصرفی دیجیتال انجام شده است [۱]. کارگر (۱۳۹۸)، برای زنجیره تأمین معکوس در شرایط عدم قطعیت، بازطراحی شبکه زنجیره تأمین را با هدف حداکثر ساختن سود، حداکثر کردن سطح سرویس و همچنین حداقل کردن اثرات زیست‌محیطی انجام داده است. برای این پژوهش، یک برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح مختلط-سناریو محور-چند هدفه ارائه شده است و برای حل آن روش الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب استفاده شده است [۱۷]. مارتینز^۲ و همکاران (۲۰۱۹) برای زنجیره تأمین غذای خیریه کشور پرتغال با رویکرد پایداری، یک بازطراحی ارائه داده است. زنجیره تأمین این مقاله چند محصولی و برنامه‌ریزی آن پویا و چند دوره‌ای است. تصمیم‌های مسئله شامل؛ حذف تسهیلات، ایجاد تسهیلات، ظرفیت تسهیلات، جریان مالی، جریان کالا و بودجه است. مدل ریاضی این مقاله دارای سه تابع هدف هزینه، زیست‌محیطی و سطح سرویس‌دهی اجتماعی است. برای حل این مدل از روش لکسیکوگرافیک^۳ برای ترکیب اهداف و روش سیپلکس استفاده شده است [۲۵]. مقاله گائو و کائو^۴ (۲۰۲۰) برای زنجیره تأمین معکوس یک روش بهینه‌سازی چند هدفه تصادفی عدد صحیح مختلط سناریو محور با رویکرد پایداری و در نظر گرفتن بازسازی تأسیسات ارائه داده است. مدل ریاضی مسئله این مقاله تصادفی عدد صحیح مختلط غیرخطی-سناریو محور است. برای حل آن، ابتدا مسئله خطی شده و سپس با روش اسپیلون محدود به صورت چند هدفه، بهینه‌سازی انجام شده است [۱۳]. والی‌سیر و روغنیان (۲۰۲۰)، برای مواجهه با ریسک‌های عملیاتی و اختلال یک بازطراحی ترکیبی و رویکرد استواری برای شبکه زنجیره تأمین ارائه کرده‌اند. مدل مسئله ترکیب بهینه‌سازی تصادفی و بهینه‌سازی استوار سناریو محور است. تصمیم‌های بازطراحی این مسئله شامل تصمیمات متعارف در مسائل بازطراحی یعنی بستن تسهیلات، ایجاد تسهیلات، ظرفیت تسهیلات و جریان کالا است. برای حل مدل، ابتدا از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده و سپس با نرم‌افزار گمز حل شده است. همچنین به منظور سنجش اعتبار و کارایی آن، یک مطالعه موردی در صنعت تایر انجام شده است [۳۲]. فیتو^۵ و همکاران (۲۰۲۱) برای زنجیره تأمین بازیافت پلاستیک با رویکرد پایداری، یک بازطراحی ارائه کرده‌اند و یک مسئله ترکیبی از بهینه‌سازی تصادفی و بهینه‌سازی فازی چند هدفه و سناریو محور و دارای متغیر فازی تعریف کرده‌اند. برای حل مسئله نیز از بهینه‌سازی دو مرحله‌ای و ترکیبی استفاده کرده‌اند [۱۱]. یوسفی و همکاران (۲۰۲۲) مطالعه‌ای در سطح راهبردی یک زنجیره تأمین انجام داده‌اند. در این تحقیق برای مواجهه با عدم قطعیت و اختلال در سیستم یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی ارائه شده که با انجام یک روش خطی‌سازی به صورت خطی تبدیل شده و سپس با روش آزادسازی لاگرانژ حل شده است [۳۵].

کونگ والسونگ^۶ و همکاران (۲۰۲۲) برای زنجیره تأمین چهار سطحی با دو هدف حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی ریسک، یک مدل بازطراحی زنجیره تأمین در سطح جهان ارائه نموده‌اند. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو معیاره توسعه داده شده است [۲۱]. در پژوهش هانزار^۷ و رنجبر (۲۰۲۲) برای زنجیره تأمین سه سطحی یک مدل بازطراحی زنجیره تأمین دو معیاره برای حداقل‌سازی هزینه‌های مالی و هزینه‌های زیست محیطی ارائه داده شده است [۱۴]. لویز^۸ و همکاران (۲۰۲۳) برای زنجیره

1. Geometric Brownian motion
2. Martins
3. Lexicographic
4. Gao and Cao
5. Feito
6. Kungwalsong
7. Hanczar
8. Lopez

تأمین دو لایه‌ای سویا در برزیل یک بازطراحی زنجیره تأمین با تمرکز روی تصمیم روش‌های حمل‌ونقل با مدل‌سازی عدد صحیح مختلط خطی ارائه داده‌اند [۲۳]. نیکیان و همکاران (۲۰۲۳) نیز در یک پژوهش مفصل برای زنجیره تأمین حلقه بسته آهن، با رویکرد پایدار و تاب‌آور، یک مدل ریاضی در شرایط عدم قطعیت و وجود اختلال‌های تحریم و همه‌گیری کرونا، توسعه داده‌اند. در این پژوهش، برای حل مدل ارائه شده، از دو روش معیار جامع^۱ و اپسیلون محدود^۲ استفاده شده است [۲۹]. یوسفی و همکاران (۲۰۲۳) برای زنجیره تأمین گندم-آرد با هدف پایداری و رویارویی با اختلال، یک مدل ریاضی به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی با چهار هدف اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و فنی با روش برنامه‌ریزی مقاوم توسعه داده‌اند [۳۶].

جدول ۱ برای مرور در یک نگاه پژوهش‌های مسئله بازطراحی زنجیره تأمین تهیه شده است. با جست‌جو در این پژوهش‌ها مشخص شد که به تصمیم تغییر کاربری تسهیلات در مسئله بازطراحی توجه نشده است. تغییر کاربری تسهیلات در زنجیره تأمین باعث تغییر در پیکربندی و ساختار شبکه می‌شود که مواجهه با آن به دلیل ماهیت غیرخطی، با روش‌های سنتی مدل‌سازی لایه‌ای زنجیره تأمین، به صورت عمومی، امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، نیاز به روشی نوآورانه و مبتکرانه برای مدل‌سازی این مسئله وجود دارد.

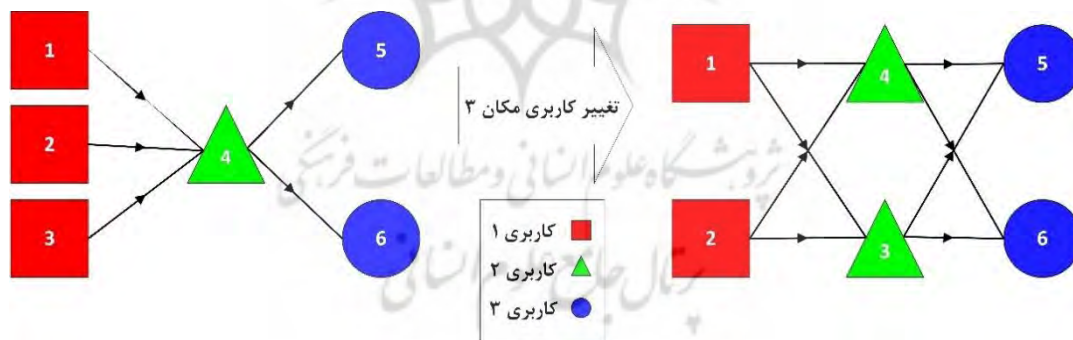
جدول ۱. مقایسه پژوهش حاضر با پژوهش‌های مرتبط

تصمیم‌های مسئله بازطراحی					پژوهش					
تخصیص			مکان‌یابی							
قیمت	بوجه	روش حمل‌ونقل	موجودی	خریان کالا	ظرفیت	ادغام تسهیلات	بستن تسهیلات	ایجاد تسهیلات	تغییر کاربری	
				•		•		•		کومار و همکاران (۲۰۰۸) [۲۰]
				•	•		•	•		ناراهاراستی (۲۰۰۸) [۲۸]
		•		•	•					وندروورست و همکاران (۲۰۰۹) [۳۴]
				•	•					ناگورنی (۲۰۱۰) [۲۷]
			•	•	•			•		کاروالو و همکاران (۲۰۱۲) [۷]
				•	•					لاندین (۲۰۱۲) [۲۴]
	•		•	•	•		•	•		ملو و همکاران (۲۰۱۲) [۲۶]
				•	•		•	•		بوداری و همکاران (۲۰۱۳) [۶]
				•			•			بینگ و همکاران (۲۰۱۵) [۵]
				•	•		•	•		ژائو و همکاران (۲۰۱۵) [۳۷]
			•	•	•		•	•		خاتمی و همکاران (۲۰۱۵) [۱۸]
•			•	•	•		•	•		خسروی (۱۳۹۶) [۱۹]
				•	•	•	•	•		عاقلان (۱۳۹۶) [۳]
				•			•	•		فیتو و همکاران (۲۰۱۷) [۱۲]
	•	•		•	•		•	•		اتابکی (۱۳۹۷) [۴]
				•	•			•		جهانی و همکاران (۲۰۱۸) [۱۶]
•			•	•	•		•	•		فتحی و همکاران (۲۰۱۸) [۱۰]
			•	•	•		•	•		عبدی‌نژاد (۱۳۹۸) [۱]

1. LP-metric
2. ϵ -constraint

تصمیم‌های مسئله بازطراحی		پژوهش
•	•	کارگر (۱۳۹۸) [۱۷]
•	•	مارتینز و همکاران (۲۰۱۹) [۲۵]
•	•	گائو و کائو (۲۰۲۰) [۱۳]
•	•	والی‌سیر و روغبیان (۲۰۲۰) [۳۲]
•	•	فیتو و همکاران (۲۰۲۱) [۱۱]
•	•	یوسفی و همکاران (۲۰۲۲) [۳۵]
•	•	کونگ والسونگ و همکاران (۲۰۲۲) [۲۱]
•	•	هانزار و رنجبر (۲۰۲۲) [۱۴]
•	•	لوپز و همکاران (۲۰۲۳) [۲۳]
•	•	نیکیان و همکاران (۲۰۲۳) [۲۹]
•	•	یوسفی و همکاران (۲۰۲۳) [۳۶]
•	•	پژوهش حاضر

شکل ۲ یک مدل انتزاعی و فرضی از یک شبکه زنجیره تأمین سنتی است. در این شبکه، امکان تغییر کاربری یکی از کاربری‌ها وجود دارد، به صورت شهودی می‌توان حدس زد که با تغییر کاربری، یک شبکه زنجیره تأمین با اطمینان بیشتر حاصل خواهد شد؛ چرا که در شبکه فعلی، تنها یک تسهیل در کاربری ۲ موجود است که در صورت بروز اختلال در آن، کل زنجیره مختل خواهد شد. بررسی و مدل‌سازی زنجیره‌های تأمینی که امکان تغییر کاربری تسهیلات در آن‌ها وجود دارد با در نظر گرفتن حالت گذار، به دلیل تغییرات اساسی در ساختار شبکه و پیکربندی با روش‌های سنتی، به صورت عمومی، پ امکان‌پذیر نیست. پس برای رویارویی با آن، نیاز به مدل‌سازی مبتکرانه است.



شکل ۲. نمایش تغییر پیکربندی شبکه با تغییر کاربری

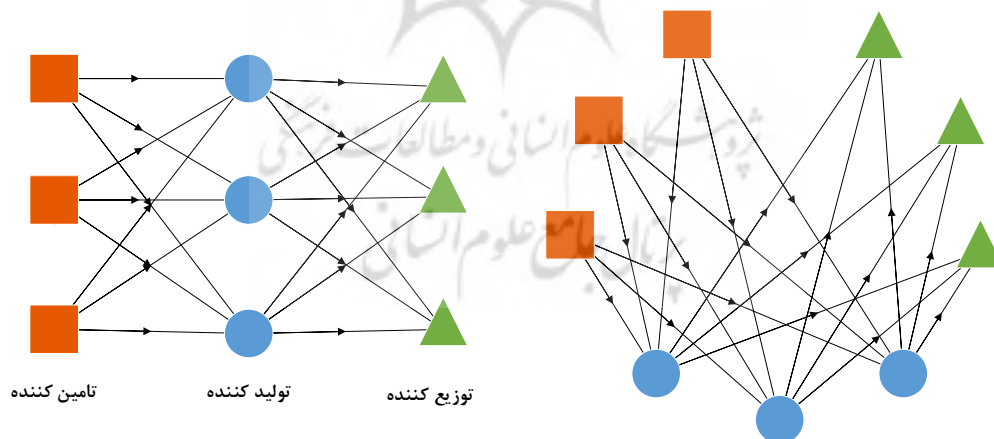
۳. روش‌شناسی پژوهش

توصیف مسئله. در بخش قبل، شرح مختصری از پیشینه پژوهش‌های مسئله بازطراحی شبکه زنجیره تأمین آورده شد. همچنین در آن بخش اشاره شد که تصمیم تغییر کاربری تسهیلات در مسئله بازطراحی از توجه پژوهشگران پنهان مانده است. به همین دلیل، برای شبکه‌های زنجیره تأمینی که اکنون در حال بهره‌برداری هستند و امکان تغییر کاربری در بعضی از تسهیلات را دارند، برای بازطراحی، نیاز به یک مدل‌سازی جدید است. که با روش سنتی مدل‌سازی سنتی لایه‌ای قابل مدل‌سازی نیست. پس مسئله اصلی این پژوهش، چگونگی مدل‌سازی ریاضی بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات است.

مفروضات مسئله.

- شبکه زنجیره تأمین مسئله از قبل موجود و در حال بهره‌برداری است.
- تعداد لایه‌های زنجیره تأمین مسئله محدودیت ندارد و لایه‌ها با عنوان کاربری‌ها شناخته می‌شوند.
- مسئله به صورت چند دوره‌ی زمانی است.
- جریان شبکه زنجیره تأمین مستقیم است.
- هدف، حداقل‌سازی هزینه‌ی کل است.
- امکان تغییر کاربری یا به‌عبارتی، تغییر لایه در بعضی از تسهیلات وجود دارد.
- امکان بهره‌برداری بالقوه هر یک تسهیلات در کاربری‌ها مشخص است.
- ظرفیت بهره‌برداری بالقوه هر یک تسهیلات در کاربری‌ها مشخص است.
- هزینه و ظرفیت جریان کالا بین تسهیلات مشخص و وابسته به وضعیت بهره‌برداری بالفعل تسهیلات است.
- هزینه و ظرفیت انبار، تولید و تحویل (فروش) کالا در تسهیلات مشخص و وابسته به وضعیت بهره‌برداری بالفعل تسهیلات است.
- زمان و هزینه بازگشایی و بستن تسهیلات مشخص است.
- تقاضای زنجیره تأمین به صورت کلی و مقدار آن در هر دوره‌ی زمانی مشخص است.
- در صورت عدم تحویل (فروش) کالا مورد تقاضا، کمبود به‌وجود می‌آید و هزینه هر واحد آن مشخص است.

رویکرد مدور به مسئله بازطراحی. مسئله بازطراحی زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات دارای چالش اصلی جابه‌جایی تسهیلات از یک لایه زنجیره تأمین به یک لایه دیگر است. برای مواجه با این چالش می‌توان نحوه دید به زنجیره تأمین از حالت گراف لایه‌ای به حالت گراف جهت‌دار تغییر کند که در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است. توجه شود که دو شبکه نشان داده شده در شکل ۳، یکریخت^۱ هستند. لازم است به نکته توجه شود که رویکرد شبکه‌ی دوار و مدل‌سازی آن به صورت ابتکاری ارائه شده است و ممکن است پژوهشگر دیگری با یک رویکرد جدید و متفاوت، مسئله را با تعداد متغیر و محدودیت‌های کمتر یا بیشتری مدل‌سازی کند.



شکل ۳. دو نحوه دید به شبکه زنجیره تأمین، شکل راست گراف جدید مدور جهت‌دار، شکل چپ گراف سنتی لایه‌ای

همانطوری که اشاره شد که برای در نظر گرفتن امکان تغییر کاربری تسهیلات، باید نحوه دید به شبکه زنجیره تأمین به جای روش سنتی لایه‌ای به صورت گراف جهت‌دار باشد. با در نظر گرفتن این نکته هر گره در این گراف جدید نماینده مکان تسهیلات است و همچنین

هر گره دارای دو مشخصه وضعیت کاربری فعلی تسهیلات و وضعیت بالقوه‌ی امکان بهره‌برداری در کاربردهای دیگر است. همچنین در این مدل، حالت گذرای بستن و بازگشایی تسهیلات برای کاربری‌های متفاوت در نظر گرفته شده است. امکان تغییر کاربری تسهیلات و در نظر گرفتن حالت گذرای تغییرات ساختار شبکه زنجیره تأمین هدف این بخش از مدل‌سازی است که در ادامه به توضیح و تشریح آن پرداخته شده است.

مدل‌سازی.

تعریف نمادها (اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها).

در جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ به ترتیب مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در مدل بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات، آورده شده است.

جدول ۲. مجموعه‌ها و اندیس‌های مدل بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات

i	مجموعه تمام تسهیلات $i \in \{1, 2, \dots, L\}$
u	مجموعه کاربری تسهیلات $u \in \{1, 2, \dots, U\}$
t	مجموعه دوره زمانی $t \in \{1, 2, \dots, T\}$

جدول ۳. پارامترهای مدل بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات

$UAM_{u,u'}$	ماتریس مجاورت گراف جهت‌دار کاربری؛ در صورت مجاورت دو کاربری u و u' ؛ مقدار یک برای مجاورت جهت‌دار (امکان انتقال کالا بین دو کاربری) و مقدار صفر در صورت عدم مجاورت جهت‌دار
$Tcost_{i,i'}^t$	هزینه‌ی حمل‌ونقل هر واحد کالا بین دو مکان i و i' در زمان t
$Tcap_{i,i'}^t$	ظرفیت حمل‌ونقل بین دو مکان i و i' در زمان t
$Pcost_{i,u}^t$	هزینه تولید هر واحد کالا در مکان i برای کاربری u در زمان t
$Pcap_{i,u}^t$	ظرفیت تولید در مکان i برای کاربری u در زمان t
$Icost_{i,u}^t$	هزینه انبار هر واحد کالا در مکان i برای کاربری u در زمان t
$Icap_{i,u}^t$	ظرفیت انبار در مکان i برای کاربری u در زمان t
$IMSM_{i,u}$	وضعیت کاربری u در مکان i در ابتدای اولین دوره زمانی (در زمان $t=0$)؛ مقدار یک در صورت بهره‌برداری مکان i با کاربری u و صفر در صورت عدم امکان بهره‌برداری
$Ocost_{i,u}$	هزینه راه‌اندازی تسهیل با کاربری u در مکان i
$Otime_{i,u}$	معکوس تعداد دوره‌ی زمانی موردنیاز برای احداث کاربری u در مکان i (برای مثال اگر تسهیلی در چهار دوره‌ی زمانی احداث می‌شود، مقدار این پارامتر یک چهارم است)
$Ccost_{i,u}$	هزینه جمع‌آوری تسهیل با کاربری u در مکان i
$Ctime_{i,u}$	معکوس تعداد دوره‌ی زمانی موردنیاز برای جمع‌آوری تسهیل با کاربری u در مکان i
$Scap_{i,u}^t$	ظرفیت فروش (تحویل) کالا در تسهیل با کاربری u در مکان i در زمان t
$Demand^t$	مقدار تقاضا در زمان t
$Lcost^t$	هزینه کمبود در زمان t
$IAU_{i,u}$	وضعیت بالقوه امکان بهره‌برداری از مکان i برای کاربری u ؛ مقدار یک در صورت امکان بهره‌برداری و مقدار صفر در صورت عدم امکان

جدول ۴. متغیرهای مدل بازرطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات

$MS_{i,u}^t$	وضعیت کاربری ll در مکان i در زمان t : یک در صورت بهره‌برداری و صفر در صورت عدم بهره‌برداری (متغیر وابسته)
CS_i^t	وضعیت خالی بودن مکان i در زمان t از هر نوع کاربری؛ برای مکان تهی از کاربری مقدار یک و در غیر این صورت صفر (متغیر وابسته)
$TS_{i,u}^t$	وجود وضعیت گذرا در مکان i برای کاربری u در زمان t (متغیر وابسته)
$LA_{i,u,i',u'}^t$	وضعیت مجاورت کاربری ll در مکان i و کاربری u' در مکان i' در زمان t (متغیر وابسته)
$LA2_{i,i'}^t$	وضعیت گراف جهت‌دار مجاورت دو مکان i و i' در زمان t (مقدار یک در صورت جریان جهت‌دار کالا و مقدار صفر در غیر این صورت) (متغیر وابسته)
$OP_{i,u}^t$	برنامه بازگشایی برای کاربری ll در مکان i در زمان t (متغیر مستقل)
$CP_{i,u}^t$	برنامه بستن برای کاربری ll در مکان i در زمان t (متغیر مستقل)
$XT_{i,i'}^t$	مقدار انتقال کالا بین دو مکان i و i' در زمان t (متغیر مستقل)
$XP_{i,u}^t$	مقدار تولید کالا در مکان i در کاربری ll در زمان t (متغیر مستقل)
$XI_{i,u}^t$	مقدار ذخیره در انبار در مکان i در کاربری ll در زمان t (متغیر مستقل)
$XS_{i,u}^t$	مقدار فروش (تحویل) کالا در مکان i در کاربری ll در زمان t (متغیر مستقل)
XL^t	مقدار کمبود در زمان t (متغیر وابسته)
$PP_{i,u}^t$	میزان تکمیل برنامه احداث برای کاربری ll در مکان i در زمان t (متغیر اعشاری بین صفر و یک) (متغیر وابسته)

وضعیت کاربری
وضعیت خالی بودن مکان
وجود وضعیت گذرا
وضعیت مجاورت کاربری
وضعیت گراف جهت‌دار
برنامه بازگشایی
برنامه بستن
مقدار انتقال کالا
مقدار تولید کالا
مقدار ذخیره در انبار
مقدار فروش (تحویل)
مقدار کمبود
میزان تکمیل برنامه احداث

تابع هدف مدل بازرطراحی.

در این مدل، تابع هدف به صورت حداقل‌سازی هزینه کل محاسبه می‌شود. هزینه کل به ترتیب از بالا به پایین، شامل مجموع هزینه‌های انتقال، تولید، انبار، کمبود، بازکردن تسهیل و بستن تسهیل است که به صورت ریاضی در معادله (۱) آورده شده است.

$$\begin{aligned}
 \min Z = & \sum_{i \in T} \sum_{i \in L} \sum_{j \in L \setminus \{i\}} T \text{Cos } t_{i,j}^t \times XT_{i,j}^t \\
 & + \sum_{i \in T} \sum_{i \in L} \sum_{u \in U} P \text{Cost}_{i,u}^t \times XP_{i,u}^t \\
 & + \sum_{i \in T} \sum_{i \in L} \sum_{u \in U} I \text{Cost}_{i,u}^t \times XI_{i,u}^t \\
 & + \sum_{i \in T} L \text{cost}^t \times XL^t \\
 & + \sum_{i \in T} \sum_{i \in L} \sum_{u \in U} O \text{cost}_{i,u} \times OP_{i,u}^t \\
 & + \sum_{i \in T} \sum_{i \in L} \sum_{u \in U} C \text{cost}_{i,u} \times CP_{i,u}^t
 \end{aligned} \tag{1}$$

محدودیت‌های مدل بازرطراحی.

معادله‌ی (۲) برای مقداردهی اولیه متغیر پیشرفت $PP_{i,u}^1$ با استفاده از پارامتر وضعیت اولیه‌ی کاربری $IMSM_{i,u}$ تدوین شده است.

$$PP_{i,u}^1 = IMSM_{i,u} \quad \forall i \in L, u \in U \tag{2}$$

برای تنظیم متغیر وابسته وضعیت مجاورت جهت‌دار گراف با نماد $LA_{i,u,i',u'}$ از گزاره شرطی زیر استفاده می‌شود.
 "اگر و فقط اگر مکان L دارای کاربری U باشد و اگر کاربری U امکان انتقال کالا به کاربری U' را داشته باشد و اگر مکان L' دارای کاربری U' باشد، آنگاه مکان L امکان انتقال کالا به مکان L' را دارد".

گزاره شرطی بالا، با استفاده از حساب گزاره‌ای ریاضی به صورت گزاره معادله‌ی (۳) نوشته شده است.

$$MS_{(L,U)}, UAM_{(U,U')}, MS_{(L',U')} \Leftrightarrow LA_{(L,U,U',L')} \quad (3)$$

با انجام ساده‌سازی گزاره (۳) گزاره (۴) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} MS_{(L,U)} = p, \quad UAM_{(U,U')} = q, \quad MS_{(L',U')} = r, \quad LA_{(L,U,U',L')} = s \\ [p, q, r \Rightarrow s] \wedge [s \Rightarrow p, q, r] \\ [\neg(p \wedge q \wedge r) \vee s] \wedge [\neg s \vee (p \wedge q \wedge r)] \\ [(\neg p \vee \neg q \vee \neg r) \vee s] \wedge [(\neg s \vee p) \wedge (\neg s \vee q) \wedge (\neg s \vee r)] \end{aligned} \quad (4)$$

بازنویسی سطر آخر گزاره (۴) به صورت نامعادله ریاضی، نامعادله‌های (۵) تا (۸) را نتیجه می‌دهد.

$$(\neg p \vee \neg q \vee \neg r) \vee s \rightarrow (1 - MS_{(L,U)}) + (1 - UAM_{(U,U')}) + (1 - MS_{(L',U')}) + LA_{(L,U,U',L')} \geq 1 \quad (5)$$

$$(\neg s \vee p) \rightarrow (1 - LA_{(L,U,U',L')}) + MS_{(L,U)} \geq 1 \quad (6)$$

$$(\neg s \vee q) \rightarrow (1 - LA_{(L,U,U',L')}) + UAM_{(U,U')} \geq 1 \quad (7)$$

$$(\neg s \vee r) \rightarrow (1 - LA_{(L,U,U',L')}) + MS_{(L',U')} \geq 1 \quad (8)$$

با تنظیم نامعادله‌ها (۵) تا (۸) و انجام ساده‌سازی محدودیت‌های (۹) تا (۱۲) به صورت جدا شده برای مقداردهی گراف مجاورت جهت‌دار

مکان‌ها با نماد $LA_{i,u,i',u'}$ به دست می‌آید.

$$MS_{i,u}^t + UAM_{u,u'} + MS_{i',u'}^t \leq LA_{i,u,i',u'}^t + 2 \quad \forall i, i' \in L, u, u' \in U, t \in T \quad (9)$$

$$LA_{i,u,i',u'}^t \leq MS_{i,u}^t \quad \forall i, i' \in L, u, u' \in U, t \in T \quad (10)$$

$$LA_{i,u,i',u'}^t \leq UAM_{u,u'} \quad \forall i, i' \in L, u, u' \in U, t \in T \quad (11)$$

$$LA_{i,u,i',u'}^t \leq MS_{i',u'}^t \quad \forall i, i' \in L, u, u' \in U, t \in T \quad (12)$$

برای ساده‌سازی بیشتر و کاهش اندیس‌ها در مابقی محدودیت‌ها، باتوجه به اینکه در هر مکان حداکثر یک کاربری وجود دارد، یک

متغیر وابسته دیگر با نماد $LA2_{i,i'}^t$ ساخته شده است. این متغیر نشان‌دهنده وجود یال در گراف مکان‌ها یا به عبارت دیگر، نشان‌دهنده امکان انتقال کالا بین دو مکان است.

$$LA2_{i,i'}^t = \sum_{u, u' \in U} LA_{i,u,i',u'}^t \quad \forall i, i' \in L, t \in T \quad (13)$$

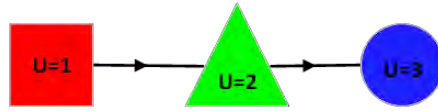
مثال ۱. در شکل ۴ یک گراف جهت‌دار برای سه کاربری فرضی مشاهده می‌شود، در این شبکه، جهت جریان کالا از کاربری شماره

۱ (تولید کننده) به کاربری ۲ (عمده فروش) و همچنین از کاربری ۲ (عمده فروش) به کاربری ۳ (خرده فروش) است، ماتریس مجاورت

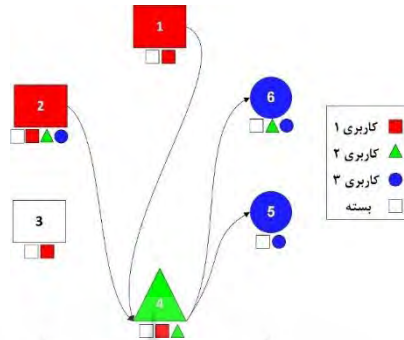
گراف کاربری با نماد $UAM_{u,u'}$ ، متناظر با این شکل به صورت زیر است. برای مثال مقدار عدد یک در سطر اول و ستون دوم این ماتریس

نشان‌دهنده جریان کالا از کاربری شماره ۱ به کاربری شماره ۲ است.

$$[UAM_{u,u'}]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$



شکل ۴: نمایش گراف کاربری برای مثال ۱



شکل ۵: شبکه زنجیره تأمین مثال ۱

در شکل ۵ یک شبکه زنجیره تأمین فرضی با شش مکان و با گراف کاربری شکل ۴ مشاهده می‌شود. در این شبکه، مکان‌های شماره ۱ و ۲ عضو کاربری $U=1$ ، مکان شماره ۳ بدون کاربری و بسته، مکان شماره ۴ عضو گروه کاربری $U=2$ و در آخر مکان‌های شماره ۵ و ۶ عضو کاربری $U=3$ است. متناظر با این شکل، متغیر وضعیت عضویت با نماد $MS_{i,i}^t$ به صورت زیر است. برای مثال، مقدار عددی یک در سطر چهارم و ستون دوم، نشان‌دهنده عضویت مکان شماره ۴ در گروه کاربری شماره ۲ است. در شکل ۵، اشکال کوچک در پایین نماد مکان‌ها، نماد امکان بهره‌برداری بالقوه از آن مکان است.

$$[MS_{i,u}]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$$

با اعمال نامعادله‌های (۹) تا (۱۳) به این مثال، متغیر وضعیت مجاورت مکان i با مکان i' با نماد $LA2_{i,i'}$ که متناظر با یال‌های جهت‌دار شبکه شکل ۵ است به صورت زیر بدست می‌آید. برای مثال؛ عدد یک در سطر اول و ستون چهارم در ماتریس زیر به معنی وجود یال جهت‌دار از مکان شماره ۱ به مکان شماره ۴ است.

$$[LA2_{i,i'}]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

پایان مثال ۱ ■

نامعادله‌ی (۱۴) تضمین‌کننده محدودیت ظرفیت و امکان حمل‌ونقل است. به‌صورت خلاصه، مقدار کالای منتقل شده بین دو مکان باید از ظرفیت انتقال کالا در آن مسیر کمتر باشد، همچنین انتقال کالا فقط در مسیرهایی خاص، براساس کاربری مکان‌های ابتدا و انتهای مسیر، مجاز است. با ضرب متغیر $LA2_{i,i'}^t$ (که امکان انتقال کالا بین دو مکان در هر زمان را نشان می‌دهد) در پارامتر ظرفیت انتقال کالا بین هر دو مکان $Tcap_{i,i'}$ ، حد بالای مقدار کالای حمل شده بین دو مکان محاسبه می‌شود.

$$XT_{i,i'}^t \leq Tcap_{i,i'} \times LA2_{i,i'}^t \quad \forall i, i' \in L, t \in T \quad (14)$$

نامعادله (۱۵) برای محدودیت ظرفیت و امکان تولید است. در این محدودیت، حد بالای متغیر تولید، محدود به ظرفیت تولید با پارامتر $Pcap_{i,u}$ و همچنین امکان تولید براساس کاربری متغیر $MS_{i,u}^t$ می‌شود. با توجه به این نکته که متغیر $MS_{i,u}^t$ وضعیت کاربری u در مکان i در زمان t را نشان می‌دهد.

$$XP_{i,u}^t \leq Pcap_{i,u} \times MS_{i,u}^t \quad \forall i \in L, u \in U, t \in T \quad (15)$$

نامعادله (۱۶) برای محدودیت ظرفیت و امکان فروش است. در این محدودیت، حد بالای متغیر فروش (به تعبیری دیگر خروج کالا از زنجیره تأمین) محدود به ظرفیت فروش با پارامتر $Scap_{i,u}$ و همچنین امکان آن براساس متغیر وضعیت کاربری با نماد $MS_{i,u}^t$ می‌شود. با توجه به این نکته که متغیر $MS_{i,u}^t$ وضعیت کاربری u در مکان i در زمان t را نشان می‌دهد.

$$XS_{i,u}^t \leq Scap_{i,u} \times MS_{i,u}^t \quad \forall i \in L, u \in U, t \in T \quad (16)$$

برای تعادل مقدار تقاضا و کمبود با فروش کالا، معادله (۱۷) به‌عنوان محدودیت تنظیم شده است. در این محدودیت مقدار کمبود کالا در هر دوره زمانی t با متغیر XL^t برابر است با اختلاف تقاضا با مجموع فروش کالا یا به تعبیری دیگر خروج کالا از زنجیره تأمین که به‌صورت ریاضی در این معادله نشان داده شده است.

$$Demand^t = XL^t + \sum_{i \in L} \sum_{u \in U} XS_{i,u}^t \quad \forall t \in T \quad (17)$$

برای محدودیت ظرفیت براساس کاربری آن مکان، نامعادله (۱۸) به‌عنوان محدودیت تنظیم شده است. در این محدودیت، حد بالای متغیر میزان کالای انبار شده در زمان t در مکان i که در کاربری u قرار دارد، محدود به ظرفیت انبار با پارامتر $Icap_{i,u}$ و همچنین کاربری فعلی آن مکان، براساس متغیر $MS_{i,u}^t$ است. با توجه به این نکته که متغیر $MS_{i,u}^t$ وضعیت کاربری u در مکان i در زمان t را نشان می‌دهد.

$$XI_{i,u}^t \leq Icap_{i,u} \times MS_{i,u}^t \quad \forall i \in L, u \in U, t \in T \quad (18)$$

معادله (۱۹) محدودیت حفظ تعادل مقدار کالا در هر مکان و در هر دوره‌ی زمانی است. این محدودیت در مدل تضمین می‌کند که مجموع کالای ورودی به هر تسهیل در هر دوره زمانی با مقدار کالای باقیمانده در انبار از دوره زمانی قبل برابر است با مجموع کالای خروجی از آن مکان با مقدار کالای اضافی که برای دوره بعد در انبار آن مکان نگهداری خواهد شد. به‌صورت ساده شده:

انبار فعلی + فروش + خروجی = انبار دوره قبل + تولیدی + ورودی

$$\sum_{i' \in L} XT_{i',i}^t + \sum_{u \in U} XP_{i,u}^t + \sum_{u \in U} XI_{i,u}^{t-1} = \sum_{i' \in L} XT_{i,i'}^t + \sum_{u \in U} XS_{i,u}^t + \sum_{u \in U} XI_{i,u}^t \quad \forall i \in L, t \in T \quad (19)$$

برای در نظر گرفتن حالت گذار در مسئله با طراحی زنجیره که امکان تغییر کاربری تسهیلات در آن وجود دارد، نیاز به محدودیت‌های ابتکاری با متغیرهای وابسته ابتکاری است. محدودیت‌ها و متغیرهایی که در ادامه برای مدل‌سازی این مسئله آورده شده است، نتیجه ابتکار و خلق متغیرهای وابسته است. توجه شود که قطعاً این مدل، ساده‌ترین مدل ممکن نیست و با خلاقیت‌ها و ابتکارهای دیگر، شاید بتوان به مدل ساده‌تری دست یافت. برای تشخیص وضعیت عضویت کاربری با متغیر $MS_{i,u}^t$ از متغیر $PP_{i,u}^t$ استفاده شده است. دو گزاره شرطی زیر نحوه ارتباط این دو متغیر را شرح می‌دهد.

گزاره‌ی اول $MS_{i,u}^t$: "اگر میزان پیشرفت در برنامه کاربری u در مکان i در زمان t ($PP_{i,u}^t$) کمتر از یک باشد، آنگاه وضعیت عضویت مکان i در کاربری u در زمان t ($MS_{i,u}^t$) برابر صفر یعنی عدم عضویت خواهد بود". محدودیت متناظر با این گزاره، معادله (۲۰) است.

$$MS_{i,u}^t \leq PP_{i,u}^t \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (20)$$

گزاره دوم $MS_{i,u}^t$: "اگر میزان پیشرفت در برنامه کاربری u در مکان i در زمان t ($PP_{i,u}^t$) دقیقاً برابر یک باشد، آنگاه وضعیت عضویت مکان i در کاربری u در زمان t ($MS_{i,u}^t$) برابر یک یعنی عضویت خواهد بود". محدودیت متناظر با این گزاره، معادله (۲۱) است.

$$PP_{i,u}^t + \varepsilon \leq 1 + MS_{i,u}^t \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (21)$$

توجه: مقدار ε در مدل باید از کوچک‌ترین میزان تغییرات میزان پیشرفت برنامه، کوچک‌تر باشد.

$$\varepsilon < \min\{CTime_{i,u}, Otime_{i,u}\} \quad \forall i \in L, u \in U \quad (22)$$

برای مثال، اگر متغیر حقیقی مثبت $PP_{i,u}^t$ برابر مقدار یک باشد، بر اساس نامعادله (۲۰)، متغیر $MS_{i,u}^t$ می‌تواند مقدار یک یا صفر اختیار کند ولی بر اساس نامعادله (۲۱)، متغیر $MS_{i,u}^t$ چون باینری است، باید یک باشد، زیرا به علت مقدار کوچک ε ، اگر $MS_{i,u}^t$ مقدار صفر اختیار کند، نامعادله (۲۱) نقض می‌شود. از طرف دیگر اگر متغیر حقیقی مثبت $PP_{i,u}^t$ مقداری کمتر از یک باشد برای مثال 0.5 ، بر اساس نامعادله (۲۰)، متغیر $MS_{i,u}^t$ چون باینری است، حتماً صفر می‌شود. ولی بر اساس نامعادله (۲۱)، متغیر $MS_{i,u}^t$ می‌تواند مقدار یک یا صفر اختیار کند. به‌صورت خلاصه، نامعادله‌ها (۲۰) و (۲۱)، برای محدودیت تشخیص متغیر $MS_{i,u}^t$ در مدل به صورتی تنظیم شده‌اند که اگر مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ کمتر از یک باشد، عامل محدودکننده، نامعادله (۲۰) باشد و اگر مقدار $PP_{i,u}^t$ برابر یک باشد عامل محدودکننده، نامعادله (۲۱) باشد.

مثال ۲. اگر متغیر $PP_{i,u}^t$ برای یک دوره زمانی فرضی به‌صورت زیر باشد، با اعمال نامعادله‌های (۲۰) و (۲۱) به متغیر $PP_{i,u}^t$ ، متغیر وابسته $MS_{i,u}^t$ در همان دوره زمانی، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$[PP_{i,u}^t]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \Rightarrow [MS_{i,u}^t]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$$

پایان مثال ۲ ■

برای تشخیص وضعیت خالی بودن مکان تسهیل i در زمان t از هر نوع کاربری با متغیر CS_i^t از متغیر $PP_{i,u}^t$ استفاده شده است. دو گزاره شرطی زیر نحوه ارتباط این دو متغیر را شرح می‌دهد.

گزاره اول CS_i^t : "اگر میزان پیشرفت در همه برنامه کاربری‌ها $\sum_{u=1}^U PP_{i,u}^t$ برابر صفر باشد، آنگاه متغیر وضعیت خالی بودن مکان i در زمان

t یعنی CS_i^t در وضعیت خالی قرار دارد؛ یعنی $CS_i^t = 1$ " به‌صورت ریاضی، نامعادله (۲۳) هم‌ارز با گزاره بالا است.

$$\varepsilon \leq CS_i^t + \sum_{u=1}^U PP_{i,u}^t \quad \forall t \in T, i \in L \quad (23)$$

در نامعادله (۲۳) اگر مجموع متغیرهای میزان پیشرفت در انواع کاربری‌ها $\sum_{u=1}^U PP_{i,u}^t$ صفر باشد، به علت وجود مقدار کوچک ε در طرف راست نامساوی و همچنین باینری بودن متغیر CS_i^t ، حل‌کننده مدل باید مقدار CS_i^t را برابر یک انتخاب کند.

گزاره دوم CS_i^t : "اگر میزان پیشرفت در همه برنامه کاربری $\sum_{u=1}^U PP_{i,u}^t$ برابر صفر نباشد، آنگاه متغیر وضعیت خالی بودن مکان i در زمان t یعنی $CS_i^t = 0$ در وضعیت خالی قرار ندارد؛ یعنی $CS_i^t = 0$ ".
به صورت ریاضی، نامعادله (۲۴) هم‌ارز با گزاره بالا است.

$$CS_i^t + \sum_{u=1}^U PP_{i,u}^t \leq 1 \quad \forall t \in T, i \in L \quad (24)$$

در نامعادله (۲۴) اگر مجموع متغیرهای میزان پیشرفت در انواع کاربری‌ها $\sum_{u=1}^U PP_{i,u}^t$ صفر نباشد؛ یعنی مقدار کوچکی به جز صفر داشته باشد، به علت اینکه متغیر CS_i^t باینری است، برای برقراری نامساوی، حل‌کننده مدل باید مقدار CS_i^t را برابر صفر انتخاب کند.

مثال ۳ (CS_i^t) : اگر متغیر میزان پیشرفت $PP_{i,u}^t$ به صورت زیر در نظر گرفته شود، متغیر CS_i^t متناظر با آن با اعمال نامعادله‌ها (۲۳) و (۲۴) به عنوان محدودیت، متغیر CS_i^t به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$[PP_{i,u}^t]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \Rightarrow [CS_i^t]_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \quad \blacksquare \text{ پایان مثال ۳}$$

برای تشخیص حالت گذار با متغیر وابسته با نماد $TS_{i,u}^t$ معرفی شده است. برای محاسبه‌ی متغیر $TS_{i,u}^t$ باید از متغیر $PP_{i,u}^t$ استفاده شود، به این صورت که اگر در مکان i برای کاربری u در زمان t مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ بین صفر و یک باشد حتما حالت گذار رخ داده است. گزاره شرطی زیر نحوه ارتباط این دو متغیر را شرح می‌دهد.

"اگر و تنها اگر میزان پیشرفت در مکان i برای کاربری u در زمان t مقداری بین صفر و یک باشد، آنگاه متغیر وضعیت گذرا در مکان i برای کاربری u در زمان t برابر یک خواهد بود، در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود".
صورت ریاضی این گزاره شرطی، در (۲۵) نمایش داده شده است.

$$0 < PP_{i,u}^t < 1 \Leftrightarrow TS_{i,u}^t = 1 \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (25)$$

برای تبدیل گزاره شرطی ریاضی (۲۵) به محدودیت‌های مدل ریاضی، از یک روش ابتکاری و خلاقانه با استفاده از منطق باینری استفاده شده است؛ برای ساده‌سازی و تنظیم محدودیت‌های مربوط به متغیر $TS_{i,u}^t$ ، محدودیت‌ها به دو بخش تقسیم شده است.

بخش اول $(TS_{i,u}^t)$: اگر متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر صفر یا یک بود، مقدار متغیر $TS_{i,u}^t$ حتما برابر صفر شود. برای تحقق این گزاره معادله (۲۶) با استفاده از روش عدد M بزرگ تنظیم شده است.

$$-(1 - TS_{i,u}^t)M < PP_{i,u}^t < 1 + (1 - TS_{i,u}^t)M \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (26)$$

برای تبدیل کوچکتر به کوچکتر مساوی از مقدار کوچک ε استفاده شده و نامعادله (۲۷) از نامعادله (۲۶) به دست می‌آید:

$$\varepsilon - (1 - TS_{i,u}^t)M \leq PP_{i,u}^t \leq 1 - \varepsilon + (1 - TS_{i,u}^t)M \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (27)$$

از طرف چپ نامعادله (۲۷)، یکی از محدودیت‌های این بخش به صورت (۲۸) ساده می‌شود:

$$\varepsilon \leq PP_{i,u}^t + (1 - TS_{i,u}^t)M \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (28)$$

در نامعادله (۲۸)، اگر متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر صفر باشد، مقدار متغیر باینری $TS_{i,u}^t$ مجبور به انتخاب مقدار صفر است. و اگر مقداری بیشتر از صفر داشته باشد، مقدار متغیر باینری $TS_{i,u}^t$ آزاد است و حل‌کننده مدل می‌تواند صفر یا یک انتخاب کند. برای مثال، براساس نامعادله (۲۸) مقدار $TS_{i,u}^t$ بر اساس چند نمونه $PP_{i,u}^t$ به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$PP_{i,u}^t = 0.5 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\}$$

$$PP_{i,u}^t = 0 \Rightarrow TS_{i,u}^t = 0 \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U$$

$$PP_{i,u}^t = 1 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\}$$

از طرف راست نامعادله (۲۷)، یکی دیگر از محدودیت‌های این بخش به صورت (۲۹) می‌شود.

$$PP_{i,u}^t - (1 - TS_{i,u}^t)M \leq 1 - \varepsilon \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (29)$$

در نامعادله (۲۹) اگر متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر یک باشد، مقدار متغیر باینری $TS_{i,u}^t$ مجبور به انتخاب مقدار صفر است و اگر مقداری کمتر از یک داشته باشد، مقدار متغیر باینری $TS_{i,u}^t$ آزاد است و حل‌کننده مدل می‌تواند صفر یا یک را انتخاب کند. براساس نامعادله (۲۹) مقدار $TS_{i,u}^t$ براساس چند نمونه $PP_{i,u}^t$ به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$PP_{i,u}^t = 0.5 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\}$$

$$PP_{i,u}^t = 0 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U$$

$$PP_{i,u}^t = 1 \Rightarrow TS_{i,u}^t = 0$$

بخش دوم $(TS_{i,u}^t)$: اگر متغیر $TS_{i,u}^t$ برابر یک باشد، پس قطعاً متغیر $PP_{i,u}^t$ در بازه بین صفر و یک قرار داشته است. برای تحقق این گزاره، می‌توان به صورت ابتکاری از وضعیت عضویت کاربری با متغیر $MS_{i,u}^t$ استفاده کرد. اگر متغیر وابسته و باینری $TS_{i,u}^t$ برابر صفر باشد، پس حتماً در مکان i برای کاربری u در زمان t ، وضعیت در حالت پایدار است؛ در این صورت، احتمال وجود دو وضعیت متضاد وجود دارد؛ وضعیت پایدار باز و پایدار بسته، برای وضعیت باز، متغیر وضعیت کاربری $MS_{i,u}^t$ برابر مقدار یک و برای وضعیت بسته، مقدار صفر دارد. پس در صورتی که وضعیت در حالت گذار نباشد، امکان وجود فقط دو وضعیت باز یا بسته که باینری هستند وجود دارد. نامعادله‌های (۳۱) و (۳۵) برای تحقق این امر، با استفاده از روش عدد M بزرگ تنظیم شده‌اند. برای وضعیت باز بودن:

$$PP_{i,u}^t = 1 \Rightarrow \begin{cases} TS_{i,u}^t = \{0,1\} \\ MS_{i,u}^t = 1 \end{cases} \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (30)$$

تبدیل گزاره ریاضی (۳۰) به محدودیت مدل ریاضی به صورت ابتکاری، نامعادله (۳۲) می‌شود.

$$1 \leq PP_{i,u}^t + TS_{i,u}^t M + (1 - MS_{i,u}^t)M \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (31)$$

با فاکتورگیری از M :

$$1 \leq PP_{i,u}^t + (TS_{i,u}^t + 1 - MS_{i,u}^t)M \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (32)$$

برای مثال، در نامعادله (۳۲) اگر مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر $0/5$ باشد، بر اساس نامعادله (۳۰) مقدار $MS_{i,u}^t$ برابر صفر است، پس مقدار $TS_{i,u}^t$ آزاد است و حل‌کننده مدل می‌تواند صفر یا یک را انتخاب کند. مثالی دیگر؛ اگر مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر صفر باشد بر اساس نامعادله (۳۰) مقدار $MS_{i,u}^t$ برابر صفر است، پس مقدار $TS_{i,u}^t$ آزاد است و حل‌کننده مدل می‌تواند صفر یا یک را انتخاب کند. برای مثال دیگر، اگر مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر یک باشد بر اساس نامعادله (۳۱) مقدار $MS_{i,u}^t$ برابر یک است پس مقدار $TS_{i,u}^t$ آزاد است. بر اساس نامعادله (۳۲) به طور خلاصه:

$$\begin{aligned}
 PP_{i,u}^t = 0.5 &\Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\} \\
 PP_{i,u}^t = 0 &\Rightarrow MS_{i,u}^t = 0 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \\
 PP_{i,u}^t = 1 &\Rightarrow MS_{i,u}^t = 1 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\}
 \end{aligned}$$

برای وضعیت بسته‌بودن:

$$PP_{i,u}^t = 0 \Rightarrow \begin{cases} TS_{i,u}^t = 0 \\ MS_{i,u}^t = 0 \end{cases} \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (33)$$

تبدیل گزاره ریاضی (۳۳) به محدودیت مدل ریاضی به صورت ابتکاری نامعادله (۳۴) می‌شود.

$$PP_{i,u}^t \leq TS_{i,u}^t M + MS_{i,u}^t M \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (34)$$

با فاکتورگیری از M :

$$PP_{i,u}^t \leq (TS_{i,u}^t + MS_{i,u}^t) M \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \quad (35)$$

برای مثال، در نامعادله (۳۵) اگر مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر $0/5$ باشد، براساس نامعادله (۲۰) مقدار $MS_{i,u}^t$ برابر صفر است، پس مقدار $TS_{i,u}^t$ باید برابر مقدار یک شود. برای مثالی دیگر؛ اگر مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر صفر باشد، براساس نامعادله (۲۰) مقدار $MS_{i,u}^t$ برابر صفر است، پس مقدار $TS_{i,u}^t$ آزاد است و حل‌کننده مدل می‌تواند صفر یا یک را انتخاب کند. برای مثالی دیگر، اگر مقدار متغیر $PP_{i,u}^t$ برابر یک باشد، براساس نامعادله (۲۱) مقدار $MS_{i,u}^t$ برابر یک است، پس مقدار $TS_{i,u}^t$ آزاد است. براساس نامعادله (۳۵) به طور خلاصه:

$$\begin{aligned}
 PP_{i,u}^t = 0.5 &\Rightarrow TS_{i,u}^t = 1 \\
 PP_{i,u}^t = 0 &\Rightarrow MS_{i,u}^t = 0 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in L, u \in U \\
 PP_{i,u}^t = 1 &\Rightarrow MS_{i,u}^t = 1 \Rightarrow TS_{i,u}^t = \{0,1\}
 \end{aligned}$$

مثال ۴ $(TS_{i,u})$: اگر متغیر میزان پیشرفت $PP_{i,u}^t$ در یک دوره‌ی زمانی، به صورت زیر در نظر گرفته شود، متغیر $TS_{i,u}$ متناظر با آن با

اعمال محدودیت‌های (۲۸)، (۲۹)، (۳۲) و (۳۵) متغیر وابسته‌ی $TS_{i,u}$ به صورت زیر خواهد شد.

$$[PP_{i,u}]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \Rightarrow [TS_{i,u}]_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \quad \blacksquare \text{ پایان مثال ۴}$$

در این مدل، مکانی قابل بازگشایی و بهره‌برداری است که شرط امکان بازگشایی در آن کاربری را داشته باشد؛ یعنی به صورت بالقوه، امکان بهره‌برداری در این کاربری را داشته باشد. این گزاره یعنی مکان i برای کاربری u در زمان t در صورتی قابل برنامه‌ریزی برای بازگشایی با متغیر $OP_{i,u}^t$ است که این مکان i قابلیت بهره‌برداری بالقوه برای کاربری u با پارامتر $IAU_{i,u}$ را داشته باشد. رابطه (۳۶) صورت ریاضی این گزاره را نشان می‌دهد.

$$OP_{i,u}^t \leq IAU_{i,u} \quad \forall i \in L, u \in U, t \in T \quad (36)$$

در محدودیت (۳۶)، اگر مقدار متغیر پارامتر باینری $IAU_{i,u}$ یک باشد، مقدار متغیر باینری $OP_{i,u}^t$ آزاد خواهد شد و می تواند صفر یا یک انتخاب شود. ولی اگر مقدار متغیر باینری $IAU_{i,u}$ صفر باشد؛ یعنی این مکان توانایی بهره برداری از این کاربری را ندارد، پس مقدار متغیر باینری $OP_{i,u}^t$ به اجبار باید صفر می شود.

برای اجرانشدن هم زمان دو برنامه باز کردن و بستن، نامعادله ی (۳۷) به عنوان محدودیت آورده شده است. همچنین این محدودیت در مدل برای تضمین اتمام برنامه است، به عبارت دیگر؛ در حالت گذار تا زمانی که برنامه ای تکمیل نشده برنامه جدیدی در آن مکان اجرا نشود، نامعادله (۳۷) این شرط را برقرار می کند.

$$\sum_{u \in U} OP_{i,u}^t + CP_{i,u}^t \leq 1 \quad \forall i \in L, t \in T \quad (37)$$

برای به روزرسانی متغیر پیشرفت در برنامه کاربری $PP_{i,u}^t$ ، اگر برنامه باز کردن در زمان $t-1$ در مکان i برای کاربری u وجود داشته باشد $(OP_{i,u}^{t-1} = 1)$ ، به اندازه پارامتر $Otime_{i,u}$ به متغیر پیشرفت در برنامه کاربری در دوره قبل $PP_{i,u}^{t-1}$ اضافه می شود، اگر برنامه بستن در زمان $t-1$ در مکان i برای کاربری u وجود داشته باشد $(CP_{i,u}^{t-1} = 1)$ ، به اندازه پارامتر $Ctime_{i,u}$ از متغیر پیشرفت در برنامه کاربری در دوره قبل $PP_{i,u}^{t-1}$ کم می شود. برای تحقق این گزاره، معادله (۳۸) به عنوان محدودیت مدل ریاضی در نظر گرفته شده است.

$$PP_{i,u}^t = PP_{i,u}^{t-1} + OP_{i,u}^{t-1} Otime_{i,u} - CP_{i,u}^{t-1} Ctime_{i,u} \quad \forall i \in L, u \in U, t \in T \setminus \{1\} \quad (38)$$

۴. تحلیل داده ها و یافته های پژوهش

در این بخش، برای مدل معرفی شده در بخش قبل، مثالی موردی برای بررسی و درک عملکرد مدل با روش دقیق با حل کننده تجاری سیپلکس از نرم افزار گمز، حل و نتایج آن تحلیل و بررسی خواهد شد.
مثال موردی. شبکه زنجیره تأمین این مثال، دارای ۳ کاربری یا به بیان سنتی ۳ لایه، دارای ۶ مکان برای تسهیلات، ۱۰ دوره زمانی و بدون پارامتر تصادفی است. سایر پارامترها این مثال در جدول ۵ آورده شده است.

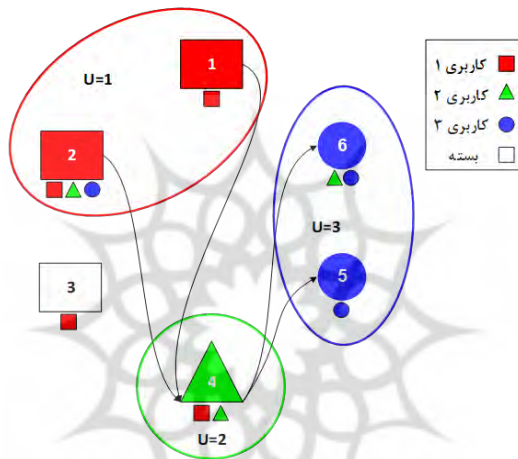
جدول ۵. پارامترهای مثال موردی

$UAM_{u,u'}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	ماتریس مجاورت گراف جهت دار کاربری
$Tcost_{i,i'}^t$	$\begin{bmatrix} - & 5 & 13 & 4 & 12 & 8 \\ 5 & - & 7 & 6 & 3 & 10 \\ 13 & 7 & - & 9 & 5 & 7 \\ 4 & 6 & 9 & - & 11 & 4 \\ 12 & 3 & 5 & 11 & - & 5 \\ 8 & 10 & 7 & 4 & 5 & - \end{bmatrix}_{6 \times 6}$	هزینه حمل و نقل هر واحد کالا بین دو مکان i و i' در زمان t
$Tcap_{i,i'}^t$	$1000[1]_{6 \times 6}$	ظرفیت حمل و نقل بین دو مکان i و i' در زمان t
$Pcost_{i,u}^t$	$\begin{bmatrix} 10 & - & - \\ 10 & - & - \\ 10 & - & - \\ 10 & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	هزینه تولید هر واحد کالا در مکان i برای کاربری u در زمان t

$Pcap_{i,u}^t$	$\begin{bmatrix} 800 & - & - \\ 600 & - & - \\ 1000 & - & - \\ 1000 & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	ظرفیت تولید در مکان i برای کاربری u در زمان t
$Icost_{i,u}^t$	$10[1]_{6 \times 3}$	هزینه انبار هر واحد کالا در مکان i برای کاربری u در زمان t
$Icap_{i,u}^t$	$500[1]_{6 \times 3}$	ظرفیت انبار در مکان i برای کاربری u در زمان t
$IMSM_{i,u}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	وضعیت کاربری u در مکان i در ابتدای اولین دوره زمانی
$Ocost_{i,u}$	$\begin{bmatrix} 10200 & - & - \\ 9500 & 8900 & 3500 \\ 8700 & - & - \\ 9600 & 8400 & - \\ - & - & 4100 \\ - & 9000 & 3400 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	هزینه‌ی راه‌اندازی تسهیل با کاربری u در مکان i
$Otime_{i,u}$	$\begin{bmatrix} 1/2 & - & - \\ 1/2 & 1/2 & 1/4 \\ 1/3 & - & - \\ 1/2 & 1/3 & - \\ - & - & 1/4 \\ - & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	معکوس تعداد دوره زمانی موردنیاز برای احداث کاربری u در مکان i
$Ccost_{i,u}$	$\begin{bmatrix} 3400 & - & - \\ 4000 & 4100 & 2600 \\ 3800 & - & - \\ 4500 & 3400 & - \\ - & - & 3900 \\ - & 3700 & 3200 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	هزینه جمع‌آوری تسهیل با کاربری u در مکان i
$Ctime_{i,u}$	$\begin{bmatrix} 1/1 & - & - \\ 1/1 & 1/2 & 1/4 \\ 1/3 & - & - \\ 1/2 & 1/3 & - \\ - & - & 1/4 \\ - & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	معکوس تعداد دوره زمانی موردنیاز برای جمع‌آوری تسهیل با کاربری u در مکان i
$Scap_{i,u}^t$	$\begin{bmatrix} - & - & - \\ - & - & 700 \\ - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & 740 \\ - & - & 680 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	ظرفیت فروش تسهیل با کاربری u در مکان i در زمان t

$Demand^t$	جدول ۶	مقدار تقاضا در زمان t
$Lcost^t$	$200[1]_{t \times 1}$	هزینه کمبود در زمان t
$IAU_{i,u}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{6 \times 3}$	وضعیت بالقوه امکان بهره‌برداری از مکان i برای کاربری ll ؛ مقدار یک در صورت امکان بهره‌برداری و مقدار صفر در صورت عدم امکان

شکل ۶ نمایشی از شبکه زنجیره تأمین مثال موردی، در ابتدای اولین دوره زمانی را نشان می‌دهد. در این مثال، مکان‌های ۱ و ۲ در وضعیت کاربری ۱، مکان ۳ بدون کاربری، مکان ۴ با کاربری ۲ و مکان‌های ۵ و ۶ با کاربری ۳ است. در این شکل، نمادهای بزرگ نشان‌دهنده تسهیلات و نمادهای کوچک نشان‌دهنده امکان بالقوه بهره‌برداری از آن مکان است. برای نمونه، مکان شماره ۲ امکان بهره‌برداری در هر سه گروه از کاربری‌ها را دارد؛ ولی مکان خالی شماره ۳، فقط امکان بهره‌برداری در کاربری ۱ را دارد.



شکل ۶. نمایش وضعیت ابتدایی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین مثال

مقدار تقاضا در این مثال برابر جدول ۶ در نظر گرفته شده است

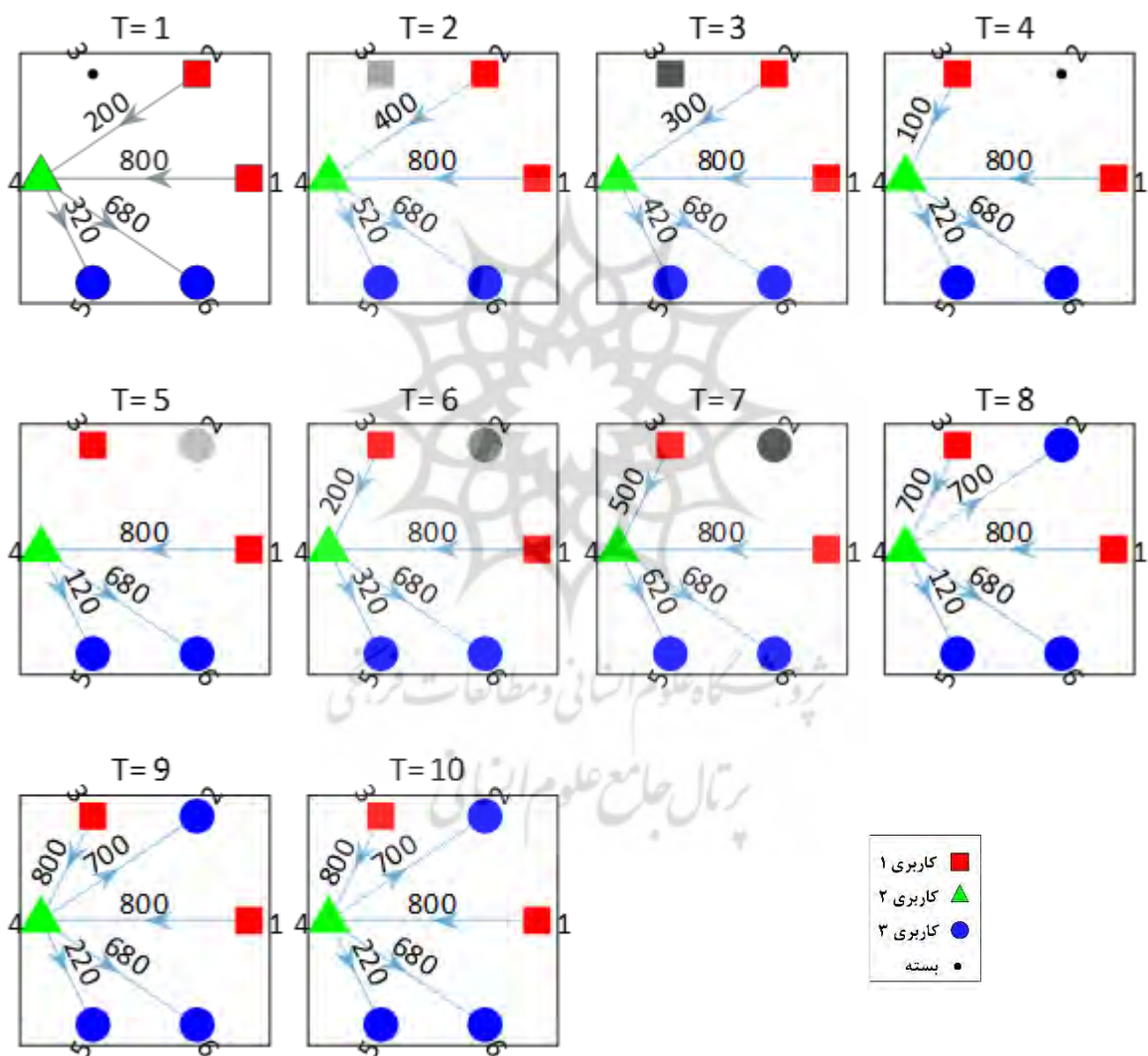
جدول ۶. مقدار تقاضا در هر دوره‌ی زمانی برای مثال موردی

دوره	تقاضا	دوره	تقاضا
۱	۱۰۰۰	۶	۱۰۰۰
۲	۱۲۰۰	۷	۱۳۰۰
۳	۱۱۰۰	۸	۱۵۰۰
۴	۹۰۰	۹	۱۶۰۰
۵	۸۰۰	۱۰	۱۶۰۰

این مثال، با قراردادن پارامترهای ذکر شده در نرم‌افزار اکسل^۱ و پیاده‌سازی با استفاده از مدل باطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات در نرم‌افزار گمز با روش سیپلکس، با رایانه‌ای با پردازشگر ۸ هسته‌ای با فرکانس ۲.۵ گیگاهرتز و حافظه‌ی اجرایی ۱۲ گیگابایت در زمان ۹/۴۲ ثانیه، حل شد.

جواب بهینه‌سازی به‌صورت نمایش در یک نگاه با استفاده از نرم‌افزار متلب^۲ در شکل ۷ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که مقدار تولید، انبارش و فروش کالا به علت محدودیت فضای نمایش، در این شکل گنجانده نشده است و فقط حالت گذار ساختار شبکه و مقدار توزیع کالا در هر دوره زمانی قرار داده شده است و سایر متغیرهای جواب بهینه در جدول ۷ قرار گرفته است.

در این شکل، حالت گذار به‌سادگی و در یک نگاه قابل مشاهده است در این مثال، حل‌کننده مدل، دستور بازگشایی تسهیلات با کاربری ۱ را در مکان ۳ داده است. این کاربری که با مربع نشان داده شده است، در طول ۳ دوره زمانی بازگشایی می‌شود و در ابتدای دوره ۴ در دسترس است. همچنین در دوره زمانی ۳، دستور تغییر کاربری مکان ۲ از کاربری ۱ با نماد مربع به کاربری ۳ با نماد دایره داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در دوره ۴، مکان ۲ بسته شده و سپس با کاربری جدید بازگشایی می‌شود. مقدار بهینه تابع هدف (هزینه کل) این مثال برابر ۳۰۳۳۰۰ محاسبه شد.



شکل ۷. نمایش جواب بهینه‌ی مثال موردی در یک نگاه

1. Excel
2. MATLAB

جدول ۷. جواب دقیق بهینه حل شده برای مثال موردی با استفاده از روش سیپلکس در نرم‌افزار گمز

	$OP(1, 3, 1) = 1$	$OP(5, 2, 3) = 1$	
(بازگشایی)	$OP(2, 3, 1) = 1$	$OP(6, 2, 3) = 1$	
$OP_{i,u}^t = OP(t, i, u)$	$OP(3, 3, 1) = 1$	$OP(7, 2, 3) = 1$	
	$OP(4, 2, 3) = 1$		
$CP_{i,u}^t = CP(t, i, u)$ (بستن)	$CP(3, 2, 1) = 1$		
	$XP(1, 1, 1) = 800$	$XP(6, 3, 1) = 200$	
	$XP(1, 2, 1) = 200$	$XP(7, 1, 1) = 800$	
	$XP(2, 1, 1) = 800$	$XP(7, 3, 1) = 500$	
	$XP(2, 2, 1) = 400$	$XP(8, 1, 1) = 800$	
$XP_{i,u}^t = XP(t, i, u)$ (تولید)	$XP(3, 1, 1) = 800$	$XP(8, 3, 1) = 700$	
	$XP(3, 2, 1) = 300$	$XP(9, 1, 1) = 800$	
	$XP(4, 1, 1) = 800$	$XP(9, 3, 1) = 800$	
	$XP(4, 3, 1) = 100$	$XP(10, 1, 1) = 800$	
	$XP(5, 1, 1) = 800$	$XP(10, 3, 1) = 800$	
	$XP(6, 1, 1) = 800$		
$XI_{i,u}^t = XI(t, i, u)$ (انبار)	\emptyset		
$XL_{i,u}^t = XL(t, i, u)$ (کمبود)	\emptyset		
	$XT(1, 1, 4) = 800$	$XT(4, 4, 5) = 220$	$XT(8, 3, 4) = 700$
	$XT(1, 2, 4) = 200$	$XT(4, 4, 6) = 680$	$XT(8, 4, 2) = 700$
	$XT(1, 4, 5) = 320$	$XT(5, 1, 4) = 800$	$XT(8, 4, 5) = 120$
	$XT(1, 4, 6) = 680$	$XT(5, 4, 5) = 120$	$XT(8, 4, 6) = 680$
	$XT(2, 1, 4) = 800$	$XT(5, 4, 6) = 680$	$XT(9, 1, 4) = 800$
	$XT(2, 2, 4) = 400$	$XT(6, 1, 4) = 800$	$XT(9, 3, 4) = 800$
	$XT(2, 4, 5) = 520$	$XT(6, 3, 4) = 200$	$XT(9, 4, 2) = 700$
$XT_{i,i'}^t = XT(t, i, i')$ (انتقال)	$XT(2, 4, 6) = 680$	$XT(6, 4, 5) = 320$	$XT(9, 4, 5) = 220$
	$XT(3, 1, 4) = 800$	$XT(6, 4, 6) = 680$	$XT(9, 4, 6) = 680$
	$XT(3, 2, 4) = 300$	$XT(7, 1, 4) = 800$	$XT(10, 1, 4) = 800$
	$XT(3, 4, 5) = 420$	$XT(7, 3, 4) = 500$	$XT(10, 3, 4) = 800$
	$XT(3, 4, 6) = 680$	$XT(7, 4, 5) = 620$	$XT(10, 4, 2) = 700$
	$XT(4, 1, 4) = 800$	$XT(7, 4, 6) = 680$	$XT(10, 4, 5) = 220$
	$XT(4, 3, 4) = 100$	$XT(8, 1, 4) = 800$	$XT(10, 4, 6) = 680$
	$XS(1, 5, 3) = 320$	$XS(5, 5, 3) = 120$	$XS(8, 6, 3) = 680$
	$XS(1, 6, 3) = 680$	$XS(5, 6, 3) = 680$	$XS(9, 2, 3) = 700$
	$XS(2, 5, 3) = 520$	$XS(6, 5, 3) = 320$	$XS(9, 5, 3) = 220$
$XS_{i,u}^t = XS(t, i, u)$ (فروش)	$XS(2, 6, 3) = 680$	$XS(6, 6, 3) = 680$	$XS(9, 6, 3) = 680$
	$XS(3, 5, 3) = 420$	$XS(7, 5, 3) = 620$	$XS(10, 2, 3) = 700$
	$XS(3, 6, 3) = 680$	$XS(7, 6, 3) = 680$	$XS(10, 5, 3) = 220$
	$XS(4, 5, 3) = 220$	$XS(8, 2, 3) = 700$	$XS(10, 6, 3) = 680$
	$XS(4, 6, 3) = 680$	$XS(8, 5, 3) = 120$	

در جدول ۸، مقادیر هزینه به صورت تفکیک شده و همچنین به صورت هزینه کل، در کل طول دوره زمانی آورده شده است.

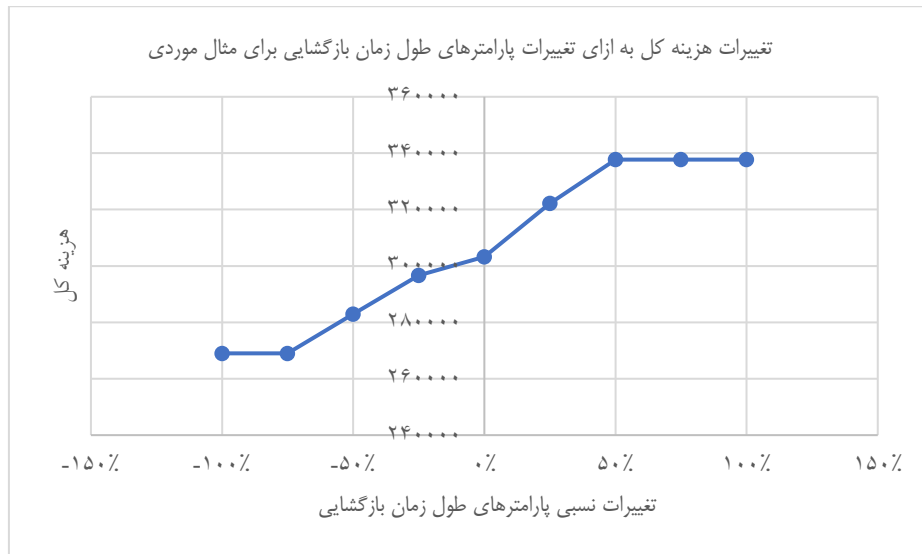
جدول ۸. هزینه‌ی بهینه مثال ۱

هزینه انتقال	۱۳۹۲۰۰
هزینه بازگشایی	۴۰۱۰۰
هزینه بستن	۴۰۰۰
هزینه تولید	۱۲۰۰۰۰
هزینه انبار	۰
هزینه کمبود	۰
(تابع هدف - هزینه کل) Z	۳۰۳۳۰۰

تحلیل حساسیت. برای تحلیل حساسیت پاسخ این مدل، از مثال موردی که در بخش قبل معرفی شد، به عنوان پایه اصلی استفاده شده است. **حساسیت پارامتر طول زمان بازگشایی.** تأثیر تغییر پارامتر طول زمان بازگشایی بر تابع هدف (هزینه کل) برای مثال موردی در جدول ۹ آورده شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که هرچه طول زمان بازگشایی تسهیلات کوتاه‌تر باشد هزینه کل کاهش می‌یابد و بالعکس. همچنین از این جدول برداشت می‌شود که تأثیر تغییر این پارامتر دارای حد است و اشباع می‌شود، به عبارت دیگر، اگر زمان بازگشایی خیلی کم باشد. شبکه به سرعت به هدف ساختار هدف بهینه می‌رسد و اگر زمان بازگشایی خیلی زیاد باشد، حل‌کننده مدل بهینه، تغییری در پیکربندی ساختار شبکه زنجیره تأمین نمی‌دهد. همچنین برای درک این موضوع شکل ۸ آورده شده است.

جدول ۹. تأثیر تغییر پارامتر طول زمان بازگشایی بر تابع هدف مثال موردی

تغییر زمان مورد نیاز برای بازگشایی	مقدار تابع هدف (هزینه کل)
۱۰٪ کاهش	۲۶۹۰۰۰
۷۵٪ کاهش	۲۶۹۰۰۰
۵۰٪ کاهش	۲۸۲۹۰۰
۲۵٪ کاهش	۲۹۶۷۰۰
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰
۲۵٪ افزایش	۳۲۲۲۰۰
۵۰٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰
۷۵٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰
۱۰٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰

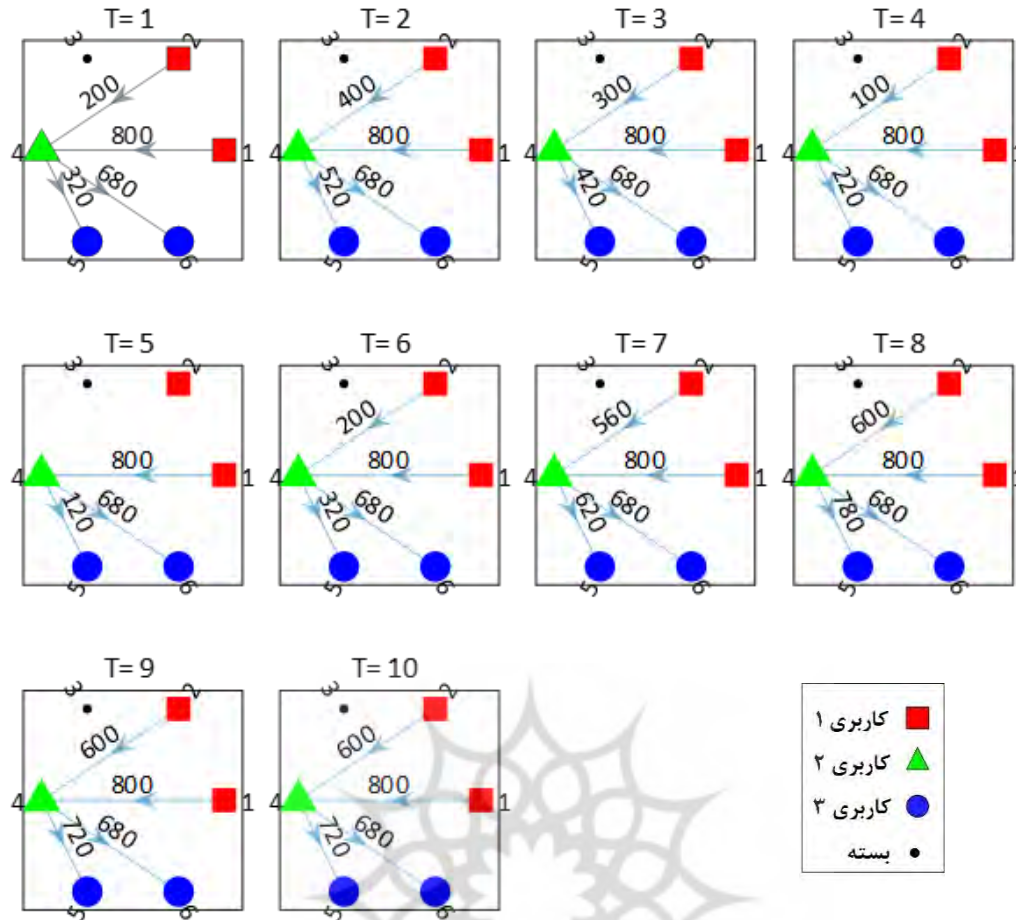


شکل ۸. تغییرات هزینه کل به ازای تغییرات پارامترهای طول زمان بازگشایی برای مثال موردی

در حالت افزایش ۵۰ درصد و بالاتر پارامتر زمان بازگشایی در مثال موردی، یک اتفاق جالب توجه رخ می‌دهد، به این صورت که تغییر پیکربندی شبکه، دیگر بهینه نیست؛ یعنی بازگشایی و تغییر کاربری تسهیلات نباید رخ دهد؛ پس حل‌کننده مدل، پیشنهاد انبار کالا و در دوره‌هایی پیشنهاد کمبود کالا را می‌دهد که بسیار جالب توجه است. شکل ۹ نشان می‌دهد که ساختار شبکه زنجیره تأمین تغییر نمی‌کند و فقط تصمیمات تخصیصی اتخاذ می‌شود. تصمیمات انبار و کمبود کالا در جدول ۱۰ نشان داده شده است، همچنین نتیجه این تصمیمات را در جدول ۱۱ که مربوط به هزینه‌های تفکیک شده است، مشاهده می‌شود.

جدول ۱۰. تصمیمات بهینه تخصیص انبار و کمبود کالا برای مثال موردی در حالت ۵۰ درصد افزایش زمان بازگشایی

$XI'_{i,u} = XI(t, i, u)$ (انبار)	$XI(7,4,2)=60$
	$XI(8,5,3)=40$
	$XI(9,5,3)=20$
$XL' = XL(t)$ (کمبود)	$XL(8)=80$
	$XL(9)=180$
	$XL(10)=180$



شکل ۹. نمایش ساختار بهینه شبکه مثال موردی با افزایش ۵۰ درصدی پارامتر زمان بازگشایی

جدول ۱۱. هزینه بهینه مثال موردی با افزایش ۵۰ درصدی پارامتر زمان بازگشایی

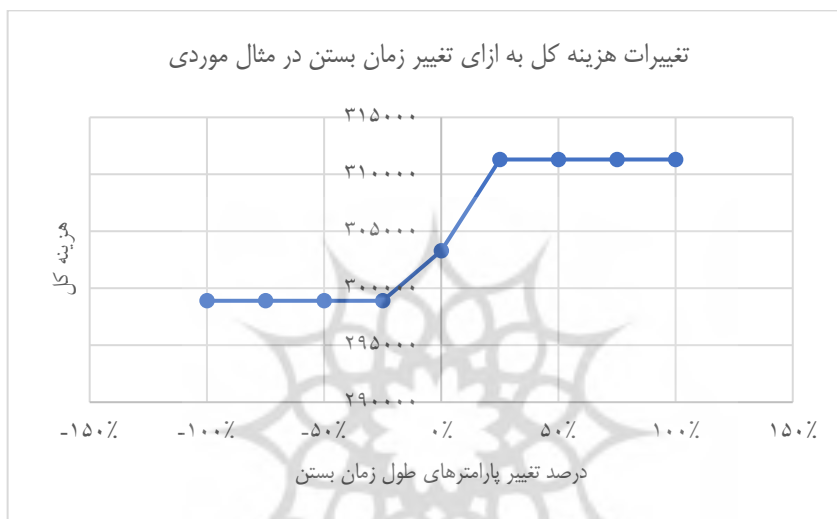
هزینه انتقال	۱۳۲۹۲۰
هزینه بازگشایی	۰
هزینه بستن	۰
هزینه تولید	۱۱۵۶۰۰
هزینه ابزار	۱۲۰۰
هزینه کمبود	۸۸۰۰۰
هزینه کل (تابع هدف) Z	۳۳۷۷۲۰

حساسیت پارامتر طول زمان بستن. تأثیر تغییر پارامتر طول زمان بستن بر تابع هدف مشابه تأثیر تغییرات زمان بازگشایی است. تأثیرات

این تغییر در جدول ۱۲ آورده شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که هرچه طول زمان بستن تسهیلات کوتاه‌تر باشد هزینه کل کاهش می‌یابد و بالعکس. همچنین از این جدول برداشت می‌شود که تأثیر تغییر این پارامتر دارای حد است و اشباع می‌شود، به عبارت دیگر اگر زمان مورد نیاز برای بستن یک تسهیل خیلی کم باشد، شبکه به سرعت به هدف ساختار هدف بهینه می‌رسد و اگر زمان بستن خیلی زیاد باشد، حل‌کننده مدل بهینه، تغییر جدیدی در ساختار شبکه زنجیره تأمین نمی‌دهد. در این مثال، به دلیل کم بودن مقدار پارامتر زمان بستن، حالت اشباع با مقادیر کوچک‌تری رخ داده است. همچنین شکل ۱۰ نموداری از داده‌های جدول ۱۲ است.

جدول ۱۲. تأثیر تغییر پارامتر طول زمان بستن بر تابع هدف مثال موردی

تغییر زمان موردنیاز برای بستن	مقدار تابع هدف (هزینه کل)
۱۰٪ کاهش	۲۹۸۹۰۰
۷۵٪ کاهش	۲۹۸۹۰۰
۵۰٪ کاهش	۲۹۸۹۰۰
۲۵٪ کاهش	۲۹۸۹۰۰
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰
۲۵٪ افزایش	۳۱۱۳۰۰
۵۰٪ افزایش	۳۱۱۳۰۰
۷۵٪ افزایش	۳۱۱۳۰۰
۱۰۰٪ افزایش	۳۱۱۳۰۰

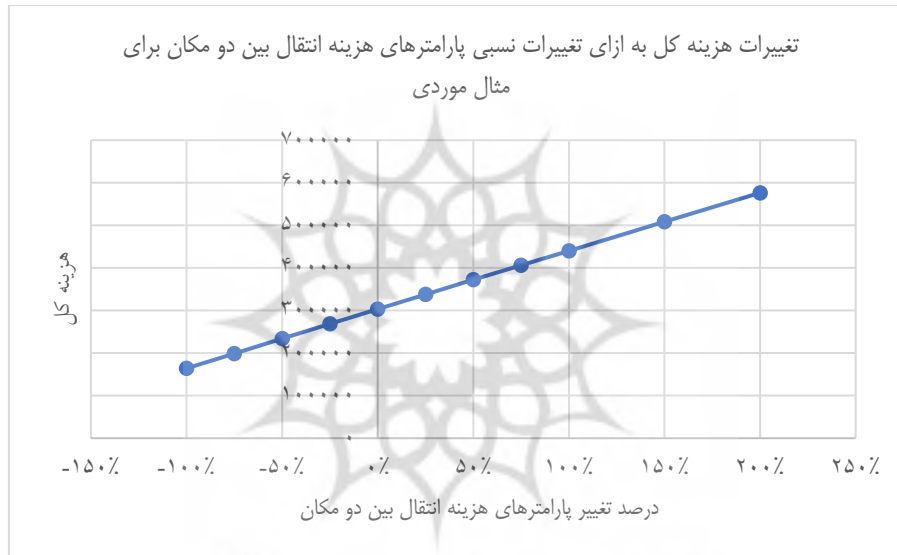


شکل ۱۰. تغییرات هزینه کل به ازای تغییر زمان بستن در مثال موردی

حساسیت پارامتر هزینه انتقال. تأثیر تغییر پارامترهای هزینه‌های انتقال بین دو مکان در شبکه زنجیره تأمین در جدول ۱۳ مشاهده می‌شود. نتایج این جدول نشان می‌دهد که با افزایش پارامترهای هزینه انتقال، هزینه کل نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. همچنین نتایج تأثیرات این این تغییرات در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۳. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه انتقال بین دو مکان بر تابع هدف مثال موردی

تغییرات نسبی پارامترهای هزینه انتقال بین دو مکان	مقدار تابع هدف بهینه (هزینه کل)
۱۰۰٪ کاهش	۱۶۴۱۰۰
۷۵٪ کاهش	۱۹۸۹۰۰
۵۰٪ کاهش	۲۳۳۷۰۰
۲۵٪ کاهش	۲۶۸۵۰۰
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰
۲۵٪ افزایش	۳۳۸۱۰۰
۵۰٪ افزایش	۳۷۲۲۵۰
۷۵٪ افزایش	۴۰۶۲۷۵
۱۰۰٪ افزایش	۴۴۰۳۰۰
۱۵۰٪ افزایش	۵۰۸۳۵۰
۲۰۰٪ افزایش	۵۷۶۴۰۰

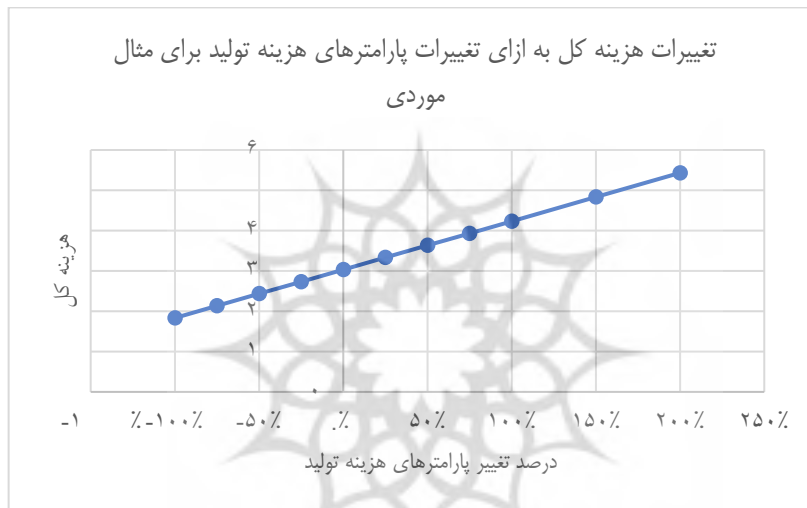


شکل ۱۱. تغییرات هزینه کل به ازای تغییرات نسبی پارامترهای هزینه انتقال بین دو مکان برای موردی

حساسیت پارامتر هزینه تولید. تأثیر تغییر پارامترهای هزینه‌های تولید در شبکه زنجیره تأمین در جدول ۱۴ مشاهده می‌شود. نتایج این جدول نشان می‌دهد که با افزایش مقدار این پارامترها، هزینه بهینه کل نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. همچنین تأثیر تغییرات این پارامتر بر هزینه کل در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱۴. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه تولید بر مقدار بهینه تابع هدف مثال موردی

تغییرات نسبی پارامترهای هزینه تولید	مقدار تابع هدف بهینه (هزینه کل)
۱۰۰٪ کاهش	۱۸۳۳۰۰
۷۵٪ کاهش	۲۱۳۳۰۰
۵۰٪ کاهش	۲۴۳۳۰۰
۲۵٪ کاهش	۲۷۳۳۰۰
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰
۲۵٪ افزایش	۳۳۳۳۰۰
۵۰٪ افزایش	۳۶۳۳۰۰
۷۵٪ افزایش	۳۹۳۳۰۰
۱۰۰٪ افزایش	۴۲۳۳۰۰
۱۵۰٪ افزایش	۴۸۳۳۰۰
۲۰۰٪ افزایش	۵۴۳۳۰۰



شکل ۱۲. تأثیر تغییرات هزینه کل به ازای تغییرات پارامترهای هزینه تولید برای مثال موردی

حساسیت پارامتر هزینه انبار. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه انبار بر مقدار بهینه تابع هدف در مثال موردی در جدول ۱۵ نشان می‌دهد که این تغییرات تأثیری در مقدار بهینه هزینه کل ندارد. این نتیجه خاص، در این مثال، به دلیل تغییر ساختار بهینه شبکه زنجیره تأمین در شرایطی ویژه‌ای رخ داده است که حل‌کننده مدل، مقدار بهینه‌ی انبار کالا در کل دوره زمانی صفر پیشنهاد داده است، پس برای مشاهده این تأثیر باید شرایط مثال موردی را به نحوی تغییر داد.

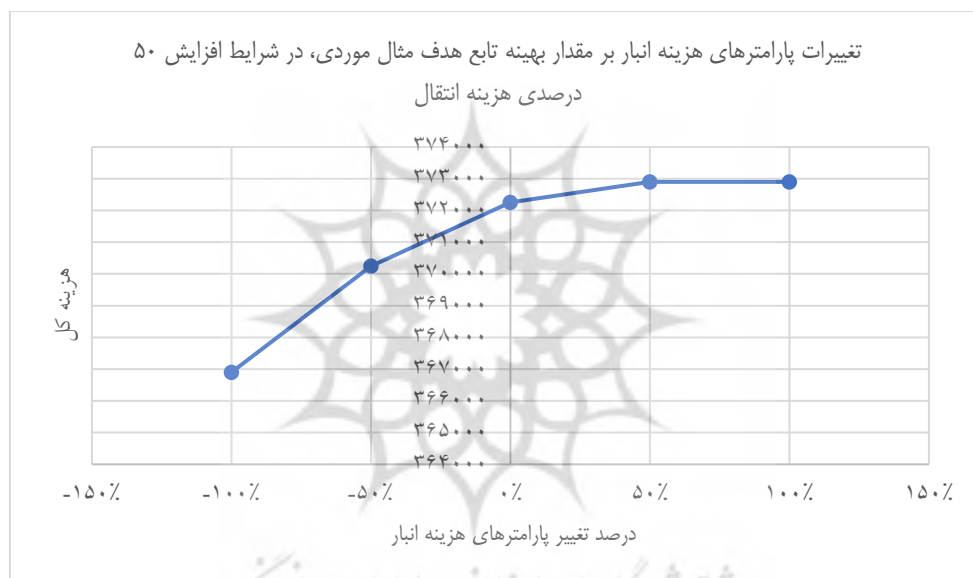
جدول ۱۵. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه انبار بر مقدار بهینه تابع هدف مثال موردی

تغییرات نسبی پارامترهای هزینه انبار	مقدار تابع هدف بهینه (هزینه کل)
۱۰۰٪ کاهش	۳۰۳۳۰۰
۵۰٪ کاهش	۳۰۳۳۰۰
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰
۵۰٪ افزایش	۳۰۳۳۰۰
۱۰۰٪ افزایش	۳۰۳۳۰۰

با افزایش ۵۰ درصدی در هزینه‌های انتقال در مثال موردی، شرایط خاص مثال در مورد انبار بهینه صفر از بین می‌رود و می‌توان تأثیر پارامترهای هزینه انبار بر مقدار بهینه‌ی تابع هدف (هزینه‌ی کل) مشاهده کرد. در جدول ۱۶ مشاهده می‌شود که با افزایش هزینه‌های انبار، مقدار بهینه تابع هدف، افزایش می‌یابد. این افزایش تا حدی ادامه پیدا می‌کند و بعد از آن مقدار بهینه تابع هدف، تأثیری از هزینه انبار نمی‌پذیرد. این رخداد به دلیل صفر شدن مقدار بهینه تصمیم میزان ذخیره کالا در انبار است و دلیل صفر شدن این مقدار، هزینه‌های بالای انبار است و دیگر انبار کردن کالا بهینه نیست. همچنین نتایج این بخش در شکل ۱۳ به نمایش گذاشته شده است.

جدول ۱۶. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه انبار بر مقدار بهینه تابع هدف مثال موردی در شرایط افزایش ۵۰ درصدی هزینه انتقال

تغییرات نسبی پارامترهای هزینه انبار	مقدار تابع هدف بهینه (هزینه کل)
۱۰٪ کاهش	۳۶۶۹۰۰
۵۰٪ کاهش	۳۷۰۲۵۰
مقدار اصلی (در حالت افزایش ۵۰ درصدی هزینه انتقال)	۳۷۲۲۵۰
۵۰٪ افزایش	۳۷۲۹۰۰
۱۰۰٪ افزایش	۳۷۲۹۰۰

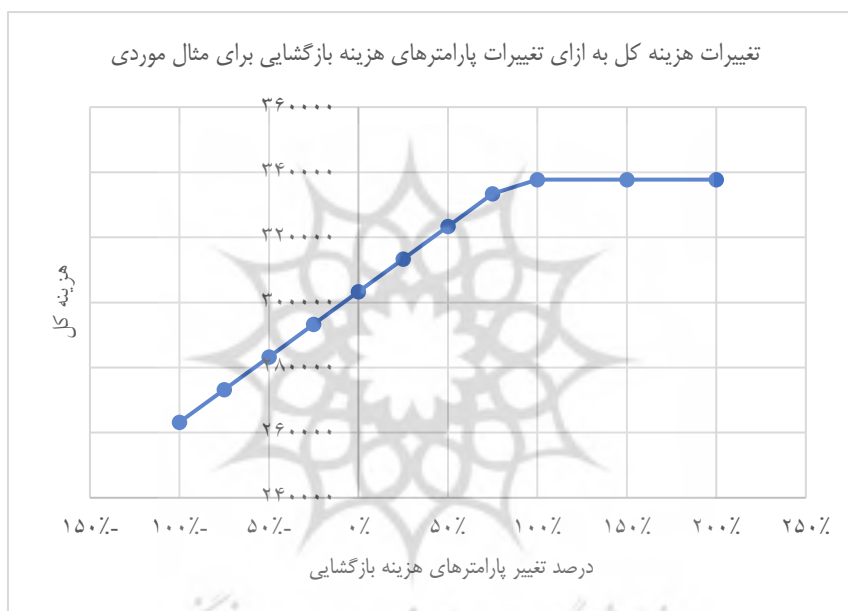


شکل ۱۳. تغییرات هزینه کل به ازای تغییرات پارامترهای هزینه انبار برای مثال موردی، در حالت افزایش ۵۰ درصدی هزینه انتقال

حساسیت پارامتر هزینه بازگشایی. تأثیرات افزایش و کاهش مقدار پارامترهای هزینه بازگشایی تسهیلات بر مقدار هزینه کل بهینه در جدول ۱۷ نمایش داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش پارامترهای هزینه بازگشایی تسهیلات، هزینه کل بهینه نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تا یک مقدار حدی برقرار است و بعد از آن مقدار، افزایش هزینه بازگشایی تأثیری بر هزینه کل نمی‌گذارد. توضیح این پدیده به این صورت است که اگر هزینه بازگشایی خیلی زیاد شود، دیگر تصمیم بازگشایی و تغییر کاربری، یک تصمیم بهینه نیست و نباید ساختار یا پیکربندی شبکه تغییر کند، پس حل‌کننده مدل، تصمیم به ادامه وضع موجود در ساختار شبکه می‌گیرد و از تصمیم بازگشایی تسهیلات استفاده نمی‌کند پس افزایش هزینه بازگشایی، تأثیری در هزینه کل نخواهد داشت. همچنین شکل ۱۴ نمایشی از این نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۱۷. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه بازگشایی بر مقدار تابع هدف بهینه

تغییرات نسبی پارامترهای هزینه بازگشایی تسهیلات	مقدار تابع هدف بهینه (هزینه کل)
۱۰۰٪ کاهش	۲۶۳۲۰۰
۷۵٪ کاهش	۲۷۳۲۲۵
۵۰٪ کاهش	۲۸۳۲۵۰
۲۵٪ کاهش	۲۹۳۲۷۵
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰
۲۵٪ افزایش	۳۱۳۳۲۵
۵۰٪ افزایش	۳۲۳۳۵۰
۷۵٪ افزایش	۳۳۳۳۷۵
۱۰۰٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰
۱۵۰٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰
۲۰۰٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰

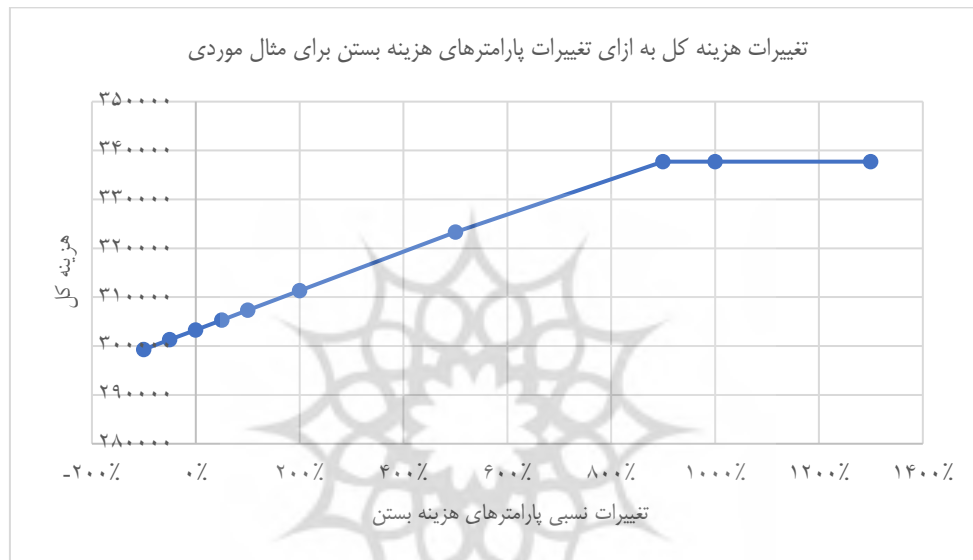


شکل ۱۴. تغییرات هزینه کل به ازای تغییرات پارامترهای هزینه بازگشایی برای مثال موردی

حساسیت پارامتر هزینه بستن. در جدول ۱۸ تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه بستن تسهیلات بر مقدار تابع هدف بهینه آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که هر چه هزینه بستن تسهیلات افزایش یابد، مقدار بهینه تابع هدف (هزینه کل) نیز افزایش می‌شابد و بالعکس. در نقطه‌ای این افزایش هزینه کل متوقف می‌شود و دیگر افزایشی مشاهده نمی‌شود. دلیل این رخداد مشابه همین رخداد در بخش تحلیل حساسیت پارامتر هزینه بازگشایی است، با این تفاوت که نقطه حدی یا خروج از بهینگی به دلیل کم بودن هزینه‌های بستن در مقایسه با بازگشایی در مقدارهای بالاتری رخ می‌دهد، که در این جا در ۹۰۰ درصد افزایش هزینه رخ داده است. همچنین این نتایج در شکل ۱۵ آورده شده است.

جدول ۱۸. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه بستن بر مقدار تابع هدف بهینه برای مثال موردی

تغییرات نسبی پارامترهای هزینه بستن تسهیلات	مقدار تابع هدف بهینه (هزینه کل)
۱۰۰٪ کاهش	۲۹۹۳۰۰
۵۰٪ کاهش	۳۰۱۳۰۰
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰
۵۰٪ افزایش	۳۰۵۳۰۰
۱۰۰٪ افزایش	۳۰۷۳۰۰
۲۰۰٪ افزایش	۳۱۱۳۰۰
۵۰۰٪ افزایش	۳۲۳۳۰۰
۹۰۰٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰
۱۰۰۰٪ افزایش	۳۳۷۷۲۰



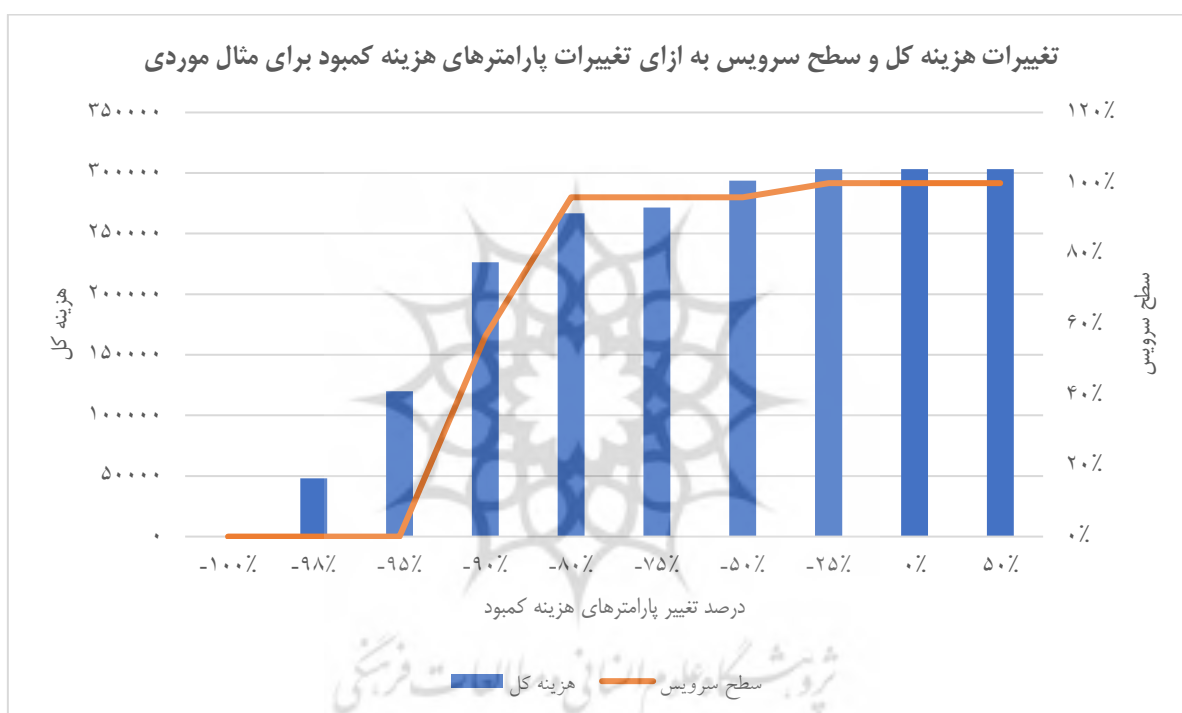
شکل ۱۵. تغییرات هزینه کل به ازای تغییرات پارامترهای هزینه بستن برای مثال موردی

حساسیت پارامتر هزینه کمبود. در جدول ۱۹ تأثیر تغییرات نسبی پارامترهای هزینه کمبود کالا بر مقدار بهینه‌ی تابع هدف (هزینه کل)

آورده شده است. لازم به ذکر است در مسائلی که هزینه کمبود در نظر گرفته می‌شود، برای داشتن بینش بهتر از عملکرد زنجیره تأمین، باید سطح سرویس نیز مشاهده و دنبال شود. به همین منظور، نتایج سطح سرویس در این بخش آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که هرچه هزینه کمبود کالا در زنجیره تأمین افزایش یابد، مقدار هزینه کل نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. این افزایش هزینه، حد نهایی دارد و حد نهایی آن زمانی رخ می‌دهد که سطح سرویس ۱۰۰ درصد شود، یعنی هزینه‌های کمبود کالا به حدی زیاد است که تصمیم بهینه مدیریت زنجیره تأمین، تأمین کالا به صورت ۱۰۰ درصدی است. از طرف دیگر اگر هزینه کمبود کالا بسیار کم باشد، در این مثال کمتر از ۹۵ درصد مقدار اصلی در مثال موردی، تصمیم بهینه برای مدیریت زنجیره تأمین عدم تخصیص کالا و پرداخت هزینه‌های کمبود است که در این حالت سطح سرویس صفر است. نتایج این بخش در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

جدول ۱۹. تأثیر تغییرات پارامترهای هزینه کمبود کالا بر مقدار بهینه تابع هدف و سطح سرویس

تغییرات نسبی پارامترهای هزینه کمبود کالا	مقدار تابع هدف بهینه (هزینه کل)	سطح سرویس
۱۰۰٪ کاهش	۰	۰
۹۸٪ کاهش	۴۸۰۰۰	۰
۹۵٪ کاهش	۱۲۰۰۰۰	۰
۹۰٪ کاهش	۲۲۶۴۰۰	۵۶/۷٪
۸۰٪ کاهش	۲۶۶۸۴۰	۹۶٪
۷۵٪ کاهش	۲۷۱۵۸۰	۹۶/۲٪
۵۰٪ کاهش	۲۹۳۷۲۰	۹۶/۳٪
۲۵٪ کاهش	۳۰۳۳۰۰	۱۰۰٪
مقدار اصلی (بدون تغییر)	۳۰۳۳۰۰	۱۰۰٪
۵۰٪ افزایش	۳۰۳۳۰۰	۱۰۰٪



شکل ۱۶. تغییرات هزینه کل و سطح سرویس به ازای تغییرات پارامترهای هزینه کمبود برای مثال موردی

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، به موضوع بازطراحی شبکه زنجیره تأمین با امکان تغییر کاربری تسهیلات پرداخته شد. در ابتدا مطرح شده که به دلیل بازار رقابتی فضای فعلی کسب‌وکار، همکاری در قالب شبکه زنجیره تأمین لازمه ادامه حیات کسب‌وکارها است و برای همکاری کارا و اثربخش میان اعضا، نیاز به مدیریت منسجم است. هدف مدیریت شبکه زنجیره تأمین، ارائه بیشترین ارزش در طول زمان است. برای تحقق این امر نیاز به هماهنگی پیوسته بین عملکرد شبکه و انتظارات از ارزش پیشنهادی به بازار است. یکی از روش‌های حفظ هماهنگی، بازطراحی مداوم و پیوسته شبکه زنجیره تأمین است. در طول زمان به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها، این هم‌ترازی تهدید می‌شود و برای پاسخ به این تهدید، بازطراحی پیشنهاد شده است. در شرایط واقعی؛ اغلب، مسئله بازطراحی زنجیره تأمین، پر استفاده‌تر از مسئله طراحی زنجیره تأمین است. برای توسعه مدل‌سازی ریاضی مسئله بازطراحی، تصمیم‌گیری کاربری تسهیلات که تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است، مورد توجه قرار گرفت. تا قبل از این پژوهش، مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین به صورت کلاسیک و لایه‌ای بود و تصمیم‌گیری کاربری به صورت عمومی در قالب کلاسیک امکان‌پذیر نبود. پس برای در نظر گرفتن این تصمیم در برنامه‌ریزی ریاضی مسئله نیاز به تغییر دیدگاه نسبت به شبکه زنجیره تأمین بود. به همین دلیل، از نگرش گراف کامل به جای گراف لایه‌ای

در مدل‌سازی ریاضی مسئله، پیشنهاد و استفاده شد. سپس با این تغییر نگرش یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی پیشنهاد شد. در ادامه، برای مدل جدید ارائه شده در این پژوهش یک مثال موردی با نرم‌افزار گمز به صورت دقیق حل و بررسی و تحلیل حساسیت شد.

نتیجه‌گیری. در گذشته، مدیران شبکه زنجیره تأمین در مواجهه با تصمیم تغییر کاربری تسهیلات در شبکه زنجیره تأمین به دلیل محدودیت‌های دیدگاه سنتی لایه برای مدل‌سازی ریاضی و بازطراحی بهینه شبکه تحت مدیریت خود با چالش روبه‌رو بوده‌اند که اکنون مدیران با کمک این مدل ابتکارانه و تغییر دیدگاه نسبت به شبکه زنجیره تأمین، امکان مواجهه با آن را دارند. به عنوان پیشنهادات مدیریتی می‌توان به لزوم بکارگیری اصول بهینه‌سازی و مدیریت زنجیره تأمین، به عنوان یک رویکرد و پارادایم جدید مدیریتی اشاره کرد. در سطح راهبردی زنجیره تأمین، به دلیل ماهیت و ابعاد گسترده‌ای که وجود دارد، هزینه‌ها زیاد بوده و بهبودهای اندک در آن منجر به افزایش مزیت رقابتی قابل توجهی برای زنجیره تأمین تحت مدیریت خواهد شد. به همین دلیل؛ به مدیران زنجیره توصیه می‌شود، برای زنجیره‌هایی که امکان تغییر کاربری تسهیلات در آن‌ها وجود دارد، با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله، جهت بهبود زنجیره تحت مدیریت خود، اقدام شود.

محدودیت‌های پژوهش. در این پژوهش برای توسعه مسئله بازطراحی، تصمیم تغییر کاربری در نظر گرفته و به مدل کلاسیک افزوده شد. لازم به ذکر است به دلیل گستردگی مسائل مربوط به بازطراحی شبکه زنجیره تأمین و همچنین محدودیت‌های کار پژوهشی تمرکز نویسندگان مقاله از لحاظ نوآوری بر روی ویژگی‌های جدید مساله بازطراحی زنجیره تأمین و همچنین چالش‌های مفصل مدل‌سازی ریاضی آن بوده است. لذا در بخش نتایج از مطالعه موردی استفاده نشده و در این بخش مثالی منطقی ایجاد و تحلیل شده است. با این وجود سعی شده است که پارامترها در بازه‌هایی تولید شوند که ابعاد و منطق مثال دارای هارمونی و هماهنگی باشد. لذا به دلیل تمرکز سنگین کار بر مدل‌سازی پیچیده‌ی ارائه شده، و همچنین محدودیت‌های پژوهش برای یافتن مطالعه‌ی موردی در واقعیت، استفاده از مثال واقعی برای پژوهشگران میسر نبوده ولیکن سعی شده است تا مثال ارائه شده بر ابعاد واقعی منطبق باشد.

پیشنهادات.

- در نظر گرفتن تصمیم تغییر کاربری برای مسائل بازطراحی با هدف تاب‌آوری و پایداری.
- در نظر گرفتن بودجه در زنجیره‌هایی که امکان تغییر کاربری دارند.
- توسعه مدل ارائه شده برای مسئله به صورت برنامه‌ریزی مقاوم.
- توسعه مدل ارائه شده برای سایر زنجیره‌ها هم‌چون زنجیره‌های حلقه بسته.
- مدل‌سازی کاربردی در صنعت و بررسی اثرات کاربرد عملی.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

1. Abdinijad, A. (1398). *Network redesign and supply chain planning during new product development under uncertainty (case study)* Iran University of Science and Technology. (in persian).
2. Alem Tabriz, A., Roghanian, E., & Hosseinzadeh, M. (2011). Design and Optimization of Inverse Logistic Network under Uncertainty Using Genetic Algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 1(2), 61-89. (in persian).
3. Aqhelan, M. (1396). *Redesigning the supply chain network to create resilience*. University of Qom. (in persian).
4. Atabaki, M. S. (1397). *Sustainable product supply chain redesign considering reverse flow under uncertainty*. Kharazmi University. (in persian).
5. Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J., Chaabane, A., & van der Vorst, J. (2015). Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme. *Journal of cleaner production*, 103, 28-39.
6. Boudahri, F., Aggoune-Mtalaa, W., Bennekrouf, M., & Sari, Z. (2013). Application of a clustering based location-routing model to a real agri-food supply chain redesign. *Advanced methods for computational collective intelligence*, 323-331.
7. Carvalho, H., Barroso, A. P., Machado, V. H., Azevedo, S., & Cruz-Machado, V. (2012). Supply chain redesign for resilience using simulation. *Computers Industrial Engineering*, 62(1), 329-341.
8. Chopra, S., & Meindl, P. (2007). Supply chain management. Strategy, planning & operation. In: Springer.

9. Faghih, N., Ranaei Kordshooli, H., Mohammadi, A., Samadi, A. H., Moosavi Haghighi, M. H., & Ghafournian, M. (2014). Mathematical Modeling of Services Supply Chain of Iran Fixed Communications by Dynamic Systems Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(1), 31-50. (in persian)
10. Fattahi, M., Govindan, K., & Keyvanshokoo, E. (2018). A multi-stage stochastic program for supply chain network redesign problem with price-dependent uncertain demands. *Computers Operations Research*, 100, 314-332.
11. Feitó-Cespón, M., Costa, Y., Pishvae, M. S., & Cespón-Castro, R. (2021). A fuzzy inference based scenario building in two-stage optimization framework for sustainable recycling supply chain redesign. *Expert Systems with Applications*, 165, 113906.
12. Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., & Cespón-Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study. *Journal of cleaner production*, 151, 206-217.
13. Gao, X., & Cao, C. (2020). A novel multi-objective scenario-based optimization model for sustainable reverse logistics supply chain network redesign considering facility reconstruction. *Journal of cleaner production*, 270, 122405.
14. Hanczar, P., & Azadehranjbar, Z. (2022). A bi-objective sustainable supply chain redesign: What effect does energy availability have on redesign? *Energies*, 15(10), 3642.
15. Hewitt, F. (1994). Supply chain redesign. *The International Journal of Logistics Management*, 5(2), 1-10.
16. Jahani, H., Abbasi, B., Alavifard, F., & Talluri, S. (2018). Supply chain network redesign with demand and price uncertainty. *International journal of production economics*, 205, 287-312.
17. Kargar, A. (1398). *Presenting a multi-objective model in order to redesign the stable reverse supply chain network - case study: Khorasan Steel Company*. University of Tehran. (in persian)
18. Khatami, M., Mahootchi, M., & Farahani, R. Z. (2015). Benders' decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties. *Transportation Research*, 79, 1-21.
19. Khosravi, A. (1396). *Redesign of dynamic closed-loop supply chain network by capacity planning and multi-period pricing*. Isfahan University of Technology. (in persian)
20. Kumar, A., Ozdamar, L., & Zhang, C. N. (2008). Supply chain redesign in the healthcare industry of Singapore. *Supply Chain Management: An International Journal*. 13(2), 95-103.
21. Kungwalsong, K., Mendoza, A., Kamath, V., Pazhani, S., & Marmolejo-Saucedo, J. A. (2022). An application of interactive fuzzy optimization model for redesigning supply chain for resilience. *Annals of Operations Research*, 315(2), 1803-1839.
22. Lewis, M., & Slack, N. (2014). *Operations strategy*. Pearson Education.
23. López, J. J. U., & Qassim, R. Y. (2023). A novel modelling approach for the redesign of supply chains: An application to soybean grain supply chains. *Research in Transportation Business & Management*, 51, 101037.
24. Lundin, J. F. (2012). Redesigning a closed-loop supply chain exposed to risks. *International journal of production economics*, 140(2), 596-603.
25. Martins, C., Melo, M., & Pato, M. (2019). Redesigning a food bank supply chain network in a triple bottom line context. *International journal of production economics*, 214, 234-247.
26. Melo, M., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2012). A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon. *International journal of production economics*, 136(1), 218-230.
27. Nagurney, A. (2010). Optimal supply chain network design and redesign at minimal total cost and with demand satisfaction. *International journal of production economics*, 128(1), 200-208.
28. Narahariseti, P. K., Karimi, I., & Srinivasan, R. (2008). Supply chain redesign through optimal asset management and capital budgeting. *Computers Chemical Engineering*, 32(12), 3153-3169.
29. Nikian, A., Khademi Zare, H., Lotfi, M. M., & Fallah Nezhad, M. S. (2023). Redesign of a sustainable and resilient closed-loop supply chain network under uncertainty and disruption caused by sanctions and COVID-19. *Operations Management Research*, 16(2), 1019-1042.
30. Pishvae, M. S. (1394). *Supply chain strategy*. Arkan Danesh Publications.
31. Talebi, D., & Iron, F. (2015). Identification of risk factors of supply chain and supplier selection with analytical network process (case: automobile industry). *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(1), 31-43. (in persian)
32. Vali-Siar, M. M., & Roghanian, E. (2020). Resilient mixed supply chain network redesign under operational and disruption risks: A case study. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 8(16), 113-135.
33. Van Der Vorst, J. G., & BEULENS, A. J. (2002). Identifying sources of uncertainty to generate supply chain redesign strategies. *International journal of physical distribution logistics management*, 32(6), 409-430.
34. Van Der Vorst, J. G., Tromp, S.-O., & Zee, D.-J. v. d. (2009). Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, 47(23).
35. Yousefi-Babadi, A., Bozorgi-Amiri, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2022). Redesigning a supply chain network with system disruption using Lagrangian relaxation: a real case study. *Soft Computing*, 26(19), 10275-10299.

36. Yousefi-Babadi, A., Bozorgi-Amiri, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Govindan, K. (2023). Redesign of the sustainable wheat-flour-bread supply chain network under uncertainty: An improved robust optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 176, 103215.
37. Zhou, L., Xu, X., Deng, S., & Liu, X. (2015). Redesigning a supply chain distribution network: formulation and genetic algorithm-based solution procedure. *International Journal of Information Technology Decision Making*, 14(04), 847-876.

