E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 8, No. 4 (2023) 1072–1090.

Paper Type: Original Article

A Multi-Objective Optimization Model to the Dynamic Facility Location in Supply Chain Network Design

Ali Abdi SeyedKolaei[1,2,*], Seyed Hadi Naseri[1,2]

[1] *Department of Applied Mathematics, University of Mazandaran, Babolsar, Iran; aabdi64@gmail.com; h.nasseri@umz.ac.ir.*

[2] *Research Center of Optimization and Logistics, University of Mazandaran, Babolsar, Iran; aabdi64@gmail.com; h.nasseri@umz.ac.ir.*

Citation:

Abdi SeyedKolaei, A., & Naseri, S. A. (2023). A multi-objective optimization model to the dynamic facility location in supply chain network design. *Journal of decisions and operations research, 8*(4), 1072-1090.

Received: 08/11/2022 Reviewed: 10/12/2022 Revised: 09/01/2023 Accepted: 22/02/2023

Abstract

Purpose: One of the fundamental problems in the field of supply chain management is the problem of supply chain design. In this problem, the goal is to determine the location for establishing a number of facilities in different geographical areas to cover customers' demands.

Methodology: The static and dynamic networks are considered to solve the problem. If the network is static, with the help of the iterated local search algorithm, the number and location of distribution centers are determined, and customers are assigned to each. If the network is dynamic, after determining the initial number and location of distribution centers and assigning customers to distribution centers, events related to network dynamics, such as customer decrease, customer increase, and variable size of demands, are investigated by customers. In addition, our proposed method considers the failure modes of network components. Also, the ability to survive the network can be seen in both network modes.

Findings: The results obtained from the experiments were analyzed regarding evaluation criteria. The results of the experiments show the superiority of the proposed method compared to the CLSC and TSCFL methods.

Originality/Value: The background investigation of the subject indicates that the design of multi-level supply chains and the issue of lesser-addressed facility locations have received less attention. In addition, facility dynamics and network survivability are not considered at the time of failure. Therefore, in this research, we have tried to reduce the cost by choosing the appropriate location of facilities and assigning customers to each of these facilities. Also, we will design the network so that it can be in a stable state and continue to operate when a network failure occurs.

Keywords: Iterated local search algorithm, Supply chain, Optimal design, Dynamic location.

Corresponding Author: aabdi64@gmail.com

Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۸، شماره (۴)، (۱۴۰۲)، ۱۰۹۰-۱۰۷۲

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی

ارایه یک مدل چندهدفه برای مکان‌یابی پویای تسهیلات در طراحی شبکه زنجیره‌تامین

علی عبدی سیدکلایی[۱،۲*]، سید هادی ناصری[۱،۲]

[۱] گروه ریاضی کاربردی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

[۲] مرکز تحقیقات بهینه سازی و لجستیک، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

چکیده

هدف: یکی از مسایل مهم در حوزه مدیریت زنجیره‌تامین، مساله طراحی زنجیره‌تامین است. در این مساله، هدف تعیین مکان برای استقرار تعدادی تسهیلات در مناطق جغرافیایی مختلف به‌منظور پوشش تقاضاهای مشتریان است.

روش‌شناسی پژوهش: برای حل این مساله، شبکه ایستا و پویا در نظر گرفته شده است. اگر شبکه ایستا باشد، با کمک الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده، تعداد و مکان استقرار مراکز توزیع مشخص می‌شود و مشتری‌ها به هر مرکز توزیع اختصاص می‌یابند. اگر شبکه پویا باشد، بعد از تعیین تعداد اولیه و مکان مراکز توزیع و تخصیص مشتری‌ها به مراکز توزیع، رویدادهای مربوط به پویایی شبکه همچون کاهش مشتری، افزایش مشتری و اندازه متغیر تقاضاها توسط مشتریان موردبررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، روش پیشنهادی حالت‌های خرابی مولفه‌های شبکه را در نظر می‌گیرد. هم‌چنین قابلیت بقای شبکه در هر دو حالت شبکه دیده می‌شود.

یافته‌ها: نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها ازلحاظ معیارهای ارزیابی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها برتری روش پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های *CLSC* و *TSCFL* نشان می‌دهد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: بررسی پیشینه موضوع نشان می‌دهد که طراحی زنجیره‌های تامین چند سطحی و موضوع مکان‌های تسهیلات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، پویایی تسهیلات و قابلیت بقای شبکه در زمان وقوع خرابی در نظر گرفته نشده است. ازاین‌رو، در این پژوهش سعی شده است تا با انتخاب مناسب مکان قرارگیری تسهیلات و اختصاص مشتری‌ها به هر یک از این تسهیلات، هزینه را کاهش دهیم. هم‌چنین، شبکه را طوری طراحی خواهیم کرد که در زمان وقوع خرابی شبکه بتواند در حالت پایدار بوده و به فعالیت خود ادامه دهد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده، زنجیره‌تامین، طراحی بهینه، مکان‌یابی پویا.

۱- مقدمه

مساله مکان‌یابی تسهیلات، شاخه‌ای از مسایل تحقیق در عملیات و هندسی محاسباتی است که هدف یافتن بهترین مکان برای تسهیلات با کاهش هزینه حمل‌ونقل است. این مساله در اوایل سال ۱۹۶۰ به دلیل رقابت‌های جهانی مورد اهمیت قرار گرفت. هدف در مساله مکان‌یابی تسهیلات، یافتن مکان بهینه برای تسهیلات و طراحی شبکه بهینه است. مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات در طراحی شبکه‌های

* نویسنده مسئول

aabdi64@gmail.com

مختلف ازجمله شبکه زنجیره‌تامین استفاده می‌شود [1]. تعیین مکان استقرار تسهیلات، نقش به‌سزایی در طراحی استراتژیک شبکه‌های زنجیره‌تامین دارد، به این دلیل که استقرار مناسب تسهیلات اثرات بسیار زیادی در منافع اقتصادی، ارایه خدمات مناسب و رضایت مشتریان دارد. ازاین‌رو، ابتدا تعداد و مکان تسهیلات تعیین می‌شود و سپس راه‌حل‌های ممکن برای ارسال محصول تا مشتری‌نهایی مشخص می‌شود. درنتیجه، مناسب‌ترین تسهیلات انتخاب می‌شود تا مشتریان بتوانند به آن‌ها متصل شوند و تقاضاها خود را ارسال نمایند. به‌طوری‌که هزینه‌های مربوط به اتصال بین مشتری و تسهیلات و هزینه استقرار تسهیلات حداقل گردد. به همین خاطر، تحلیل مساله مکان‌یابی یکی از مسایل موردعلاقه محققین در حوزه عملیات و مدیریت ازجمله در طراحی شبکه‌های زنجیره‌تامین است [2]. از نمونه کاربردهای این مساله در دنیای واقعی می‌توان به ایجاد شبکه‌های خرده‌فروشی محصولات، تعیین مکان انبارهای اصلی توسط تولیدکنندگان و مکان استقرار ایستگاه‌های آتش‌نشانی اشاره کرد. این مساله علاوه بر انتخاب مکان مناسب برای استقرار تسهیلات، بر روی بهینه‌سازی طراحی شبکه نیز تمرکز می‌کند [3]. هدف مکان‌یابی تسهیلات در شبکه زنجیره‌تامین، کاهش هزینه‌های مربوط به استقرار، حمل‌ونقل، نگهداری و سایر هزینه‌های مرتبط است. با توجه به این‌که تصمیم‌گیری درباره مکان‌یابی تسهیلات از تصمیم‌گیری‌های بلندمدت و استراتژیک شرکت‌های بزرگ می‌باشد، به دلیل هزینه‌های بالای آن، توجه به معیارهایی همچون قابلیت اطمینان و قابلیت بقا بایستی در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. منظور از قابلیت بقا، توانایی شبکه برای انجام مجموعه‌ای از وظایف تعیین‌شده با توجه به خرابی مولفه‌های شبکه است که می‌تواند با تعدادی سرویس‌های موثر در طول زمان خرابی مشخص شود. درصورتی‌که قابلیت اطمینان، توانایی شبکه برای انجام یک مجموعه از وظایف تعیین‌شده تحت شرایط خاص برای زمان‌های عملیاتی مشخص است. ازاین‌رو، برای این‌که شبکه‌ی پیاده‌سازی‌شده پایداری خود را در طول زمان خرابی داشته باشد از پارامتر قابلیت بقا استفاده می‌شود. هدف این مقاله، ارایه یک مدل ریاضی و روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی مساله مکان‌یابی تسهیلات در طراحی شبکه زنجیره‌تامین است. با تعیین تعداد مناسب و مکان بهینه برای استقرار تسهیلات در شبکه زنجیره‌تامین، هزینه‌های موجود در طراحی شبکه با در نظر گرفتن قابلیت بقا، برای برآوردن تقاضاها حداقل می‌شود. هم‌چنین، در این پژوهش سعی شده است پویایی تسهیلات در نظر گرفته شود تا به شرایط واقعی نزدیک‌تر شویم. به‌همین خاطر، تغییر برخی از پارامترها ازجمله تقاضاهای مشتریان نیز برای بهتر شدن دقت و دقت بیشت در مدل لحاظ شده است.

ادامه مقاله به‌صورت زیر بخش‌بندی شده است. در بخش ۲ کارهایی که در گذشته در خصوص مکان‌یابی تسهیلات در زنجیره‌تامین انجام‌شده است تشریح می‌گردد. بخش ۳ به بیان مساله و مدل ریاضی ارایه‌شده برای حل مساله می‌پردازد. بخش ٤ به بررسی روش پیشنهادی می‌پردازد و چارچوب کلی مربوط به آن را بیان می‌کند. در بخش ٥ آزمایش‌های انجام‌شده به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی و نتایج آن بر اساس معیارهای ارزیابی گزارش می‌گردد. درنهایت، نتیجه‌گیری مربوط به پژوهش انجام‌شده در بخش ٦ بیان می‌شود.

۲- کارهای مرتبط

مکان‌یابی و تعیین مکان مناسب برای انواع کاربری‌ها، ازجمله موضوعات مکانی و تصمیم‌گیری درباره مکان محسوب می‌شود. مدل‌ها و روش‌های متفاوتی در این حوزه وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته گسسته و پیوسته تقسیم کرد. در این مقاله، تمرکز بر روی مدل‌های گسسته است تا بتوان به‌طور مطلوب ارتباط میان مکان‌یابی تسهیلات و طراحی زنجیره‌تامین را بررسی کرد. در مساله مکان‌یابی تسهیلات گسسته، تعیین مکان استقرار تسهیلات منحصر به گزینه‌هایی محدود است. در این مقاله، مساله مکان‌یابی تسهیلات با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت موردتوجه قرار گرفته است. از مرور ادبیات مدل‌های اصلی در مکان‌یابی تسهیلات گسسته می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های اصلی و پایه‌ای گسترش و توسعه یافتند، بدون این‌که توجهی به مدیریت زنجیره‌تامین شود و ازلحاظ تاریخی، محققان بدون نگاه جامع به کلیت زنجیره‌تامین، کمی زودتر به طراحی سیستم‌های توزیع پرداخته‌اند. علاوه بر این، در بیشتر مطالعه‌ها، تمرکز روی مسایل مکان‌یابی تسهیلات سیستم‌های تک سطحی انجام شده است، درحالی‌که به‌کارگیری شبکه‌های چند سطحی در مدیریت زنجیره‌تامین بسیار مهم است. هم‌چنین، توجه به پویایی تسهیلات و قابلیت بقای شبکه در زمان وقوع خرابی مولفه‌های شبکه، امری ضروری است. ازاین‌رو، در این پژوهش سعی شده است تا با انتخاب مناسب مکان قرارگیری تسهیلات و اختصاص مشتری‌ها به هر یک از این تسهیلات، هزینه طراحی شبکه کاهش یابد. ضمنا، طراحی شبکه طوری خواهد بود که در زمان وقوع خرابی، شبکه بتواند در حالت پایدار قرار گیرد و به فعالیت خود ادامه دهد. پژوهش‌های مرتبط با طراحی شبکه زنجیره‌تامین در سه حوزه شامل۱- مکان‌یابی-تخصیص، ۲- موجودی-مکان‌یابی و ۳- تولید-توزیع مدل می‌شوند که در این مقاله، به بررسی مدل‌های مکان‌یابی-تخصیص در حوزه مکان‌یابی تسهیلات پرداخته می‌شود.

زنجیره‌تامین و مدیریت آن همواره یکی از مسایل پیچیده در صنعت بوده است که موردتوجه محققان قرارگرفته است. سویوتو و همکاران [4] برای مکان‌یابی تسهیلات در شبکه زنجیره‌تامین از روش ترکیبی جستجوی خوشه‌ای، جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی و برانچینگ محلی استفاده کردند. در این روش پیشنهادی، راه‌حل‌هایی باکیفیت بالا در کم‌ترین زمان محاسباتی پیدا می‌شوند. به همین منظور، آن‌ها آزمایش‌های محاسباتی را با استفاده از نمونه‌های بنچمارک انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که روش پیشنهادی آن‌ها در ٤٠ نمونه از ٥٠ نمونه مورد آزمایش بهتر عمل می‌کند. بال و همکاران [5] برای بهینه‌سازی موقعیت تسهیلات از یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده کردند که در این مدل، معیارهای اجتماعی، محیطی و اقتصادی در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل، زمان بین جمع‌آوری محصولات و زمان رسیدن آن‌ها به بازارهای ثانویه به‌عنوان اهداف با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوطه فرموله شده است. این مدل برای بخش‌های مختلف، مانند تولید لوازم‌خانگی یا الکترونیک، قابل‌استفاده است. ژن و همکاران [2] بر روی حل مساله تصمیم‌گیری در سطح استراتژیک برای تعیین مکان بهینه تولیدکنندگان و مراکز لجستیک تمرکز کردند. آن‌ها در این کار از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلف تصادفی دومرحله‌ای برای کاهش هزینه‌ها استفاده کردند. آن‌ها هم‌چنین از الگوریتم اکتشافی جستجوی تابو بهبودیافته برای حل مدل استفاده کردند و یک قانون تصمیم‌گیری مبتنی بر فاصله طراحی کردند تا کارایی مدل پیشنهادی ارزیابی کنند.

ایراوان و همکاران [6] در تحقیق خود بر روی حل مساله مکان‌یابی تسهیلات چند محصولی در یک زنجیره‌تامین دومرحله‌ای تمرکز کردند. آن‌ها از دو مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای حداقل کردن هزینه‌های انبار و حمل‌ونقل استفاده کردند. در مدل اول، ظرفیت انبار بر اساس حداکثر تعداد هر محصول قابل ذخیره است، درحالی‌که در مدل دوم، ظرفیت با اندازه انبار تعیین می‌شود. آن‌ها هم‌چنین در پژوهششان، برای حل مسایل بزرگ‌تر از الگوریتم فرا ابتکاری بهره بردند. داس و همکاران [7] نیز در تحقیق خود به حل مساله مکان‌یابی حمل‌ونقل جامد پرداختند و هدف از حل این مساله، کاهش کل هزینه حمل‌ونقل بود. آن‌ها دو الگوریتم اکتشافی را برای حل مساله در نظر گرفتند که یکی از آن‌ها، الگوریتم اکتشافی تخصیص مکان و دیگری الگوریتم اکتشافی تقریبی است. کوتس و همکاران [8] نیز یک مدل مکان‌یابی تسهیلات برای در نظر گرفتن منابع در آماده‌سازی برای بلایا ارایه کردند. در این مدل، هزینه‌های محرومیت در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، این مدل سعی می‌کند تا هزینه‌های اجتماعی را به‌عنوان مجموع هزینه‌های خصوصی و هزینه‌های محرومیت به حداقل برساند. گلپیرا و همکاران [9] با استفاده از سیستم خبره، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارایه کردند که جهت ادغام استراتژی موجودی در طراحی و تسهیلات شبکه زنجیره‌تامین بکار گرفته می‌شود. یحیی و همکاران [10] به حل مساله طراحی شبکه لجستیک امدادی تحت عدم قطعیت بازه‌ای و خطر اختلال در تسهیلات پرداختند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد کردند که اختلال در مرکز توزیع، پشتیبانی از مرکز توزیع مختل شده توسط طرح پشتیبان، مسایل تامین و تخلیه و درنهایت کاهش تاثیر اختلال توسط سرمایه‌گذاری را در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، آن‌ها در کارشان روش بهینه‌سازی برای محافظت در برابر محیط‌های نامشخص ارایه کردند.

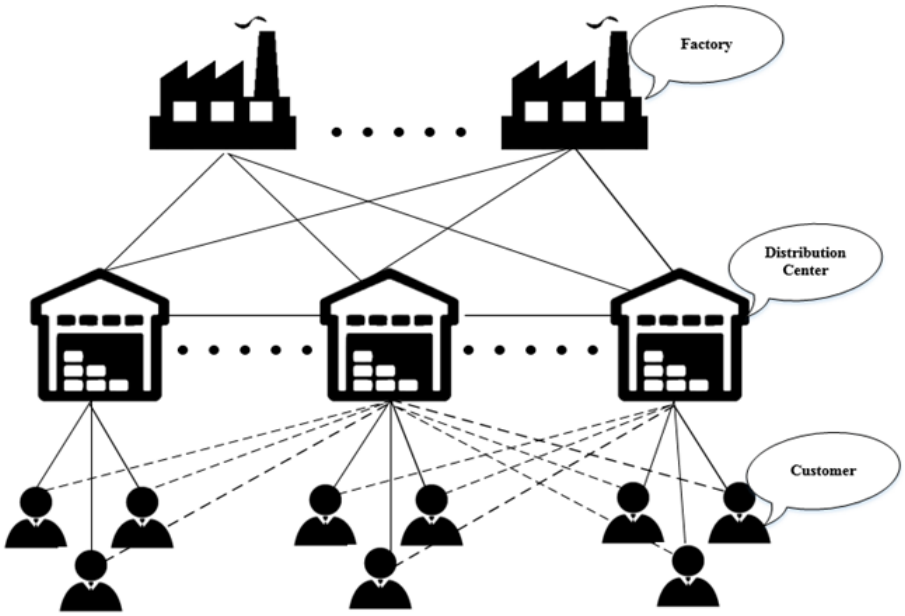
براهمی و همکاران [11] در مورد طراحی شبکه زنجیره‌تامین پایدار با ادغام هم‌زمان تصمیمات استراتژیک مربوط به مکان‌یابی تاسیسات و طراحی شبکه حمل‌ونقل صحبت کردند. آن‌ها از مدل ریاضی چندهدفه برای کاهش هزینه و اثرات زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های حمل‌ونقل استفاده کردند. هم‌چنین، آن‌ها در این تحقیق از یک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامطلوب با استفاده از کدگذاری مختلط برای حل موثر مدل پیشنهادی بهره بردند. رامشنی و همکاران [12] نیز در تحقیقشان زنجیره توزیع دوسطحی را موردبررسی قراردادند که در آن جریان از واحد تولید شروع می‌شود، از مراکز توزیع می‌گذرد و سپس به سطح مشتری ختم می‌شود. آن‌ها در پژوهششان یک زنجیره توزیع تک کالا را در نظر گرفته‌اند که اجزای آن به‌استثنای مشتریان در معرض خرابی ناشی از بلایا هستند. در این تحقیق، دو مدل ریاضی و یک الگوریتم جستجوی تابو و یک الگوریتم اکتشافی خاص مساله برای حل مساله ارایه شده است. کیا و همکاران [13] به موضوع طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین موثر برای سیستم توزیع خون باهدف برآورد نیازهای بیمارستان‌ها پرداخته است. آن‌ها درروش پیشنهادی‌شان از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای تعیین انتخاب بهینه بانک‌های خون، اختصاص بیمارستان‌ها به بانک‌ها، سطوح بهینه موجودی در هر بانک خون و تصمیم‌گیری مسیریابی در میان تسهیلات به‌منظور حداقل‌سازی هزینه‌های کل سیستم بهره بردند.

مطالعه‌های کمی در زمینه مکان‌یابی تسهیلات چند سطحی با هدف کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی و بهبود قابلیت بقا در زمان رویداد خرابی عناصر شبکه انجام شده است. با این‌حال، این مقاله با در نظر گرفتن پویایی شبکه می‌تواند بررسی بیشتری در این زمینه پوشش دهد. چراکه پویایی شبکه در محیط‌های واقعی طبیعی است و حالت‌های متفاوت خرابی که در شبکه به وقوع خواهد پیوست در این مقاله لحاظ خواهد شد.

۳- روش پیشنهادی

آن‌چه مسلم است، ارتباط نزدیکی بین طراحی و مدیریت جریان مواد، اطلاعات و پول با موفقیت زنجیره‌تامین وجود دارد؛ بنابراین، وجود یک زنجیره‌تامین کارا و مناسب، رشد و ارتقای سازمان‌ها را در پی دارد و در نقطه مقابل، طراحی ضعیف و نامناسب آن، مسلما بقای سازمان را مورد تهدید می‌کند. به همین دلیل، طراحی زنجیره‌تامین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در مدیریت زنجیره‌تامین محسوب می‌شود. تعیین مکان و تعداد بهینه مراکز توزیع و هم‌چنین چگونگی تخصیص مشتریان به هر یک از آن‌ها مهم‌ترین مسایل در طراحی شبکه توزیع می‌باشد. این مساله در زمره مسایل مکان‌یابی گسسته تسهیلات که یکی از زیرشاخه‌های اصلی در حوزه مکان‌یابی تسهیلات است، قرار می‌گیرد. به‌منظور توصیف مساله مکان‌یابی تسهیلات در شبکه زنجیره‌تامین، شبکه زنجیره به‌صورت یک گراف مدل شده است. درروش پیشنهادی، چندین هدف در نظر گرفته شده‌اند که این اهداف شامل کاهش هزینه و بهبود قابلیت بقا هستند.

در ابتدا، مساله مکان‌یابی تسهیلات با استفاده از روش پیشنهادی در مرجع [14] با فرض در حالت ایستا بودن شبکه حل می‌شود. همان‌طور که در **شکل ۱** نشان داده‌شده است، معماری پیشنهادی به‌صورت یک شبکه زنجیره‌تامین دوسطحی است که در سطح اول، هر کارخانه محصولات خود را به مراکز توزیع ارسال می‌نماید. در سطح دوم، محصول‌ها از طریق مراکز توزیع به دست مشتریان می‌رسند. به دلیل وسعت بازار محصولات، برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، مکان‌هایی به‌منظور استقرار مراکز توزیعی در نظر گرفته‌شده است. در این مساله، مراکز توزیع به‌عنوان مکان‌هایی هستند که تسهیلات در اختیار مشتریان قرار می‌دهند. ازاین‌رو، برای حل مساله تعدادی از مکان‌ها برای استقرار مراکز توزیعی انتخاب شوند. استقرار این مراکز دارای هزینه ثابت است. علاوه بر این، ظرفیت این مراکز برای بررسی تقاضاهای مشتریان محدود است.



شکل ۱- سیستم توزیع دوسطحی در مساله زنجیره‌تامین.

Figure 1- Two-level distribution system in supply chain problem.

در ادامه برای حالت پویایی شبکه، رویدادهایی که منجر به پویایی شبکه می‌شوند، شرح داده‌شده و راه‌حل‌هایی با رعایت محدودیت‌های مدل ریاضی مساله ارایه می‌شود. هم‌چنین، در این تحقیق، رویدادهایی که به وقوع خرابی می‌انجامد، در معماری پیشنهادی و مدل ریاضی مساله مدنظر قرار گرفته‌اند. در نتیجه، سناریوی پیشنهادی در این مقاله، به شرح زیر است.

گراف شبکه در این مدل، شامل مشتریان، مراکز توزیع و کارخانه‌ها است. برای تعیین مکان مناسب برای استقرار مراکز توزیع، باید از بین گره‌های شبکه انتخاب شود و مشتریان باید به مراکز توزیع جهت تامین محصولات خود اختصاص داده شوند. کارخانه‌ها به‌عنوان تامین‌کننده نیازهای مراکز توزیع به هر یک از این مراکز متصل می‌شوند. به‌طور مستقیم، کارخانه محصول را به مشتری ارسال نمی‌کند. در صورت وقوع خرابی، مراکز توزیع می‌توانند با یکدیگر در ارتباط باشند و محصولات را بین خود مبادله کنند تا بتوانند در زمان وقوع خرابی، محصولات را به سایر مراکز توزیع دارای ظرفیت انتقال داد. ظرفیت مراکز توزیع برای رضایت بخشی تقاضاهای مشتریان کافی

است و در صورت بروز مشکل در مسیر حمل‌ونقل بین مشتری و مرکز توزیع، از مراکز توزیع پشتیبان استفاده می‌شود. هم‌چنین، در صورت بروز مشکل در مسیر بین مراکز توزیع، از مسیرهای مجزا استفاده می‌شود. علاوه بر این، در زمان عدم فعالیت مرکز توزیع، از مراکز توزیع پشتیبان برای برآوردن نیازهای مشتریان استفاده می‌شود.

۳-۱- مدل ریاضی مساله

در این بخش، مساله مکان‌یابی تسهیلات در شبکه زنجیره‌تامین به‌صورت یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط تعریف می‌شود. مدل ریاضی ارایه شده در این مقاله، توسعه‌یافته مدل ریاضی بیان‌شده در مقاله [15] است. شبکه به شکل یک گراف $G(N,A)$ در نظر گرفته‌شده است. N و A به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه گره‌های شبکه و یال‌های بین گره‌ها است. همان‌طور که در **شکل ۱** نشان داده‌شده است، مجموعه N متشکل از کارخانه‌ها، مکان‌های ممکن برای استقرار مراکز توزیع و مشتریان است که در مدل ریاضی مساله به ترتیب با نمادهای F، P و C نشان داده می‌شود. مجموعه A نیز شامل سه مجموعه A_F، A_P و A_C است به‌طوری‌که

$$A_F = \{ij \in A | i \in F, j \in P\}, \quad (۱)$$

$$A_P = \{ij \in A | i, j \in P\}, \quad (۲)$$

$$A_C = \{ij \in A | i \in C, j \in P\}. \quad (۳)$$

در این مدل، یک یال از i به j به‌صورت ij نمایش داده می‌شود. سایر مجموعه‌های تعریف‌شده در مدل ریاضی مساله عبارت‌اند از O و D است که به ترتیب بیانگر مجموعه زوج مرتب و مجموعه انواع مراکز توزیع است که به‌صورت زیر توصیف می‌شود:

$$O = \{(i, j) : i \in P, j \in P, i < j\}, \quad (۴)$$

$$D = \{d_1, d_2, ...\}. \quad (۵)$$

با توجه به محدودیت ظرفیت مراکز توزیع، چندین مشتری می‌توانند به‌وسیله یک مرکز توزیع مدیریت شوند. هم‌چنین در این گراف، هر مرکز توزیع با سایر مراکز توزیع دیگر در ارتباط است. پارامترهای بکار رفته در مدل به شرح ذیل است:

ω_{ij} : هزینه انتقال یک محصول از i به j.

β_d : هزینه مرکز توزیع نوع d.

α_d : ظرفیت مرکز توزیع نوع d.

D_c: مقدار تقاضای مشتری c.

M: عدد بزرگ اختیاری.

درنهایت، تعریف متغیرهای تصمیم به‌صورت زیر است:

X_{ij}: یک متغیر باینری است؛ اگر یال (i,j) انتخاب‌شده است مقدار یک در غیر این‌صورت مقدار صفر.

Z_{dp}: یک متغیر باینری است؛ اگر مرکز توزیع نوع d در مکان p استقراریافته باشد مقدار یک در غیر این‌صورت مقدار صفر.

V^{pq}_{ij}: یک متغیر باینری است؛ اگر یک واحد جریان از مرکز توزیع p به مرکز توزیع q از یال (i,j) عبور می‌کند مقدار یک در غیر این صورت مقدار صفر.

Y_{ij}: مقدار محصول حمل شده از i به j.

فرضیه‌های در نظر گرفته‌شده در این مقاله به شرح زیر است:

عبدی سیدکلایی و ناصری / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲، صفحه: ۱۰۹۰-۱۰۷۲

- مکان قرارگیری مراکز توزیع از پیش تعیین‌شده است که در هر یک از این مکان‌ها امکان استقرار یک مرکز توزیع وجود دارد.
- تعداد سطوح در نظر گرفته‌شده دو سطح است که شامل کارخانه، مراکز توزیع و مشتریان است. محل استقرار مشتریان از قبل مشخص بوده ولی مراکز توزیع بایستی مکان‌یابی گردند.
- هر یک از مراکز توزیع دارای ظرفیت محدود بوده که از پیش تعیین‌شده‌اند.
- مکان‌یابی مجدد تسهیلات درصورتی‌که تسهیلات یک‌بار پیش‌ازاین استقراریافته امکان‌پذیر است.
- تمامی تقاضای مشتریان از یک مرکز توزیع تامین می‌شود.

در ادامه مدل ریاضی مساله به همراه نمادهای تعریف‌شده در این مدل بیان می‌گردد.

$$Min \quad \sum_{d\in D}\beta_d \sum_{p\in P} Z_{dp} + \sum_{ij\in A} X_{ij}\omega_{ij}Y_{ij}, \tag{۶}$$

$$V_{ij}^{pq} - \sum_{ji\in A_P} V_{ji}^{pq} = \begin{cases} \sum_{d\in D}(Z_{dp} * Z_{dq}), & i == p, \\ -\sum_{d\in D}(Z_{dp} * Z_{dq}), & i == q;\ for\ all\ i\in P,\ for\ all\ pq\in O. \\ 0, & i\neq p,q, \end{cases} \tag{۷}$$

$$\sum_{\substack{j\in P \\ ij\in A_C}} X_{ij} = 1;\ for\ all\ i\in C. \tag{۸}$$

$$X_{ij} \le \sum_{d\in D} Z_{dj};\ for\ all\ ij\in A_C, i\in C, j\in P. \tag{۹}$$

$$Y_{ij} \le M;\ for\ all\ ij\in A. \tag{۱۰}$$

$$\sum_{d\in D} Z_{dp} \le 1;\ for\ all\ p\in P. \tag{۱۱}$$

$$X_{fp} == \sum_{d\in D} Z_{dp};\ for\ all\ f\in F, p\in P. \tag{۱۲}$$

$$\sum_{c\in C} D_c X_{cp} \le \sum_{d\in D} \alpha_d Z_{dp};\ for\ all\ p\in P. \tag{۱۳}$$

$$\sum_{d\in D} Z_{dp} + \sum_{d\in D} Z_{dq} \le X_{pq} + 1;\ for\ all\ p\in P;\ for\ all\ q\in P, q < p. \tag{۱۴}$$

$$Z_{dp} \in \{0,1\};\ for\ all\ d\in D;\ for\ all\ p\in P. \tag{۱۵}$$

$$X_{ij} \in \{0,1\};\ for\ all\ ij\in A. \tag{۱۶}$$

$$V_{ji}^{pq} \in \{0,1\};\ for\ all\ ij\in A_P;\ for\ all\ pq\in O. \tag{۱۷}$$

$$Y_{ij} \ge 0;\ for\ all\ ij\in A. \tag{۱۸}$$

در مدل ریاضی بیان‌شده، **معادله (٦)** نشان‌دهنده تابع هدف مساله است. این تابع از دو بخش تشکیل‌شده است که در بخش اول، هزینه استقرار مرکز توزیع و در بخش دوم، هزینه انتقال محصول از کارخانه به مرکز توزیع، هزینه انتقال محصول از مرکز توزیع به مشتری و هزینه انتقال محصول از مرکز توزیع به دیگر مراکز توزیع با در نظر گرفتن مقدار محصول، محاسبه می‌شود. **محدودیت (۷)** بیان می‌کند که هر دو مکان دارای تسهیلات مرکز توزیع با یکدیگر در ارتباط هستند. این محدودیت اطمینان می‌دهد که بین هر دو مکان p و q که مراکز توزیع در آن‌ها استقراریافته است یک مسیر متصل وجود دارد. دلیل وجود این محدودیت این است که در صورت خرابی مسیرهای ارتباطی بین مرکز توزیع، بتوان از سایر مسیرها برای ارسال محصولات استفاده نمود. **محدودیت‌های (۸)** و **(۹)** به ترتیب، بیانگر محدودیت ارتباط هر مشتری تنها به یک مرکز توزیع و تخصیص مشتری به مکان‌های دارای مراکز توزیع است. در **محدودیت (۸)**، می‌توان با توجه به شرایط تعطیلی مراکز توزیع، در نظر گرفت که مشتری‌ها به تعداد بیشتری از مراکز توزیع متصل شوند. هم‌چنین، **محدودیت (۹)** بیان می‌کند که مشتری‌ها نمی‌توانند از مکان‌هایی که مرکز توزیعی ندارند، محصول دریافت کنند. به عبارتی، مشتری‌ها تنها با مکان‌هایی که دارای مراکز توزیع هستند، ارتباط دارند. رعایت مقدار محصول حمل‌شده بین دو مکان با **محدودیت (۱۰)** بیان می‌شود. به این معنی که محصول ارسالی از یک مکان به مکان دیگر نباید از حداکثر مقدار تعیین‌شده بیشتر باشد. **محدودیت (۱۱)** بیان می‌کند که حداکثر یک مرکز توزیع می‌تواند در یک مکان استقرار یابد. این امر به دلیل این‌که توزیع تسهیلات به‌صورت پراکنده در کاهش هزینه شبکه تاثیر به‌سزایی دارد و استقرار چندین مرکز توزیع در یک مکان ممکن است موجب افزایش هزینه برای ارسال محصول به مشتری‌های مستقر در مکان‌های دورتر گردد. با توجه به تنوع محصولات و این‌که مشتری‌ها بتوانند از این تنوع بهره‌مند شوند نیازمند

وجود انواع محصولات در مراکز توزیع است. ازاین‌رو، مراکز توزیع نیز باید بتوانند از تمامی کارخانه‌های تولیدکننده محصولات، انواع این محصولات را دریافت نمایند؛ بنابراین، رعایت **محدودیت (۱۲)** جهت دست‌یابی به این هدف لازم است. **محدودیت (۱۳)** بیان می‌کند که مجموع تقاضاهای ارسالی مشتریان به یک مرکز توزیع نباید از حداکثر ظرفیت آن بیشتر باشد؛ زیرا عدم رعایت این محدودیت باعث عدم تعادل بار در شبکه خواهد شد و مراکز توزیعی که هیچ تقاضایی از مشتری نداشته باشند، تنها هزینه استقرار مرکز توزیع را به شبکه تحمیل می‌کنند، بدون آن‌که نیاز مشتری برآورده گردد. به‌منظور ارسال محصولات از یک مرکز توزیع به سایر مراکز جهت برآوردن نیاز مشتری، رعایت **محدودیت (۱٤)** الزامی است؛ زیرا در زمان‌هایی که یک مرکز توزیع محصول موردنیاز مشتری خود را نداشته باشد، باید از سایر مراکز نزدیک خود آن را تهیه نماید. **معادله (۱۵)** تا **معادله (۱۷)** نشان‌دهنده مقادیر باینری هستند که متغیرهای تصمیم با آن‌ها مقداردهی می‌شوند. درنهایت، **محدودیت (۱۸)** برای متغیر تصمیم نامنفی لحاظ شده است. درصورتی‌که راه‌حلی به‌دست‌آمده به‌عنوان یک‌راه حل قابل‌قبول در نظر گرفته شود، هر یک از متغیرهای مدل ریاضی مساله با توجه به مقداردهی انجام‌شده باید **محدودیت (۷)** تا **محدودیت (۱٤)** را رعایت کنند.

عبارت $\sum_{d\in D}(Z_{dp}{}^{*}Z_{dq})$ در **معادله (۷)** موجب غیرخطی شدن این محدودیت می‌شود. به همین دلیل، برای خطی کردن آن از روش *McCormick* به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$t_{pq} = \sum_{d\in D}(Z_{dp}{}^{*}Z_{dq}). \qquad (۱۹)$$

q یک متغیر باینری است که بیانگر استقرار هم‌زمان مرکز توزیع هم در مکان p و هم در مکان q است؛ بنابراین، معادله بالا می‌تواند به‌صورت زیر اصلاح شود:

$$\begin{cases} t_{pq} \le min(\sum_{d\in D} Z_{dp}, \sum_{d\in D} Z_{dq}), \\ t_{pq} \ge max(0, \sum_{d\in D} Z_{dp} - (1 - \sum_{d\in D} Z_{dq}); \ for\ all\ pq \in O. \end{cases} \qquad (۲۰)$$

به‌طور معادل

$$\begin{cases} t_{pq} \le \sum_{d\in D} Z_{dp}, \\ t_{pq} \le \sum_{d\in D} Z_{dq}; \ for\ all\ pq \in O, \\ t_{pq} \ge \sum_{d\in D} Z_{dp} - (1 - \sum_{d\in D} Z_{dq}). \end{cases} \qquad (۲۱)$$

درنتیجه، مدل ریاضی مساله به شرح زیر اصلاح می‌گردد:

$$Min \sum_{d\in D}\beta_d \sum_{p\in P} Z_{dp} + \sum_{ij\in A} X_{ij}\omega_{ij},$$

(۱۸)-(۸)

$$\sum_{ij\in A_P} V_{ij}^{pq} - \sum_{ji\in A_P} V_{ji}^{pq} = \begin{cases} t_{pq} & i == p, \\ -t_{pq} & i == q; \ for\ all\ i \in P; \ for\ all\ pq \in O, \\ 0 & i \ne p,q, \end{cases} \qquad (۲۲)$$

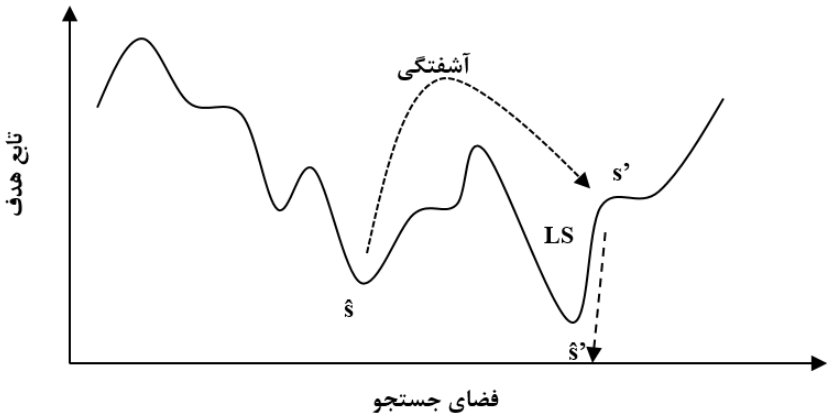
$$\begin{cases} t_{pq} \le \sum_{d\in D} Z_{dp}, \\ t_{pq} \le \sum_{d\in D} Z_{dq}; \ for\ all\ pq \in O, \\ t_{pq} \ge \sum_{d\in D} Z_{dp} - (1 - \sum_{d\in D} Z_{dq}). \end{cases} \qquad (۲۳)$$

$$t_{pq} \in \{0,1\}; \ for\ all\ pq \in O. \qquad (۲۴)$$

۳-۲- الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده

در بهینه‌سازی ریاضی، جستجوی محلی به الگوریتمی تکراری و بهبوددهنده گفته می‌شود که طی آن با شروع از یک جواب آغازین و در هر تکرار، جواب‌های "مجاور" به جواب جاری برای یافتن جوابی مطلوب‌تر ازنظر هزینه جستجو می‌شوند. در صورت موفقیت دریافتن چنین جوابی، جواب جاری به‌روزرسانی شده و تکراری دیگر برای جستجو در مجاورت جواب مطلوب، آغاز می‌شود. در غیر این صورت، جستجوی محلی با معرفی بهترین جواب یافته شده خاتمه می‌یابد. در چنین الگوریتمی، مفهوم مجاورت برگرفته از تعریف ساختار همسایگی روی هر جواب از مساله است. همسایگی یک جواب داده‌شده، معمولا مجموعه‌ای از جواب‌های مساله است که با اعمال یک یا چند حرکت از سوی جواب داده‌شده به دست می‌آیند. مفهوم حرکت در بحث‌های پیش رو به‌دقت تعریف خواهد شد.

یک الگوریتم جستجوی محلی، اغلب با معرفی یک جواب بهینه موضعی خاتمه می‌یابد. یک ایده‌ی ساده برای فرار از بهینگی موضعی، تکرار هوشمندانه جستجوی محلی است که با شروع از جواب‌های آغازین متفاوت، به پراکنده ساختن فرآیند جستجو در فضای جواب مساله کمک می‌کند. این الگوریتم به‌عنوان الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده[1] [16] شناخته می‌شود. به‌صورت دقیق، در هر تکرار الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده، جواب جاری به کمک روش‌هایی، مثل طرح‌های آشفتگی، به‌روزرسانی می‌شود و سپس با استفاده از جستجوی محلی بهبودیافته، جوابی جدید به دست آید. اگر جواب جدید از جواب جاری مساله مناسب‌تر باشد، الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده با جواب جدید ادامه می‌یابد، در غیر این صورت الگوریتم با جواب جاری قبلی ادامه می‌یابد. **شکل ۲** یک مرحله از الگوریتم *ILS* را نشان می‌دهد که در آن کمینه محلی $\hat{s}$ دچار آشفتگی شده و جواب s' از آن به دست می‌آید، سپس جستجوی محلی اعمال‌شده و کمینه محلی جدید $\hat{s}'$ یافت می‌شود.



شکل ۲- یک مرحله از الگوریتم ILS.

Figure 2- One step of the ILS algorithm.

ساختار کلی الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده به شرح زیر است:

گام ۱- با شروع از یک جواب آغازین، روش جستجوی محلی را برای یافتن جواب جاری اجرا کنید.

گام ۲- اگر شرط خاتمه مشاهده‌شده است و بهترین جواب یافته شده معرفی شده است، الگوریتم را به پایان برسانید؛ در غیر این صورت، به گام بعدی بروید.

گام ۳- با استفاده از طرح‌های به‌روزرسانی و آشفتگی، جواب جاری را به‌روزرسانی کنید.

گام ۴- با انجام جستجوی محلی بر روی جواب جاری، جواب جدیدی را به دست آورید. اگر جواب جدید، بهتر از جواب جاری باشد، جواب جاری را با جواب جدید به‌روزرسانی کرده و به **گام ۲** بروید.

[1] Iterated Local Search (ILS)

۱-۲-۳- جواب اولیه

فرآیند پیدا کردن جواب اولیه در سه مرحله صورت می‌پذیرد. در مرحله اول بر اساس توپولوژی‌های شبکه، یک حد آستانه بین بازه صفر و یک تعریف می‌شود. با توجه به تعداد مکان‌های ممکن برای استقرار مرکز توزیع در هر توپولوژی، برای هر مکان یک عدد تصادفی بین بازه صفر و یک تولید می‌شود. اگر مقدار تصادفی تولیدشده برای هر مکان از حد آستانه بیشتر باشد، آنگاه مکان برای استقرار مرکز توزیع انتخاب می‌گردد. سپس مرکز توزیع در مکان‌های انتخاب‌شده استقرار می‌یابد. در مرحله دوم، مشتری‌ها به نزدیک‌ترین مکان دارای مرکز توزیع با رعایت **محدودیت (۱۳)** تخصیص می‌یابند. درنهایت در مرحله سوم، مرکز توزیع از مکان‌هایی که هیچ مشتری به آن‌ها تخصیص داده نشده است، در صورت وجود، حذف می‌گردد.

۲-۲-۳- جستجوی محلی در فضای جواب

در این بخش، الگوریتم جستجوی محلی به‌منظور تعیین توپولوژی بهینه شبکه مطرح می‌شود. بیان یک الگوریتم جستجوی محلی، نیازمند تعریف یک ساختار همسایگی مناسب و تعیین مکانیزم حرکت از یک جواب به جواب همسایه در فضای جواب است. در ادامه، انواع حرکت‌هایی که در بین جواب‌های این مساله صورت می‌گیرد، بیان می‌شود.

حرکت نوع ۱: یک‌راه حل S^* و یک مشتری c در نظر گرفته می‌شود. با فرض این‌که مشتری c به مرکز توزیع مستقر در مکان p متصل است. مشتری c به مکان دیگری، p'، متصل می‌گردد. اگر در مکان p' مرکز توزیع استقرار نیافته باشد، یک مرکز توزیع از نوع d در آن مکان استقرار می‌یابد و سپس مشتری به آن متصل می‌شود. علاوه بر این، اگر بعد از اتصال مشتری c به مکان p' هیچ مشتری به مکان p متصل نشود مرکز توزیع مستقر در مکان p حذف می‌شود.

حرکت نوع ۲: یک‌راه حل S^* و دو مشتری c و c' در نظر گرفته می‌شوند. با فرض این‌که مشتری‌های c و c' به ترتیب به مراکز توزیع مستقر در مکان p و p' متصل هستند. مشتری c به مکان p' و مشتری c' به مکان p متصل می‌گردند.

حرکت نوع ۳: یک‌راه حل S^* با یک مرکز توزیع از نوع d در نظر گرفته می‌شود. با فرض این‌که مرکز توزیع نوع d در مکان p قرار دارد و مشتری c به آن متصل است. مرکز توزیع از نوع d از مکان p حذف و به مکان p' منتقل می‌شود. سپس تمام مشتری‌های متصل به مکان p به مکان p' باز تخصیص می‌یابند.

حرکت نوع ٤: یک‌راه حل S^* با یک مرکز توزیع از نوع d و یک مشتری c در نظر گرفته می‌شود. با فرض این‌که مشتری c به مرکز توزیع از نوع d در مکان p متصل است. مرکز توزیع از نوع d در مکان p حذف و مشتری c به نزدیک‌ترین مکان دارای مرکز توزیع متصل می‌شود.

یک حرکت از انواع فوق در جواب جاری به‌عنوان یک حرکت مطلوب در نظر گرفته می‌شود درصورتی‌که مقدار تابع هدف را کاهش دهد. یعنی مقدار تفاضل هزینه جواب جاری از هزینه جواب همسایه جدید مثبت باشد. در این صورت همسایه به‌دست‌آمده از این حرکت را همسایه مطلوب نامیده می‌شود.

با توجه به روش‌های مختلف حرکت در ساختار یک جواب، گام‌های یک روش جستجوی محلی به شرح زیر است:

گام ۱ – یک جواب اولیه یافته و آن به‌عنوان جواب جاری در نظر گرفته می‌شود.

گام ۲– درصورتی‌که حرکت مطلوب یافت شد، جواب جاری با جواب همسایه مطلوب به‌روزرسانی می‌شود و به ابتدای **گام ۲** بازمی‌گردد. در غیر این صورت، با ارایه جواب جاری، جستجو به پایان می‌رسد.

روند جستجوی محلی در الگوریتم فوق به‌اختصار حلقه جستجو نامیده می‌شود. مدت‌زمان اجرای الگوریتم جستجوی محلی به همسایگی جواب جاری بستگی دارد. به همین منظور، برای کنترل زمان اجرا، تعداد حرکت‌های انجام‌شده در این الگوریتم به مقدار مشخصی همچون L محدود می‌شود. انتخاب حریصانه هر یک از انواع حرکت‌ها، جواب جاری را به جواب‌های بهینه محلی نزدیک می‌کند.

۳-۲-۳- طرح‌های آشفته سازی جواب

تکرارهای فراوان حلقه جستجو، که در الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده پیش‌بینی‌شده، تاثیر نامطلوبی در زمان اجرای آن دارد. یک ایده اساسی در چنین شرایطی، اجرای هدفمند حلقه جستجو است. درصورتی‌که بتوان اجرای یک حلقه جستجو را بر روی قسمت خاصی از فضای جواب متمرکز کرد، اغلب به تعداد کمتری حرکت برای یافتن جواب‌های مناسب در آن قسمت نیاز است. یکی از روش‌های رسیدن به این اهداف، استفاده از طرح‌های آشفتگی جواب مساله است. طرح‌های آشفتگی که بر روی یک جواب جاری اعمال می‌شود به شرح زیر است:

آشفتگی نوع ۱: به‌طور تصادفی مکانی را انتخاب کرده که تنها یک مشتری به آن متصل است. این مکان با p نام‌گذاری می‌شود. سپس، مرکز توزیع از مکان p حذف و مشتری به نزدیک‌ترین مرکز توزیع متصل می‌شود. مکان p در اجرای بعدی حلقه جستجو قفل خواهد بود و هیچ مرکز توزیع نمی‌تواند در آن استقرار یابد.

آشفتگی نوع ۲: یک مکان فاقد مرکز توزیع به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. این مکان با p نام‌گذاری می‌شود. سپس، از میان تمام مشتری‌ها آن‌هایی که به مکان p نزدیک‌تر هستند، باز تخصیص می‌یابند. مکان p در اجرای بعدی حلقه جستجو قفل خواهد بود و هیچ مرکز توزیع نمی‌تواند از آن حذف گردد.

آشفتگی نوع ۳: یک مکان دارای مرکز توزیع و یک مکان فاقد مرکز توزیع به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. این مکان‌ها به ترتیب با p و p' نام‌گذاری می‌گردند. سپس، مرکز توزیع از مکان p حذف و به مکان p' تخصیص می‌یابد. علاوه بر این، مشتری‌های متصل به مکان p به مکان p' باز تخصیص می‌یابند. در مرحله بعد اجرای حلقه، مکان‌های p و p' قفل می‌شوند.

آشفتگی نوع ٤: یک مکان دارای مرکز توزیع و دو مکان فاقد مرکز توزیع به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. این مکان‌ها به ترتیب p، p' و p'' نام‌گذاری می‌گردند. سپس، مرکز توزیع مستقر در مکان p حذف و در مکان‌های p' و p'' مرکز توزیع استقرار می‌یابد. مشتری‌های متصل به مکان p به نزدیک‌ترین مکان بین p' و p'' تخصیص داده می‌شوند. در مرحله بعد اجرای حلقه، مکان‌های p، p' و p'' قفل می‌شوند.

آشفتگی نوع ٥: دو مکان دارای مرکز توزیع و یک مکان فاقد مرکز توزیع به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. این مکان‌ها به ترتیب p، p' و p'' نام‌گذاری می‌شوند. سپس، مراکز توزیع مستقر در مکان‌های p و p' حذف و در مکان p'' مرکز توزیع مستقر می‌شود. مشتری‌های متصل به مکان‌های p و p' به مکان p'' باز تخصیص می‌یابند. در مرحله بعد اجرای حلقه، مکان‌های p، p' و p'' قفل می‌شوند. در ادامه طرح‌های به‌روزرسانی جواب جاری بر اساس نتیجه جستجوی محلی مطرح می‌شوند.

٤-۲-۳- طرح‌های به‌روزرسانی جواب

الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده از طرح‌هایی برای به‌روزرسانی جواب جاری، بلافاصله قبل از اجرای طرح‌های آشفته سازی بهره می‌گیرد. یک طرح ساده از به‌روزرسانی جواب جاری می‌تواند انتخاب جواب حاصل از حلقه جستجوی ماقبل به‌عنوان جواب جاری جدید باشد. طرح دیگر در به‌روزرسانی، جایگزینی مطلوب‌ترین جواب سراسری یافت شده به‌جای جواب جاری است. طرح دیگر جایگزینی جواب جاری با صورت آشفته ساخته یکی از طرح‌های قبل است. به این معنی که قبل از جایگزینی یک جواب در جواب جاری، حرکت‌های محدودی برای آشفته سازی روی آن اعمال می‌شود. طرح دیگر، به‌کارگیری ترکیبی تصادفی از طرح‌های قبلی در به‌روزرسانی جواب جاری است.

٥-۲-۳- شرط خاتمه

شرط خاتمه در الگوریتم *ILS*، برابری مقدار اولیه اندیس حلقه تکرار با تعداد دفعات مشخص‌شده برای **گام‌های ۳** و **٤** الگوریتم *ILS* است.

در ادامه، به‌منظور بررسی پویایی شبکه، رویدادهایی که موجب پویایی و خرابی شبکه خواهند شد، بیان‌شده و راه‌حل پیشنهادی برای آن‌ها ارایه خواهیم شد. پویایی شبکه به مکان‌یابی مجدد مراکز توزیع با توجه به افزایش یا کاهش تعداد مشتری‌ها و هم‌چنین مهاجرت مشتریان از یک مکان به مکان دیگر اشاره دارد. افزایش یا کاهش تعداد مشتریان روی تعداد تقاضاهای ارسالی به مراکز توزیع تاثیرگذار است؛ بنابراین، تعداد مراکز توزیع وابسته به تعداد و مکان مشتری است. درنتیجه، تعداد مراکز توزیع ازلحاظ تعداد و مکان به‌صورت پویا در نظر گفته می‌شود.

رویدادهای پویایی شبکه

افزایش تعداد مشتریان: در صورت افزایش تعداد مشتریان، دو راه‌حل می‌تواند در نظر گرفته شود. اگر مراکز توزیع ظرفیت کافی برای اختصاص مشتریان را داشته باشند، پس از تخصیص مشتریان به مراکز توزیع، عملیات باز تخصیص مشتریان برای دست‌یابی به هدف مساله انجام می‌شود. در غیر این صورت، مراکز توزیع افزایش‌یافته و عملیات مکان‌یابی مجدد و تخصیص مجدد مشتریان انجام می‌شود.

کاهش تعداد مشتریان: برای این رویداد، دو حالت در نظر گرفته شده است: ۱- اگر مرکز توزیعی که مشتری از آن حذف‌شده است، تنها یک مشتری برای ارایه خدمات داشته باشد، مشتری باقی‌مانده می‌تواند به سایر مراکز توزیع تخصیص داده‌شده و آن مرکز توزیع غیرفعال گردد. ۲- در غیر این صورت، عملیات مکان‌یابی مجدد و تخصیص مجدد مشتریان انجام می‌شود تا تعادل در ارسال تقاضاها در شبکه برقرار شود.

تغییر اندازه تقاضاهای مشتریان: در این حالت، میزان تقاضاهای ارسالی توسط مشتریان در یک دوره زمانی تغییر می‌کند؛ بنابراین، با توجه به محدودیت ظرفیت مراکز توزیع، امکان تخصیص مجدد مشتریان وجود دارد. هم‌چنین، در صورت افزایش تقاضاها تعداد مراکز توزیع برای تخصیص مجدد مشتریان افزایش می‌یابد.

رویدادهای خرابی شبکه

۱. تعطیلی مرکز توزیع: در این حالت، ممکن است با توجه به رویدادهای رخ‌داده، مرکز توزیع تعطیل گردد؛ بنابراین، مشتریان مرکز توزیع می‌توانند بر اساس **معادله (۸)** تقاضای خود را به مراکز توزیع پشتیبان ارسال کنند. به همین دلیل، برای برقراری ارتباط مشتریان با مراکز توزیع پشتیبان، بدون در نظر گرفتن گره‌های خراب در مسیر ارتباطات، از مفهوم مسیرهای مجزا گره استفاده می‌گردد.

$$\sum_{\substack{j\in P \\ ij\in A_C}} X_{ij} = \rho_i ;\ \ for\ \ all\ i \in C, \qquad (۸)$$

توزیع: در این حالت، از مفهوم مسیرهای یال مجزا برای حل این مشکل استفاده می‌شود. ازاین‌رو، با تعریف به‌عنوان یک پارامتر نشان‌دهنده تعداد مسیرهای یال مجزا بین p و q، معادله (۲۲) به‌صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$\sum_{ij\in A_P} V_{ij}^{pq} - \sum_{ji\in A_P} V_{ji}^{pq} = \begin{cases} \lambda_{pq}{}^{*} t_{pq}, & i == p, \\ -\lambda_{pq}{}^{*} t_{pq}, & i == q;\ for\ \ all\ i \in P;\ for\ all\ pq \in O. \\ 0, & i \neq p,q. \end{cases} \qquad (۲۲)$$

علاوه بر این، با اضافه کردن **محدودیت (۲۵)** به مدل ریاضی مساله، اطمینان حاصل می‌شود که مسیرهای ارتباطی دارای یال‌های مجزا باشند.

$$V_{ij}^{pq} + V_{ji}^{pq} \le X_{ij};\ for\ \ all\ pq \in O;\ \ for\ all\ ij, ji \in A_P. \qquad (۲۵)$$

یکی از مزایای روش پیشنهادی این است که قابلیت بقای شبکه وابسته به محیط شبکه است. به این معنا که هر چه محیط شبکه ازلحاظ وقوع خرابی امن‌تر باشد، پایداری شبکه بالاتر خواهد بود و عکس این قضیه برای محیط‌های ناامن برقرار است. مزیت دیگر، بهره‌مندی مطلوب از ظرفیت مراکز توزیع جهت بررسی تقاضاهای مشتریان است. مورد دیگر، درروش پیشنهادی، در نظر گرفتن پویایی شبکه درروش پیشنهادی است. چراکه برای نزدیک شدن شرایط مساله به دنیای واقعی، نیازمند تغییر برخی از پارامترها ازجمله تقاضاهای مشتریان خواهیم بود. درنهایت، به‌منظور دست یافتن به جواب مساله در کم‌ترین زمان، از الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده استفاده گردید.

۴- شبیه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل

در این بخش، آزمایش‌ها و محاسباتی برای ارزیابی روش پیشنهادی انجام‌شده و نتایج آن مورد تحلیل قرارگرفته است. برای انجام آزمایش، نمونه‌های متفاوتی در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ تولید شده‌اند تا رفتار روش پیشنهادی در اندازه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. **جدول ۱** شامل اطلاعات مربوط به توپولوژی‌های مورد آزمایش است. توپولوژی‌های *Experiment-A* تا *Experiment-G* به‌عنوان نمونه‌های اندازه کوچک، توپولوژی‌های *Experiment-H* تا *Experiment-N* به‌عنوان نمونه‌های اندازه متوسط و توپولوژی‌های *Experiment-O* تا *Experiment-T* به‌عنوان نمونه‌های اندازه بزرگ در نظر گرفته‌شده‌اند. در ارزیابی روش پیشنهادی، مقایسه‌ای با روش‌های *CLSC* [2] و *TSCFL* [4] که در آن ارتباط بین مراکز توزیع به‌صورت مش کامل است، انجام می‌شود؛ یعنی هر مرکز توزیع با سایر مراکز ارتباط مستقیم دارد. آزمایش‌ها در دو حالت ایستا و پویا انجام می‌شود. در حالت ایستا، تعداد گره‌های شبکه ثابت بوده ولی در حالت پویا، تعداد گره‌ها متغیر است.

در این بخش، نمونه‌های آزمایشی تصادفی ایجاد شده‌اند و محاسبات بر روی یک سیستم با پردازنده اینتل *Core i3*، حافظه رم ۸ گیگابایت و سیستم‌عامل ویندوز انجام شده است. ارزیابی روش پیشنهادی بر اساس دو معیار هزینه و قابلیت بقا صورت گرفته است. برای ارزیابی قابلیت بقای شبکه، درجه قابلیت بقا برای روش‌های *CLSC* و *TSCFL* با استفاده از **معادله (۲۶)** تا **معادله (۲۹)** محاسبه‌شده و سپس درجه قابلیت بقای به‌دست‌آمده به‌عنوان ورودی به روش پیشنهادی داده می‌شود. درجه قابلیت بقای برای هر دو مکانی که تسهیلات در آن‌ها ارایه می‌شود، محاسبه می‌شود. روش پیشنهادی و روش‌های مورد مقایسه با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB* پیاده‌سازی شده‌اند و برای حل مدل ریاضی از نرم‌افزار حل‌کننده *CPLEX* استفاده شده است.

$$R = max\ \theta. \tag{۲۶}$$

$$\sum_{ij\in E_K} f_{ij} - \sum_{ji\in E_K} f_{ji} = \begin{cases} \theta, & i == s, \\ -\theta & i == t \ ; for\ all\ i \in N_K, \\ 0 & i \neq s,t, \end{cases} \tag{۲۷}$$

$$f_{ij} + f_{ji} \leq 1;\ for\ all\ ij \in E_K, \tag{۲۸}$$

$$f_{ij} \in \{0,1\};\ for\ all\ ij \in E_K. \tag{۲۹}$$

در معادله‌های بالا، هر توپولوژی κ، دارای n_K مرکز توزیع در گراف کامل K_K است؛ که $K_K = (N_K, E_K)$ و $s,t \in N_\kappa$.

جدول ۱- اطلاعات توپولوژی.

Table 1- Topology Information.

Topology	|N|	|F|	|P|	|C|
Experiment-A	9	2	2	5
Experiment-B	15	2	3	10
Experiment-C	20	2	3	15
Experiment-D	26	2	4	20
Experiment-E	31	2	4	25
Experiment-F	37	2	5	30
Experiment-G	43	3	5	35
Experiment-H	50	3	7	40
Experiment-I	55	3	7	45
Experiment-J	62	3	9	50
Experiment-K	67	3	9	55
Experiment-L	75	4	11	60
Experiment-M	80	4	11	65
Experiment-N	87	4	13	70
Experiment-O	92	4	13	75
Experiment-P	99	4	15	80
Experiment-Q	105	5	15	85
Experiment-R	112	5	17	90
Experiment-S	117	5	17	95
Experiment-T	123	5	18	100

ازآن‌جایی‌که گراف کامل یک توپولوژی متقارن را برای هر جفت مرکز توزیع القا می‌کند، حداکثر مقدار به‌دست‌آمده با اجرای فرمول بالا برای هر جفت مرکز توزیع یکسان است. **جدول ۲** نیز پارامترهای در نظر گرفته‌شده برای حل مساله را نشان می‌دهد.

جدول ۲- پارامترهای مساله.

Table 2- Problem Parameters.

پارامتر	مقدار		
	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳
هزینه استقرار هر مرکز توزیع	1500	3000	4500
ظرفیت نگهداری محصول توسط هر مرکز توزیع	100	200	300
تعداد درخواست محصول به‌وسیله هر مشتری در حالت ایستا	20		
تعداد درخواست محصول به‌وسیله هر مشتری در حالت پویا	50 تا 10		
تعداد محصولات تولیدی توسط هر کارخانه	80		
هزینه حمل محصول توسط وسیله نقلیه	15		

در این آزمایش‌ها، هر نمونه ۱۰ بار مورد ارزیابی قرارگرفته و میانگین نتایج به‌دست‌آمده به‌عنوان جواب در نظر گرفته‌شده است. نتایج این آزمایش‌ها در **جدول‌های ۳** و **٤** نشان داده‌شده است. در این جدول‌ها، برای هر توپولوژی، موارد زیر گزارش شده است:

Cost: هزینه به‌دست‌آمده از طراحی شبکه زنجیره‌تامین.

Time: مدت‌زمان لازم جهت انجام آزمایش برای هر نمونه.

Gap: میزان خطا بین مقدار به‌دست‌آمده و مقدار بهینه که بر اساس **معادله (۳۰)** محاسبه می‌گردد.

$$\frac{Proposed\ \ or\ \ Average - Z^*}{Z^*} * 100. \qquad (۳۰)$$

Z^*: نشان‌دهنده مقدار بهینه برای راه‌حل مساله است.

imp%: بیانگر درصد بهبودی روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مورد مقایسه که با استفاده از **معادله (۳۱)** محاسبه می‌گردد.

$$\frac{Cost_{CLSC\ or\ TSCFL} - Cost_{pro}}{Cost_{pro}} * 100. \qquad (۳۱)$$

در **معادله (۳۱)**، عبارت‌های $Cost_{CLSC\ or\ TSCFL}$ و $Cost_{pro}$ به ترتیب بیانگر بهترین هزینه به‌دست‌آمده برای روش‌های *CLSC* یا *TSCFL* و روش پیشنهادی است.

۱- ۴- حالت ایستا

در این بخش، آزمایش‌ها برای حالتی که تعداد گره‌های شبکه ثابت است انجام شده است. در **جدول ۳**، اولین ستون نام توپولوژی‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. ستون‌های دوم، سوم و چهارم به ترتیب تعداد کارخانه‌های تولیدکننده محصول، تعداد مکان‌های ممکن برای استقرار مراکز توزیع و تعداد مشتریان اشاره دارند. ستون‌های پنجم تا نهم، هزینه و مدت‌زمان اجرا به‌دست‌آمده توسط روش‌های پیشنهادی، *CLSC* و *TSCFL* را گزارش می‌کنند. درنهایت، ستون‌های دهم و یازدهم درصد بهبودی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های *CLSC* و *TSCFL* را بیان می‌کنند. با توجه به نتایج نشان داده‌شده در **جدول ۳**، روش پیشنهادی در بیشتر توپولوژی‌ها نسبت به روش‌های مورد مقایسه عملکرد بهتری دارد. این برتری در توپولوژی‌های با تعداد گره‌های بیشتر مشهودتر است. دلیل آن این است که روش پیشنهادی از الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده برای بررسی بیشتر فضای جستجو با استفاده از مکانیزم‌های متفاوت آشفتگی استفاده می‌کند. نکته مهم این است که روش پیشنهادی در طراحی زنجیره‌تامین نسبت به سایر روش‌های مورد مقایسه، هزینه کمتری را اعمال می‌کند. چراکه روش پیشنهادی در خصوص ارتباط مشتری با مراکز توزیع و هم‌چنین ارتباط مراکز توزیع با یکدیگر، عملکرد بهتری ازلحاظ هزینه ارتباط دارد. با توجه به تحلیل نتایج آزمایش‌ها، حداقل ۶۵% هزینه طراحی شبکه مربوط به هزینه ارتباط مشتری‌ها به مراکز توزیع و مراکز توزیع به یکدیگر است.

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های انجام‌شده با استفاده از روش‌های پیشنهادی، CLSC و TSCFL.

Table 3- Results of experiments performed between the proposed, CLSC, and TSCFL methods.

Topology	|F|	|P|	|C|	Proposed ($)	Time (s)	CLSC ($)	Time (s)	TSCFL ($)	Time (s)	Imp proposed Vs CLSC (%)	Imp proposed Vs TSCFL (%)
Experiment-A	2	2	5	3082721	0.01	3082721	0.01	3082721	0.01	0.00	0.00
Experiment-B	2	3	10	5576367	0.03	5627670	0.03	5606479	0.03	0.92	0.54
Experiment-C	2	3	15	8323884	0.05	8416279	0.03	8396302	0.04	1.11	0.87
Experiment-D	2	4	20	10553395	0.05	10606162	0.06	10585055	0.07	0.5	0.3
Experiment-E	2	4	25	11903674	0.05	12220312	0.09	12142938	0.08	2.66	2.01
Experiment-F	2	4	30	14860442	0.03	14891649	0.07	14876788	0.05	0.21	0.11
Experiment-G	2	5	35	16078418	0.19	16142732	0.20	16139516	0.22	0.4	0.38
Experiment-H	3	5	40	16991845	0.19	17017333	0.26	17007138	0.30	0.15	0.09
Experiment-I	3	5	45	21531193	0.08	21815405	0.10	21763730	0.11	1.32	1.08
Experiment-J	3	6	50	28200185	0.11	28341186	0.22	28321446	0.18	0.5	0.43
Experiment-K	3	6	55	26446121	0.14	27149588	0.30	27120497	0.27	2.66	2.55
Experiment-L	3	6	60	27921392	0.25	29035456	0.35	28881888	0.33	3.99	3.44
Experiment-M	3	7	65	32974236	0.84	34003032	0.95	33890920	1.01	3.12	2.78
Experiment-N	4	7	70	34169024	0.33	35839889	0.45	35491365	0.41	4.89	3.87
Experiment-O	4	7	75	32255312	1.13	33877754	1.44	33755184	0.99	5.03	4.65
Experiment-P	4	8	80	47011785	0.77	49258948	1.01	48943969	0.83	4.78	4.11
Experiment-Q	4	8	85	57364572	44.78	59647682	41.98	59590317	49.54	3.98	3.88
Experiment-R	4	8	90	64250453	1.03	67848478	1.22	67469401	1.66	5.60	5.01
Experiment-S	4	9	95	61720994	0.80	65899505	0.98	65510663	1.32	6.77	6.14
Experiment-T	4	9	100	71046582	2.02	74712586	3.17	74563388	2.88	5.16	4.95

۲- ۴- حالت پویا

در این بخش، آزمایش‌ها با توجه به رویدادهای پویایی شبکه که شامل افزایش و کاهش تعداد مشتریان و تغییر اندازه تقاضای مشتریان است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

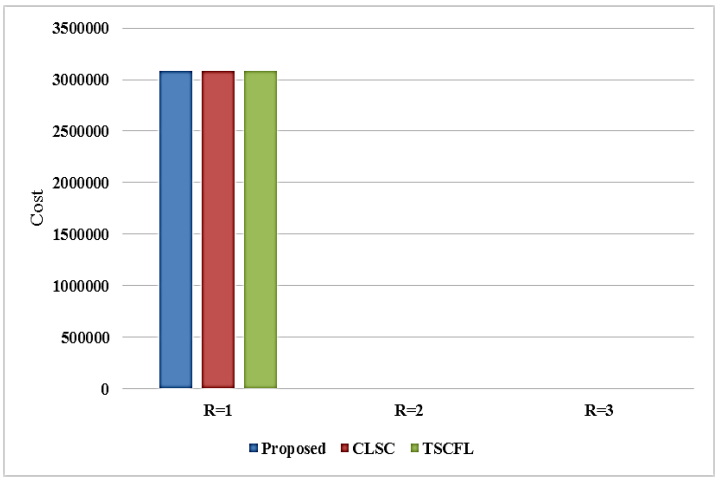
جدول ۴- نتایج آزمایش‌های انجام‌شده با روش پیشنهادی.

Table 4- Results of experiments performed the proposed method.

Topology	|F|	|P|	|C|	Customer (+)	Customer (-)	D_c	Z^* ($)	Proposed ($)	Gap (%)	Average ($)	Gap (%)	Time (s)
Experiment-A	2	2	5	*	-	-	4516829	4516829	0.00	4516829	0.00	0.01
Experiment-B	2	3	10	-	*	-	3500097	3500097	0.00	3500797	0.02	0.03
Experiment-C	2	3	15	-	-	*	8581156	8581156	0.00	8582872	0.02	0.05
Experiment-D	2	4	20	*	-	*	13251142	13251142	0.00	13252467	0.01	0.05
Experiment-E	2	4	25	-	*	*	9323578	9323578	0.00	9329172	0.06	0.03
Experiment-F	2	4	30	*	-	-	19079845	19079845	0.00	19093201	0.07	0.06
Experiment-G	2	5	35	-	*	-	13978003	13978003	0.00	13982196	0.03	0.27
Experiment-H	3	5	40	-	-	*	18805618	18805618	0.00	18815021	0.05	0.05
Experiment-I	3	5	45	*	-	*	30454153	30454153	0.00	30472425	0.06	0.06
Experiment-J	3	6	50	-	*	*	21205169	21205169	0.00	21211531	0.03	0.11
Experiment-K	3	6	55	*	-	-	31049184	31049184	0.00	31064709	0.05	0.42
Experiment-L	3	6	60	-	*	-	23885975	23885975	0.00	23893141	0.03	0.12
Experiment-M	3	7	65	-	-	*	38476470	38476470	0.00	38484165	0.02	1.30
Experiment-N	4	7	70	*	-	*	42631031	42631031	0.00	42643820	0.03	0.91
Experiment-O	4	7	75	-	*	*	35623638	35623638	0.00	35641450	0.05	0.92
Experiment-P	4	8	80	*	-	-	56285160	56285160	0.00	56302046	0.03	1.76
Experiment-Q	4	8	85	-	*	-	48684656	48684656	0.00	48704130	0.04	0.92
Experiment-R	4	8	90	-	-	*	64651407	64651407	0.00	64683733	0.05	1.28
Experiment-S	4	9	95	*	-	*	78902864	78902864	0.00	78950206	0.06	1.33
Experiment-T	4	9	100	-	*	*	65638600	65638600	0.00	65664855	0.04	1.64

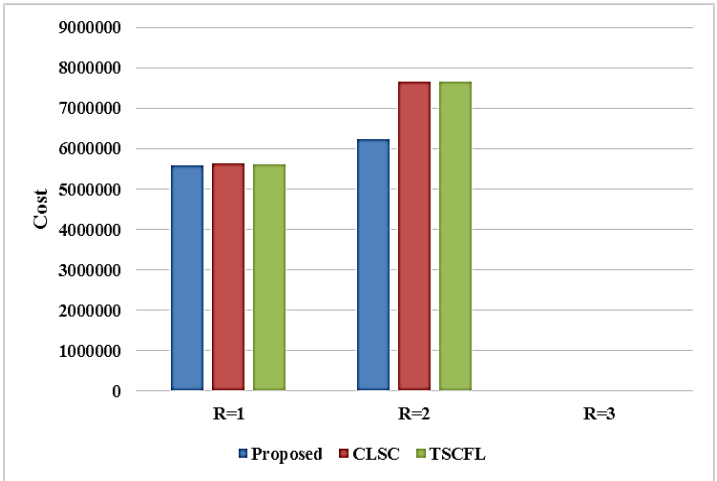
در **جدول ۴**، ستون اول نشان‌دهنده نام توپولوژی است. ستون‌های دوم، سوم و چهارم به ترتیب نشان‌دهنده تعداد کارخانه تولیدکننده محصول، تعداد مکان‌های ممکن برای استقرار مراکز توزیع و تعداد مشتریان است. ستون‌های پنجم تا هفتم به ترتیب نشان‌دهنده رویدادهای پویایی شبکه شامل افزایش، کاهش و تغییر اندازه تقاضای مشتری است. در هر توپولوژی مورد آزمایش، انتخاب هر یک از این رویدادها با علامت '+' نشان داده شده است. به این معنی که در توپولوژی مورد آزمایش این رویداد رخ داده است. ستون Z^* جواب راه‌حل بهینه برای هر توپولوژی را بیان می‌کند. ستون نهم بهترین جواب به‌دست‌آمده (بعد از ۱۰ بار اجرا) توسط روش پیشنهادی را گزارش می‌کند. ستون دهم انحراف بین جواب‌های راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه را نشان می‌دهد. ستون *Average* نشان‌دهنده متوسط مقدار به‌دست‌آمده بعد از ۱۰ بار اجرای الگوریتم پیشنهادی است. درنهایت، ستون‌های دوازدهم و سیزدهم به ترتیب انحراف بین متوسط مقدار راه‌حل پیشنهادی و راه‌حل بهینه و متوسط زمان سپری‌شده برای اجرای روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

در ادامه، به‌منظور بررسی قابلیت بقای شبکه، آزمایش‌هایی در جهت به‌دست آوردن مقدار درجه قابلیت بقای شبکه انجام می‌شود. این آزمایش‌ها بر روی ۶ توپولوژی انتخابی انجام می‌گیرد. **شکل‌های ۳-الف** تا **۳-و** نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های *CLSC* و *TSCFL* برای توپولوژی‌های مورد آزمایش با مقادیر متفاوت R (محدوده ۱ تا ۳) را نشان می‌دهد. R بیانگر درجه قابلیت بقا است که با استفاده از **معادله (۲۶)** تا **معادله (۲۹)** محاسبه می‌شود. نتایج در **شکل ۳** به‌طور واضح نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر به طراحی شبکه زنجیره‌تامین با کم‌ترین هزینه نسبت به روش‌های مورد مقایسه است. حتی زمانی که درجه قابلیت بقا در طراحی شبکه موردنیاز است. درحالی‌که، روش‌های مورد مقایسه هیچ انعطافی در انتخاب میزان قابلیت بقای موردنیاز ندارند. درصورتی‌که، روش پیشنهادی مقدار موردنیاز قابلیت بقا را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و با توجه به شرایط در نظر گرفته‌شده برای شبکه می‌توان درجه قابلیت بقا را کاهش یا افزایش داد. علاوه بر این، تحمیل یک نمودار کامل بر روی مراکز توزیع، ازآن‌جایی‌که هر مرکز توزیع باید به هر مرکز توزیع دیگر در یک توپولوژی مش متصل شود، نوعی سو استفاده از مسیرهای ارتباطی است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تحمیل چنین توپولوژی، هزینه ارتباط مراکز توزیع را به همراه خواهد داشت. درحالی‌که، هزینه ارتباط مراکز توزیع به یکدیگر کم است. همان‌طور که در نتایج نشان داده‌شده است، روش پیشنهادی معمولا تعادل بهتری بین مولفه‌های مختلف هزینه تابع هدف پیدا می‌کند. علاوه بر این، روش‌های مورد مقایسه نمی‌توانند درجه بالایی از قابلیت بقا را برای حالت‌هایی که تعداد مراکز توزیع کم است تضمین کنند. به‌عنوان‌مثال، زمانی که تنها دو مرکز توزیع برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین در نظر گرفته شود، تنها یک مسیر ارتباطی بین آن‌ها وجود دارد و هیچ تضمینی وجود ندارد در صورت خرابی مسیر ارتباطی شبکه بتواند به فعالیت خود ادامه دهد.



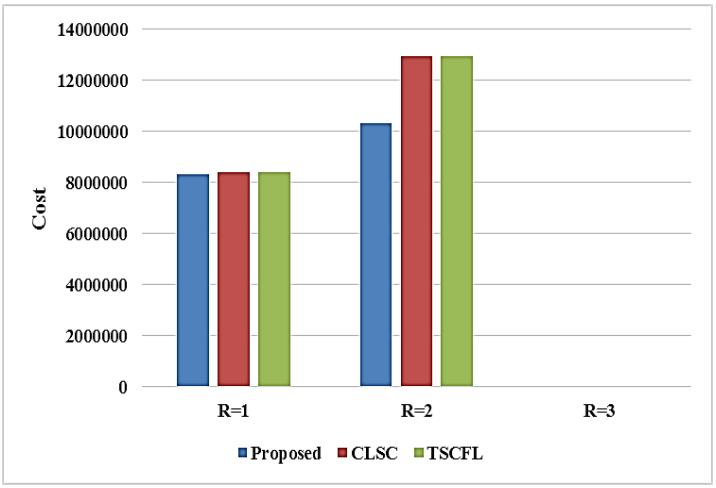
الف- توپولوژی آزمایش-A.

a- Topology experiment-A.



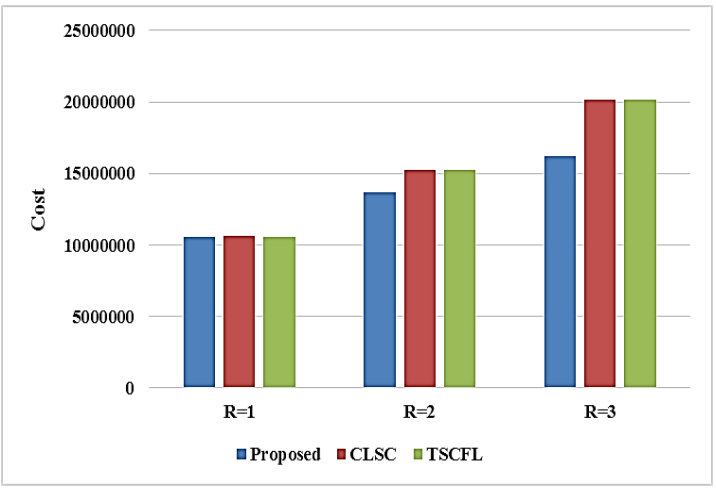
ب- آزمایش توپولوژی-B.

b- Topology experiment-B.



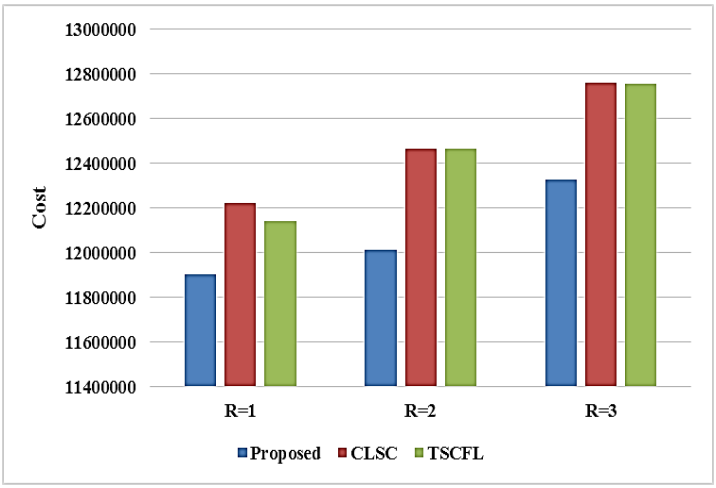
ج- آزمایش توپولوژی-C.

c- Topology experiment-C.



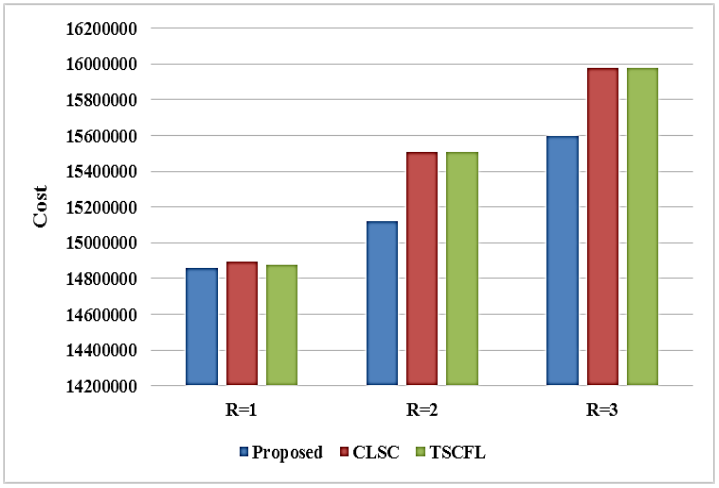
د- آزمایش توپولوژی-D.

d- Topology experiment-D.



ه- توپولوژی آزمایش-E.

e- Topology experiment-E.



و- توپولوژی آزمایش-F.
f- Topology experiment-F

شکل ۳- نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های CLSC و TSCFL بر اساس مقادیر متفاوت R.
Figure 3- The results of the proposed method compared to CLSC and TSCFL methods with different values of R.

در **شکل ۳-الف**، هیچ جوابی برای *R=2* و *R=3* وجود ندارد، به این دلیل که برای دو مکان دارای مراکز توزیع تنها یک شبکه با درجه قابلیت بقای یک می‌توان ایجاد کرد. همان‌طور که در **شکل ۳-ه** نشان داده‌شده است، روش پیشنهادی با *R=2* هزینه‌های کمتری نسبت به روش‌های *CLSC* و *TSCFL* با *R=1* دارد. به این معنی است که شبکه می‌تواند طوری طراحی شود که با افزایش درجه قابلیت بقا هزینه پیاده‌سازی شبکه نسبت به روش‌های مورد مقایسه کمتر باشد. علاوه بر این، در **شکل ۳-و**، هزینه روش پیشنهادی برای *R=2* و *R=3* به ترتیب *15123274* و *15598782* است، درحالی‌که، هزینه روش *CLSC* برای *R=2* و *R=3* به ترتیب *15508413* و *15978102* و برای روش *TSCFL* به ترتیب برابر *15505698* و *15977511* است. درنهایت، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی برای شبکه‌های با مقیاس بزرگ هزینه کمتری نسبت به *CLSC* و *TSCFL* به دست می‌آورد، حتی زمانی که درجه قابلیت بقای شبکه در مقایسه با روش‌های *CLSC* و *TSCFL* افزایش می‌یابد.

یکی از مزایای اصلی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های *CLSC* و *TSCFL* این است که قابلیت بقای شبکه می‌تواند به‌طور پویا در زمان رویداد خرابی با توجه به شرایط محیطی شبکه بهبود یابد. علاوه‌بر این، روش پیشنهادی مشتری‌ها را به مراکز توزیع طوری اختصاص می‌دهد که ظرفیت مراکز توزیع به‌طور بهینه مورداستفاده قرار گیرد. روش پیشنهادی روی پویایی شبکه تمرکز می‌کند به‌طوری‌که کاهش یا افزایش مشتری و مرکز توزیع در روش پیشنهادی برجسته شده است. هم‌چنین، استفاده از الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده برای یافتن بهترین راه‌حل برای مساله در کوتاه‌ترین زمان مزیت دیگر روش پیشنهادی است.

از دیدگاه مدیریتی، روش پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی فرایندهای مدیریتی در صنعت توزیع و پخش کالاها مورداستفاده قرار گیرد. این روش، به مدیران کمک می‌کند تا با بهره‌گیری از تکنولوژی و الگوریتم‌های پیشرفته، بهترین تصمیمات را در مورد تخصیص منابع و بهینه‌سازی شبکه توزیع بگیرند. دیدگاه دیگری که در این مقاله مطرح شده است، مربوط به توجه به پویایی شبکه است. این مساله از دیدگاه مدیریتی می‌تواند به مدیران کمک کند تا با در نظر گرفتن تغییرات و تحولات شبکه، بتوانند برنامه‌ریزی مناسبی برای بهینه‌سازی فرایندهای مدیریتی انجام دهند. هم‌چنین، از دیدگاه مدیریتی، این روش می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد نوین در صنعت توزیع و پخش کالاها مطرح شود که به کمک آن می‌توان بهبود قابل‌توجهی در کیفیت خدمات و هم‌چنین صرفه‌جویی در هزینه‌های مربوط به توزیع و پخش کالاها داشت. درنتیجه، با بهره‌گیری از این روش پیشرفته، می‌توان به بهبود کیفیت خدمات و افزایش سودآوری برای سازمان‌های توزیع و پخش کالاها دست‌یافت.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مساله مکان‌یابی تسهیلات در شبکه زنجیره‌تامین موردبررسی قرار گرفته است. برای حل این مساله، شبکه‌های ایستا و پویا در نظر گرفته‌شده‌اند. درصورتی‌که شبکه ایستا باشد، با استفاده از الگوریتم جستجوی محلی تکرارشونده، تعداد و مکان استقرار مراکز توزیع مشخص می‌شود و مشتری‌ها به هر مرکز توزیع اختصاص می‌یابند. درصورتی‌که، شبکه پویا باشد، بعد از تعیین تعداد اولیه و مکان مراکز توزیع و تخصیص مشتری‌ها به مراکز توزیع، رویدادهای مربوط به پویایی شبکه همچون کاهش مشتری، افزایش مشتری و اندازه متغیر تقاضاها توسط مشتریان موردبررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در روش پیشنهادی حالت‌های خرابی مؤلفه‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود و قابلیت بقای شبکه در هر دو حالت شبکه مشاهده می‌شود. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، آزمایش‌ها بر روی توپولوژی‌های مختلف انجام می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های *CLSC* و *TSCFL* برتری دارد.

برای ادامه پژوهش در زمینه مکان‌یابی تسهیلات در شبکه زنجیره‌تامین، در آینده می‌توان به بررسی بهینه‌سازی مدل‌های مکان‌یابی پویای تسهیلات برای محیط‌های چندگانه و در نظر گرفتن تعدادی از محدودیت‌های زنجیره‌تامین، بررسی تاثیر عوامل مختلف مانند موقعیت جغرافیایی، ترافیک، نیازهای مشتری و زمان در مدل‌سازی مکان‌یابی پویای تسهیلات و بررسی مدل‌های پیشرفته‌ی مکان‌یابی پویای تسهیلات، ازجمله شبکه‌های عصبی و یادگیری عمیق، برای بهبود دقت و کارایی مدل‌های مکان‌یابی پویای تسهیلات را پیشنهاد کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله کمال تشکر و قدردانی خود را از سردبیر و داوران محترم اعلام می‌دارند. نظرات ارزشمند ایشان نقش به‌سزایی در ارتقای کیفیت مقاله داشته است.

منابع

[1] Olivares-Benitez, E., González-Velarde, J. L., & Ríos-Mercado, R. Z. (2012). A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices. *Top*, *20*(3), 729–753. DOI: 10.1007/s11750-010-0162-8

[2] Zhen, L., Sun, Q., Wang, K., & Zhang, X. (2019). Facility location and scale optimisation in closed-loop supply chain. *International journal of production research*, *57*(24), 7567–7585. DOI: 10.1080/00207543.2019.1587189

[3] Afify, B., Ray, S., Soeanu, A., Awasthi, A., Debbabi, M., & Allouche, M. (2019). Evolutionary learning algorithm for reliable facility location under disruption. *Expert systems with applications*, *115*, 223–244. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.07.045

[4] Souto, G., Morais, I., Faulhaber, L., Ribeiro, G. M., & González, P. H. (2021). A hybrid BRKGA approach for the two stage capacitated facility location problem. *2021 ieee congress on evolutionary computation, cec 2021 - proceedings*, *185*, 2007–2014. DOI: 10.1109/CEC45853.2021.9504856

[5] Bal, A., & Badurdeen, F. (2020). A multi-objective facility location model to implement circular economy. *Procedia manufacturing*, *51*, 1592–1599. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.222

[6] Irawan, C. A., & Jones, D. (2019). Formulation and solution of a two-stage capacitated facility location problem with multilevel capacities. *Annals of operations research*, *272*(1–2), 41–67. DOI: 10.1007/s10479-017-2741-7

[7] Das, S. K., Roy, S. K., & Weber, G. W. (2020). Heuristic approaches for solid transportation-p-facility location problem. *Central european journal of operations research*, *28*(3), 939–961. DOI: 10.1007/s10100-019-00610-7

[8] Cotes, N., & Cantillo, V. (2019). Including deprivation costs in facility location models for humanitarian relief logistics. *Socio-economic planning sciences*, *65*, 89–100. DOI: 10.1016/j.seps.2018.03.002

[9] Golpîra, H. (2020). Optimal integration of the facility location problem into the multi-project multi-supplier multi-resource construction supply chain network design under the vendor managed inventory strategy. *Expert systems with applications*, *139*, 112841. DOI: 10.1016/j.eswa.2019.112841

[10] Yahyaei, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2019). Robust reliable humanitarian relief network design: an integration of shelter and supply facility location. *Annals of operations research*, *283*(1–2), 897–916. DOI: 10.1007/s10479-018-2758-6

[11] Brahami, M. A., Dahane, M., Souier, M., & Sahnoun, M. (2022). Sustainable capacitated facility location/network design problem: a non-dominated sorting genetic algorithm based multiobjective approach. *Annals of operations research*, *311*(2), 821–852. DOI: 10.1007/s10479-020-03659-9

[12] Ramshani, M., Ostrowski, J., Zhang, K., & Li, X. (2019). Two level uncapacitated facility location problem with disruptions. *Computers and industrial engineering*, *137*, 106089. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106089

[13] Kaya, O., & Ozkok, D. (2020). A blood bank network design problem with integrated facility location, inventory and routing decisions. *Networks and spatial economics*, *20*(3), 757–783. DOI: 10.1007/s11067-020-09500-x

[14] Moradi, A., Seyedkolaei, A. A., & Seno, S. A. H. (2020). Controller placement in software defined network using iterated local search. *Journal of ai and data mining*, *8*(1), 55–65. DOI: 10.22044/JADM.2019.7934.1931

[15] Gollowitzer, S., & Ljubić, I. (2011). MIP models for connected facility location: A theoretical and computational study. *Computers and operations research*, *38*(2), 435–449. DOI: 10.1016/j.cor.2010.07.002

[16] Hamon, J., Dhaenens, C., Even, G., & Jacques, J. (2013). Feature selection in high dimensional regression problems for genomic. *Tenth international meeting on computational intelligence methods for bioinformatics and biostatistics* (pp. 1–9). Hal Science. https://inria.hal.science/hal-00839705/

عبدی سیدکلایی و ناصری / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲، صفحه: ۱۰۹۰-۱۰۷۲