



Developing a Multi-Objective Model for Locating-Routing-Inventory Problem in a Multi-Period and Multi-Product Green Closed-Loop Supply Chain Network for Perishable Products

Sima Hajian

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: sima.hajian.877@gmail.com

Mohammad Ali Afshar Kazemi

*Corresponding author, Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: dr.mafshar@gmail.com

Seyed Mohammad Seyed Hosseini

Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: seyedhosseini@iust.ac.ir

Abbas Toloie Eshlaghy

Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: toloie@gmail.com

Abstract

Objective: During the last three decades, the concept of decision-making integrity in the supply chain has become one of the most important dimensions in the supply chain management. This concept examines the dependence between the location of facilities, allocation of flow between facilities, the structure of transport system and inventory control system. This paper presents a new form of locating- routing- inventory problem in a closed-loop supply chain network for perishable products with respect to environmental considerations, in such a way that the aggregate system costs, the aggregate maximum transportation time and emission of pollutants throughout the network should be minimized.

Methods: The research problem is formulated in the form of a multi-objective mixed integer nonlinear programming model and a genetic algorithm approach is proposed to solve the model. In order to validate, the results of the proposed algorithm are compared in small-scale examples with the exact solution method using GAMS software.

Results: The mean error of the proposed algorithm for the objective function is fewer than 4% as compared to the exact solution. In addition, the results of the algorithm's performance are discussed based on standard indices. The computational results indicated the efficiency of the algorithm for a wide range of problems with different sizes.

Conclusion: The locating, routing and inventory decisions are interdependent and determining the optimal values for these variables is in interaction with each other which can lead to an optimal system with the least possible cost.

Keywords: Location, Routing, Inventory, Green closed loop network, Perishable.

Citation: Hajian, S., Afshar Kazemi, M.A., Seyed Hosseini, S.M., & Toloie Eshlaghy, A. (2019). Developing a Multi-Objective Model for Locating-Routing-Inventory Problem in a Multi-Period and Multi-Product Green Closed-Loop Supply Chain Network for Perishable Products. *Industrial Management Journal*, 11(1), 83-110. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2019, Vol. 11, No.1, pp. 83-110

DOI: 10.22059/imj.2019.275295.1007558

Received: August 08, 2018; Accepted: January 14, 2019

© Faculty of Management, University of Tehran

ارائه مدل چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز چنددوره‌ای و چندمحصولی برای کالاهای فاسدشدنی

سیم‌ا حاجیان

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: sima.hajian.877@gmail.com

محمد علی افشار کاظمی

* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: dr.mafshar@gmail.com

سید محمد سیدحسینی

استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: seyedhosseini@iust.ac.ir

عباس طلوعی اشلقی

استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: toloie@gmail.com

چکیده

هدف: در سه دهه اخیر، مفهوم یکپارچگی تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین به یکی از مهم‌ترین ابعاد مدیریت زنجیره تأمین تبدیل شده است. این مفهوم به بررسی وابستگی میان مکان تسهیلات، تخصیص جریان بین تسهیلات، ساختار سیستم حمل‌ونقل و سیستم کنترل موجودی می‌پردازد. این مقاله صورت جدیدی از مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی را در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای محصولات فاسدشدنی با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی ارائه می‌دهد، به نحوی که همزمان مجموع هزینه‌های سیستم، مجموع حداکثر زمان حمل‌ونقل و انتشار آلاینده‌ها در کل شبکه کمینه شود.

روش: مسئله پژوهش در قالب یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله شده و برای حل مدل، رویکردی از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج الگوریتم پیشنهادی در مثال‌های اندازه کوچک با نتایج حل روش دقیق توسط نرم‌افزار گمز، مقایسه شده‌اند.

یافته‌ها: میانگین خطای حاصل از الگوریتم پیشنهادی برای تابع هدف در مقایسه با روش دقیق، در حل مسائل نمونه، کمتر از ۴ درصد است. همچنین نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم بر اساس شاخص‌های استاندارد بررسی شده است. نتایج محاسباتی، نشانگر کارایی الگوریتم برای طیف وسیعی از مسائل با اندازه‌های متفاوت است.

نتیجه‌گیری: تصمیم‌های مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی به هم وابسته بوده و تعیین مقادیر بهینه این متغیرها در تعامل با هم است که می‌تواند به یافتن یک سیستم بهینه با حداقل هزینه‌های ممکن منجر شود.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی، مسیریابی، موجودی، شبکه حلقه بسته سبز، فاسدشدنی.

استناد: حاجیان، سیم‌ا؛ افشار کاظمی، محمدعلی؛ سیدحسینی، سید محمد؛ طلوعی اشلقی، عباس (۱۳۹۸). ارائه مدل چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز چنددوره‌ای و چندمحصولی برای کالاهای فاسدشدنی. مدیریت صنعتی، ۱۱(۱)، ۸۳-۱۱۰.

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۸، دوره ۱۱، شماره ۱، صص. ۸۳-۱۱۰

DOI: 10.22059/imj.2019.275295.1007558

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۴

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

تعریف مرسوم مدیریت زنجیره تأمین، فرایند برنامه‌ریزی، پیاده‌سازی و کنترل عملیات از تأمین‌کننده تا مشتریان به صورت کارآمد است (زهیری، توکلی مقدم و پیشوایی^۱، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر با توجه به جنبه‌های اقتصادی، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، انتظارات مشتریان، قوانین دولتی و آگاهی جهان از محدودیت منابع طبیعی، لجستیک معکوس و طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته^۲ توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است (شی، ژانگ و شا^۳، ۲۰۱۱). در مقابل لجستیک مستقیم، لجستیک معکوس از کاربر نهایی (مشتریان) شروع شده و در جمع‌آوری محصولات که عمر آنها پایان یافته یا محصولات برگشتی و فعالیت‌هایی همچون بازیافت، احیا و دفع آنها، به منظور دستیابی به مواد اولیه، قطعات و محصولات و کاهش اثرهای زیست‌محیطی پسماندها، سهمیم است (گویندان، سلیمانی و کنان^۴، ۲۰۱۵). ترکیب زنجیره تأمین مستقیم و زنجیره تأمین معکوس به شکل‌گیری زنجیره تأمین حلقه بسته منجر می‌شود (دیابات، عبدالله و هنسچل^۵، ۲۰۱۵). این رویکرد، طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس را به‌طور همزمان بهینه کرده و از زیربهدیگی ناشی از طراحی مجزای شبکه‌ها، جلوگیری می‌کند (پیشوایی و رزمی^۶، ۲۰۱۲). محصولات فاسدشدنی، به دلیل زمان محدود مجاز برای نگهداری، چالش‌های بیشتری برای زنجیره تأمین به همراه دارند. به‌طور کلی کالای فاسدشدنی به کالایی گفته می‌شود که با گذشت زمان ارزش خود را از دست می‌دهد مانند، لبنیات، میوه، سبزیجات، خون، مواد شیمیایی و غیره (لی، لن و ماوهینی^۷، ۲۰۱۰). فاسد شدن کالا علاوه بر اینکه از نظر اقتصادی باعث ضرر و زیان بنگاه‌ها می‌شود، از لحاظ زیست‌محیطی نیز موجب افزایش ضایعات و در نتیجه آلودگی بیشتر محیط خواهد شد. در این شرایط تولیدکننده می‌تواند با ایجاد یک رابطه همکاری مناسب با خرده‌فروشان و به اشتراک‌گذاری اطلاعات مربوط به تقاضا و موجودی، به بازگرداندن محصولات که تاریخ مصرف آنها گذشته است و مدیریت صحیح آنها به‌منظور دفع یا بازیافت، اقدام کند و به این ترتیب زمینه را برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و استفاده کمتر از منابع طبیعی فراهم آورد. بنابراین به‌کارگیری مفاهیم و اصول لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته برای سازمان‌های مختلف به‌خصوص صنایع مرتبط با اقلام فسادپذیر امری ضروری به نظر می‌رسد که امروزه توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. علاوه بر نیاز به طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، یکپارچگی تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین به یکی از مهم‌ترین جنبه‌های سیستم مدیریت زنجیره تأمین تبدیل شده است (گویندان، جعفریان، خداوردی و اویکا^۸، ۲۰۱۴). این مفهوم به بررسی وابستگی میان مکان تسهیلات، تخصیص تأمین‌کنندگان و مشتریان به تسهیلات، ساختار سیستم حمل‌ونقل و مسیریابی آنها و سیستم کنترل موجودی می‌پردازد. مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی^۹ از جمله مسائل پرکاربرد در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین برای بهبود و کاهش هزینه‌ها و افزایش توان رقابتی است (یانگ، ما و ژانگ^{۱۰}، ۲۰۱۰). اینکه محصول از کدام مسیر و توسط چه مکانی برای انتقال به مقصد انتخاب شود و چه مقداری از آن نگهداری شود، برای کاهش هزینه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، تا بدین وسیله، کوتاه‌ترین و کم‌هزینه‌ترین مسیر و

1. Zahiri, Tavakkoli-Moghaddam & Pishvae
 3. Shi, Zhang & Sha
 5. Diabat, Abdallah & Henschel
 7. Li, Lan & Mawhinney
 9. Location-Routing-Inventory Problem

2. Closed loop Supply Chain
 4. Govindan, Soleimani & Kannan
 6. Pishvae & Razmi
 8. Govindan, Jafarian, Khodaverdi & Devika
 10. Yang, Ma & Zhang

کمترین مقدار نگهداری موجودی، برای ارسال و دریافت به موقع محصولات به دست آید. این مسئله، در زنجیره تأمین کالاهای فسادپذیر، به علت شرایط خاص محصول، از اهمیت ویژه تری برخوردار است. زیرا علاوه بر هزینه از دست رفتن فروش به علت عدم تأمین به موقع تقاضا، هزینه های ناشی از نگهداری محصول، افت کیفیت و فاسد شدن محصول را نیز متحمل خواهد شد. در واقع تصمیم های مکان یابی، مسیریابی و موجودی بسیار به هم وابسته بوده و یکپارچگی آنها موجب انسجام بین سطوح مختلف تصمیم گیری در شبکه زنجیره تأمین می شود و شرکت را قادر می سازد تا فرایندهای سیستم لجستیک را به شیوه ای مؤثر مدیریت کند (گزارا، نعمت الهی و دسکی^۱، ۲۰۱۴).

در سده اخیر، محیط گرایی به یکی از موضوع های مهم اقتصادی و اجتماعی تبدیل شده است. در واقع با افزایش آگاهی به حفاظت از محیط زیست و گرم شدن زمین در جهان، روند سبز برای حمایت از منابع زمین و محیط زیست، از مباحث بسیار مهم دهه اخیر به شمار می آید. امروزه فعالیت های صنعتی و نیز حمل و نقل مربوط به شبکه های زنجیره تأمین، از مهم ترین منابع انتشار گازهای گلخانه ای به شمار می روند (تیواری، چانگ و کندوی^۲، ۲۰۱۶). با وجود اینکه علت گرایش اغلب سازمان ها به مدیریت زنجیره تأمین سبز رعایت الزامات قانونی است، این رویکرد در بلندمدت می تواند زمینه دستیابی شرکت ها به مزیت رقابتی پایدار و در نهایت سودآوری را فراهم کند (محمدی، عالم تبریز و پیشوایی، ۱۳۹۷). بر اساس آنچه بیان شد، در این تحقیق سعی می شود با مدل کردن مسئله مکان یابی - مسیریابی - موجودی در زنجیره تأمین حلقه بسته صنعت لبنیات کشور و با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی، برنامه ریزی جامع ارائه شود.

پیشینه پژوهش

مسئله مکان یابی - مسیریابی - موجودی

با توجه به روند افزایشی که در توجه به مباحث مدیریت زنجیره تأمین وجود دارد، ترکیب مباحث مکان یابی، مسیریابی و موجودی در صنعت اهمیت زیادی پیدا کرده است. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه به قرار زیر است:

برای نخستین بار لیو و لی^۳ (۲۰۰۳) به مدل سازی مسئله مکان یابی - مسیریابی - موجودی در زنجیره تأمین دوسطحی شامل انبارها و مشتریان پرداختند. در این مقاله مسئله با فرضیاتی همچون نامحدود بودن ظرفیت انبارها، تک محصولی بودن کالا و همگن بودن ناوگان حمل و نقل حل شده بود. شن و کی^۴ (۲۰۰۷) مقاله ای تحت عنوان ترکیب کردن هزینه های مسیریابی و موجودی در مدل های مکان یابی استراتژیک ارائه کردند. این مقاله زنجیره تأمین سه سطحی شامل تأمین کننده، مراکز توزیع و مشتریان را بررسی می کند که تقاضای مشتریان تصادفی بوده و هر مرکز توزیع مقدار معینی ذخیره انبار را با هدف دستیابی به سطح خدمت دهی مناسب به مشتریانی که به آنها تخصیص داده شده اند، نگهداری می کند. همچنین هزینه موجودی و مسیریابی به صورت تقریبی در نظر گرفته شده و مسئله مد نظر به عنوان مدل برنامه ریزی عدد صحیح غیرخطی فرموله شده است. احمدی جاوید و آزاد^۵ (۲۰۱۰) مدل جدیدی را ارائه کردند که به طور همزمان تصمیم های مکان یابی، تخصیص، ظرفیت، موجودی و مسیریابی را بهینه می کند. آنها مدل شن و کی

1. Gzara, Nematollahi & Dasci
3. Liu & Lee
5. Ahmadi Javid & Azad

2. Tiwari, Chang & Kandhway
4. Shen & Qi

(۲۰۰۷) را با در نظر گرفتن تصمیم‌های مسیریابی وسیله نقلیه توسعه دادند. در این مدل فرض شده که تقاضای مشتریان غیرقطعی بوده و از توزیع نرمال پیروی می‌کند و هر مرکز توزیع مقدار مشخصی ذخیره احتیاطی را نگهداری می‌کند، همچنین ناوگان حمل‌ونقل دارای ظرفیت یکسان بوده و همگن در نظر گرفته شده است. سجادی و چراغی^۱ (۲۰۱۱) یک شبکه توزیع چندمحصولی و با سه سطح شامل کارخانه‌ها، انبارها و مشتریان را بررسی کردند. در این مدل تقاضای مشتریان احتمالی بوده و انبارها دارای ظرفیت هستند و فرض بر این است که شرکت‌های لجستیک شخص ثالث در صورت نیاز، برای انبار فضای اضافی ارائه می‌دهند. همچنین برای حل مدل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. احمدی جاوید و صدیقی^۲ (۲۰۱۲) مسئله یکپارچه مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی را برای طراحی شبکه توزیع چندمنبعی ارائه کردند. شبکه توزیع مسئله آنها سه‌سطحی بوده و شامل تأمین‌کننده، مراکز توزیع و چندین مشتری است. آنها برای مسئله بیان شده، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلطی ارائه کردند که هدف آن کمینه‌سازی هزینه کل مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی است و برای حل آن از یک الگوریتم ابتکاری سه‌مرحله‌ای مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید و سیستم کلونی مورچگان استفاده کردند. توکلی مقدم، فروزانفر و ابراهیم نژاد^۳ (۲۰۱۳) مسئله طراحی شبکه تک‌منبعی‌ای برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی را بررسی کردند. این مسئله با در نظر گرفتن ریسک، موجودی در مراکز توزیع تحت تقاضای غیرقطعی، وجود چندین گزینه برای حمل محصول بین تسهیلات و مسیریابی وسائل نقلیه از مراکز توزیع به مشتریان در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله شده است. نکوقدیرلی، توکلی مقدم، قضاوتی و جوانمرد^۴ (۲۰۱۴) یک مدل چندهدفه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی با فرض چنددوره‌ای و چندمحصولی پیشنهاد دادند. در مدل آنها، زمان سفر و تقاضای مشتریان غیرقطعی در نظر گرفته شده است. هدف این مدل، کمینه‌سازی هزینه کل و حداکثر میانگین زمان تحویل کالا به مشتریان است. لیو، چن و لی^۵ (۲۰۱۵) به بررسی یک شبکه توزیع سه‌سطحی تک‌محصولی با در نظر گرفتن تصمیم‌های مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی پرداختند. این مسئله از یک سیاست مرور دائم موجودی (Q,R) پیروی می‌کند، ناوگان حمل‌ونقل همگن در نظر گرفته شده و برای حل مسئله الگوریتم ترکیبی ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. توکلی مقدم و رضیعی^۶ (۲۰۱۶) یک مدل دوهدفه مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی ارائه دادند. مسئله آنها شامل یک شبکه توزیع دوسطحی چنددوره‌ای چندمحصولی، با فرض وجود وسایل حمل‌ونقل غیرهمگن بود و در مدل‌سازی از رویکرد فازی استفاده کردند تا شرایط عدم قطعیت تقاضا در نظر گرفته شود. کمینه کردن هزینه‌ها شامل مصرف سوخت، نگهداری موجودی، حمل‌ونقل و استقرار تسهیلات در تابع هدف اول و کمینه کردن کمبود کالا برای هر مشتری در تابع هدف دوم منظور شد. وکیلی، حسینی مطلق، غلامیان و جوکار (۱۳۹۶) به بررسی مسئله مسیریابی موجودی قطعی اقلام دارویی در زنجیره تأمین دارو متشکل از یک توزیع‌کننده و مجموعه‌ای از خرده‌فروشان پرداختند و با هدف کمینه کردن مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری

1. Sajjadi & Cheraghi

2. Ahmadi Javid & Seddighi

3. Tavakkoli-Moghaddam, Forouzanfar & Ebrahimnejad

4. Nekooghadirli, Tavakkoli-Moghaddam, Ghezavati & Javanmard

5. Liu, Chen & Li

6. Tavakkoli-Moghaddam & Raziei

موجودی، یک مدل عدد صحیح مختلط خطی ارائه کردند. همچنین برای حل مدل، روشی ابتکاری مبتنی بر روش جست‌وجوی همسایگی بزرگ انطباقی ارائه شده و برای ساخت جواب اولیه از یک الگوریتم ابتکاری دو فازی استفاده کرده‌اند.

ژاله‌چیان، توکلی مقدم، زهیری و محمدی^۱ (۲۰۱۶) برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار، مدل جدید مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی تحت عدم قطعیت در حالت چنددوره‌ای و چندمحصولی پیشنهاد دادند. تأثیرهای محیطی گاز CO₂، مصرف سوخت، انرژی هدررفته، اثرهای اجتماعی موقعیت‌های کاری ایجاد شده و توسعه اقتصادی در این مقاله بررسی شده‌اند.

هیاسات، دیابات و راهوان^۲ (۲۰۱۷) برای کالاهای فسادپذیر یک مدل مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی ارائه کردند که در آن یک تأمین‌کننده یک نوع محصول را برای چندین خرده‌فروش از طریق مجموعه‌ای از انبارها توزیع می‌کند. هدف این مسئله، کمینه کردن هزینه کل شامل هزینه‌های احداث انبارها، حمل‌ونقل و نگهداری موجودی است و در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شده است. آنها برای حل مدل، یک الگوریتم ژنتیک با نمایش خاصی از کروموزوم‌ها ارائه کردند.

توران، مینر و هارتل^۳ (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی برای کالاهای فاسدشدنی، یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی دوسطحی ارائه کردند که محصولات از یک انبار مرکزی به فروشگاه‌های خرده‌فروشی منتقل می‌شد. برای نزدیک کردن مسئله به حالت واقعی و برخورد بهتر با عدم قطعیت، حمل کالا بین فروشگاه‌ها مجاز است. آنها برای حل مدل، از یک روش جست‌وجوی همسایگی متغیر بهره بردند و نشان دادند که مدل ارائه شده، در مقایسه با روش‌های رایج «سفارش‌دهی و حمل نکردن کالا بین فروشگاه‌ها» باعث بهبود قابل توجهی می‌شود.

سراگیه، نوربهاگیا و سیابری^۴ (۲۰۱۸) یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تیرید برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل یک تأمین‌کننده، چندین انبار و خرده‌فروش ارائه کردند. تقاضای هر خرده‌فروش غیرقطعی و تک‌محصولی است و از توزیع نرمال پیروی می‌کند. هدف این مسئله، کمینه کردن هزینه احداث انبارها، هزینه موجودی در تأمین‌کننده، انبارها و خرده‌فروش‌ها و هزینه مسیریابی از انبارها به خرده‌فروش‌ها است که در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله شده است.

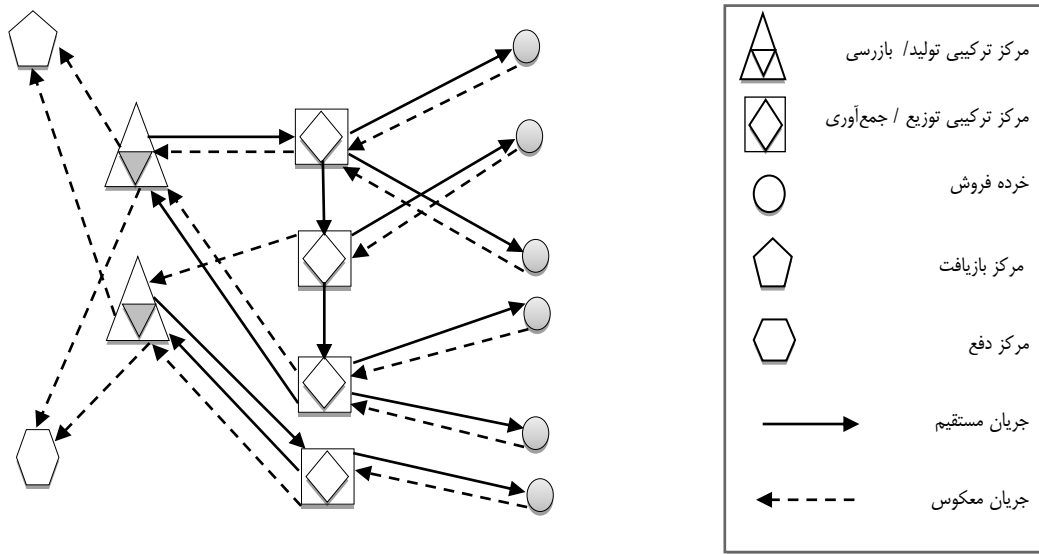
رافعی، مجد، پسندیده و نادری^۵ (۲۰۱۸) در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل یک تأمین‌کننده و مراکز توزیع و چندین خرده‌فروش به فرموله کردن یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی برای محصولات فاسدشدنی پرداختند. تقاضای مشتریان غیرقطعی بوده و هر مرکز توزیع از سیاست موجودی (Q,R) پیروی می‌کند. هدف این مدل، به حداقل رساندن هزینه کل شامل هزینه احداث مراکز توزیع، هزینه مسیریابی از مراکز توزیع به خرده‌فروش‌ها، هزینه نگهداری موجودی در مراکز توزیع و خرده‌فروش‌ها و هزینه حمل‌ونقل از تأمین‌کننده به مراکز توزیع است. برای حل مدل نیز از

1. Zhalechian, Tavakkoli-Moghaddam, Zahiri & Mohammadi
2. Hiassat, Diabat & Rahwan
3. Turan, Minner & Hartl
4. Saragih, Nur-Bahagia & Syabri
5. Rafie-Majd, Pasandideh & Naderi

الگوریتم آزادسازی لاگرانژ استفاده کردند. مواردی که این مقاله را از سایر مقالات متمایز می‌کند بدین شرح است: ۱. ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چنددوره‌ای و چندمحصولی در صنعت لبنیات. در تحقیقات اخیر، مقالاتی که به بررسی این مسئله برای محصولات فاسدشدنی پرداختند، زنجیره معکوس را در نظر نگرفته‌اند و از آنجا که فروش محصولات فاسدشدنی به عمر سپری شده از محصول وابسته است، مدیریت محصولات که تاریخ مصرف آنها به پایان رسیده از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، ۲. کمینه کردن مجموع حداکثر زمان در هر رده در زنجیره، در کنار اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از اهداف در طراحی شبکه لحاظ شده است. زیرا یکی از فاکتورهای مؤثر در زمان انجام سفارش، زمان حمل در زنجیره است. به‌طور یقین هر چه مقدار آن برای کالا، به‌خصوص کالاهای فاسدشدنی کمتر باشد، ارزش افزوده محسوب شده که با دستیابی به آن می‌توان سود رقابتی بلندمدت و کوتاه‌مدت را در بازار به دست آورد، ۳. در نظر گرفتن زمان رسیدن به مراکز و زمان عزیمت از مراکز در مسیریابی و ۴. ارائه رویکردی از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل پیچیده با تعداد متغیرهای بالا که به یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه در زمان کوتاه‌تری منجر می‌شود.

تعریف مسئله

شکل ۱ نمایه شماتیک ساختار شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی را که شامل مجموعه‌ای از مراکز ترکیبی تولید/بازرسی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، خرده‌فروش‌ها، مراکز بازیافت و دفع است، نشان می‌دهد. مدل ارائه‌شده در این مقاله، بر اساس صنعت لبنیات طراحی شده که در جریان مستقیم، محصولات تولیدی لبنی با طول عمر کوتاه، از مراکز تولید/بازرسی با به‌کارگیری ناوگان ناهمگنی از وسایل نقلیه به مراکز توزیع/جمع‌آوری منتقل می‌شوند و از آنجا در اختیار خرده‌فروش‌ها قرار می‌گیرند. در جریان معکوس، درصدی از تقاضای خرده‌فروش‌ها بعد از پایان عمر محصول به‌عنوان محصولات منقضی‌شده، از طریق مراکز توزیع/جمع‌آوری، جمع‌آوری می‌شوند و سپس برای بررسی کیفیت، به مراکز تولید/بازرسی انتقال می‌یابند. محصولات برگشتی به‌صورت لزوم برای انجام عمل بازرسی، به مرکز ترکیبی تولید/بازرسی که در آنجا تولید شده بودند، باز نمی‌گردند و مدل بر اساس هزینه، مرکز بازرسی مربوطه را انتخاب می‌کند. پس از عملیات بازرسی، بخشی از محصولات به مراکز دفع و بخشی دیگر به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند. در این مدل استفاده از تسهیلات ترکیبی تولید/بازرسی و توزیع/جمع‌آوری، می‌تواند مزایایی از جمله کاهش در هزینه‌ها و آلودگی‌ها را به‌دلیل استفاده مشترک از تسهیلات، سبب شود. این تسهیلات در جریان مستقیم نقش تولید و توزیع و در جریان معکوس نقش بازرسی و جمع‌آوری را ایفا می‌کنند. هدف این مدل تعیین تعداد و مکان بهینه استقرار مراکز ترکیبی تولید/بازرسی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، مراکز بازیافت، مراکز دفع و سطوح ظرفیت آنها، چگونگی تخصیص مراکز در سطوح متوالی، مقدار تولید و موجودی هر مرکز تولید/بازرسی در هر دوره، تعیین مسیر وسایل نقلیه با شروع از یک مرکز تولید/بازرسی برای خدمت‌دهی به مراکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص داده‌شده به آن و بازگشت به همان مرکز تولید/بازرسی، زمان رسیدن و زمان عزیمت وسیله نقلیه در مسیریابی و مقدار جریان بهینه بین مراکز تخصیص یافته به هم در هر دوره است، به‌طوری که مجموع هزینه‌های سیستم، زمان حمل و نقل و انتشار گازهای آلاینده در زنجیره کمینه شود.



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

مفروضات

برخی از مفروضات مهم در نظر گرفته شده برای این مدل به شرح زیر است:

۱. مسئله مد نظر چنددوره‌ای و چندمحصولی است.
۲. سه سطح ظرفیت با هزینه متفاوت برای مراکز در نظر گرفته شده و در نهایت یک سطح ظرفیت برای هر مرکز انتخاب می‌شود.
۳. تقاضای مراکز توزیع/ جمع‌آوری و خرده‌فروش‌ها در هر دوره قطعی است.
۴. باید به همه مراکز توزیع/ جمع‌آوری تأسیس شده، خدمت داده شود.
۵. درصد مشخصی از تقاضای هر دوره در خرده‌فروش‌ها، در دوره بعد از پایان عمر محصول به‌عنوان محصولات منقضی شده به مراکز توزیع/ جمع‌آوری برگشت داده می‌شوند.
۶. هر مرکز توزیع/ جمع‌آوری مسئول جمع‌آوری محصولات منقضی شده از آن دسته خرده‌فروشان است که تقاضای آنها توسط آن مرکز توزیع/ جمع‌آوری تأمین می‌شود.
۷. مسیریابی، از مرکز تولید/ بازرسی به مراکز توزیع/ جمع‌آوری در نظر گرفته شده است.
۸. هر مسیر از یک مرکز تولید/ بازرسی تأسیس شده آغاز شده و پس از خدمت‌دهی به مراکز توزیع/ جمع‌آوری، دوباره به همان مرکز تولید/ بازرسی باز می‌گردد.
۹. نوع ناوگان حمل‌ونقل موجود ناهمگن است، بنابراین ظرفیت خودروها یکسان نبوده و محدود نیز هست.

جدول ۱. معرفی مجموعه‌ها و اندیس‌ها

نماد	تعریف
I	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز ترکیبی تولید/بازرسی $i \in \{1, 2, \dots, I\}$
S	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری $s \in \{1, 2, \dots, S\}$
K	مجموعه مکان‌های ثابت خرده‌فروش‌ها $k \in \{1, 2, \dots, K\}$
N	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز بازیافت $n \in \{1, 2, \dots, N\}$
L	مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز دفع $l \in \{1, 2, \dots, L\}$
V	مجموعه وسایل نقلیه $v \in \{1, 2, \dots, V\}$
B_j	مجموعه سطوح ظرفیت در دسترس مرکز j ($j \in i, s, l, n$)
R	مجموعه محصولات $r \in \{1, 2, \dots, R\}$
T	مجموعه دوره زمانی $t \in \{1, 2, \dots, T\}$

جدول ۲. پارامترهای موجود در مدل

پارامتر	تعریف
F_i^b	هزینه احداث مرکز تولید/بازرسی i با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_i$
F_s^b	هزینه احداث مرکز توزیع/جمع‌آوری s با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_s$
F_n^b	هزینه احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_n$
F_l^b	هزینه احداث مرکز دفع l با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_l$
PO_i^b	میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز تولید/بازرسی i با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_i$
PO_s^b	میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز توزیع/جمع‌آوری s با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_s$
PO_n^b	میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_n$
PO_l^b	میزان آلاینده منتشرشده حاصل از احداث مرکز دفع l با سطح ظرفیت b ، $\forall b \in B_l$
PI_{irt}	هزینه تولید هر واحد محصول r در مرکز تولید/بازرسی i در دوره t
PH_{irt}	هزینه بازرسی هر واحد محصول برگشتی r در مرکز تولید/بازرسی i در دوره t
PS_{srt}	هزینه پردازش هر واحد محصول r در مرکز توزیع/جمع‌آوری s در دوره t
PC_{srt}	هزینه پردازش هر واحد محصول جمع‌آوری شده r در مرکز توزیع/جمع‌آوری s در دوره t
PL_{lrt}	هزینه دفع هر واحد محصول r در مرکز دفع l در دوره t
PN_{nrt}	هزینه بازیافت هر واحد محصول r در مرکز بازیافت n در دوره t
TKS_{ks}	زمان بین خرده‌فروش k و مرکز توزیع/جمع‌آوری s (زمان تابعی از فاصله در نظر گرفته شده است).
TIL_{il}	زمان بین مرکز تولید/بازرسی i و مرکز دفع l (زمان تابعی از فاصله در نظر گرفته شده است).
TIN_{in}	زمان بین مرکز تولید/بازرسی i و مرکز بازیافت n (زمان تابعی از فاصله در نظر گرفته شده است).

ادامه جدول ۲

پارامتر	تعریف
TO_{ivt}	زمان عزیمت وسیله نقلیه v از مرکز تولید/بازرسی i در دوره t
C_{is}	فاصله سفر بین مرکز تولید/بازرسی i و مرکز توزیع/جمع‌آوری s
V'_{iv}	متوسط سرعت وسیله نقلیه v مرکز تولید و بازرسی i
$CS_{s's}$	فاصله بین مراکز توزیع/جمع‌آوری s و s'
TD_{ivs}	زمان مورد نیاز برای تخلیه هر واحد محصول از وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i در مرکز توزیع/جمع‌آوری s
TRD_{ilrt}	هزینه حمل هر واحد محصول r از مرکز تولید/بازرسی i به مرکز دفع l در دوره t
TRR_{inrt}	هزینه حمل هر واحد محصول r از مرکز تولید/بازرسی i به مرکز بازیافت n در دوره t
$Cappr_{irt}^b$	ظرفیت تولید محصول r در مرکز تولید/بازرسی i با سطح ظرفیت b در دوره t با توجه به منابع موجود در آن دوره
Cap_{nr}^b	ظرفیت بازیافت محصول r در مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت b
Cap_l^b	ظرفیت مرکز دفع l با سطح ظرفیت b
cap_{iv}	ظرفیت وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i
TC_{ivt}	هزینه هر واحد حمل و نقل وسیله نقلیه v در مرکز تولید/بازرسی i در دوره t
FC_{iv}	هزینه ثابت وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i
BU_{it}	میزان بودجه در دسترس برای مرکز تولید/بازرسی i در دوره t
D_{krt}	تقاضای خرده‌فروش k برای هر واحد محصول r در دوره t
VOL_r	حجم هر واحد محصول r
ET	متوسط میزان آلاینده منتشرشده در هر واحد زمانی توسط وسیله نقلیه
LP_r	عمر محصول r ($LP_r \geq 2$)
PP_{ir}	میزان آلاینده منتشرشده در اثر تولید هر واحد محصول r در مرکز تولید/بازرسی i
PR_{nr}	میزان آلاینده منتشرشده در اثر بازیافت هر واحد محصول r در مرکز بازیافت n
PD_{lr}	میزان آلاینده منتشرشده در اثر دفع هر واحد محصول r در مرکز دفع l
MC_{irt}	هزینه نگهداری موجودی در مرکز تولید/بازرسی i به‌ازای هر واحد محصول r در دوره t
α_r	نرخ بازیافت محصول برگشتی r
β_r	نرخ برگشت محصول r از خرده‌فروش‌ها
BM	عدد مثبت خیلی بزرگ

جدول ۳. متغیرهای موجود در مدل

متغیر	تعریف
W_i^b	اگر مرکز تولید/بازرسی i با سطح ظرفیت b تأسیس شود برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
W_s^b	اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s با سطح ظرفیت b تأسیس شود برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
W_l^b	اگر مرکز دفع l با سطح ظرفیت b تأسیس شود برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
W_n^b	اگر مرکز بازیافت n با سطح ظرفیت b تأسیس شود برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
XKS_{kst}	اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s به خرده فروش k در دوره t تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
XIL_{ilt}	اگر مرکز تولید/بازرسی i به مرکز دفع l در دوره t تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
XIN_{int}	اگر مرکز تولید/بازرسی i به مرکز بازیافت n در دوره t تخصیص یابد برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
X_{ivst}	اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s توسط وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i در دوره t تأمین شود برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
X'_{ivst}	اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s نخستین مرکز ملاقات شده توسط وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i در دوره t باشد برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
X''_{ivst}	اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s آخرین مرکز ملاقات شده توسط وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i در دوره t باشد برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
$XSS_{ivs'st}$	اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s بلافاصله بعد از مرکز توزیع/جمع‌آوری s' توسط وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i در دوره t ملاقات شود برابر با ۱، در غیر این صورت برابر با صفر
OSK_{skrt}	مقدار محصول حمل شده r از مرکز توزیع/جمع‌آوری s به خرده‌فروش k در دوره t .
OIL_{ilrt}	مقدار محصول حمل شده r از مرکز تولید/بازرسی i به مرکز دفع l در دوره t .
OIN_{inrt}	مقدار محصول حمل شده r از مرکز تولید/بازرسی i به مرکز بازیافت n در دوره t .
RSI_{sirt}	مقدار محصول برگشتی r که از مرکز توزیع/جمع‌آوری s به مرکز تولید/بازرسی i در دوره t ارسال می‌شود.
RKS_{ksrt}	مقدار محصول برگشتی r که از خرده‌فروش k به مرکز توزیع/جمع‌آوری s در دوره t ارسال می‌شود.
INV_{irt}	موجودی محصول r در مرکز تولید/بازرسی i در انتهای دوره t .
D_{srt}	تقاضای مرکز توزیع/جمع‌آوری s برای محصول r در دوره t .
Q_{irt}	مقدار تولید محصول r در مرکز تولید/بازرسی i در دوره t .
AT_{ivst}	زمان رسیدن وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i به مرکز توزیع/جمع‌آوری s در دوره t .
GT_{ivst}	زمان عزیمت وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i از مرکز توزیع/جمع‌آوری s در دوره t .
TOC_{it}	مجموع هزینه‌های مرکز تولید/بازرسی i در دوره t (هزینه‌های تولید، بازرسی، نگهداری موجودی و حمل‌ونقل)

مدل ریاضی

$$\begin{aligned} \text{رابطه (۱)} \quad \text{MIN } Z_1 = & \sum_t \max_i \left[\sum_v \left(\max_s \sum_{b \in B_s} W_s^b \cdot X_{ivst} \cdot AT_{ivst} \right) - T0_{ivt} \right] \\ & + \sum_t \max_k \left[\sum_s TKS_{ks} \cdot XKS_{kst} \right] + \sum_t \max_l \left[\sum_l TIL_{il} \cdot XIL_{ilt} \right] + \sum_t \max_n \left[\sum_n TIN_{in} \cdot XIN_{int} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{رابطه (۲)} \quad \text{MIN } Z_2 = & \sum_i \sum_{b \in B_i} F_i^b W_i^b + \sum_s \sum_{b \in B_s} F_s^b W_s^b + \sum_l \sum_{b \in B_l} F_l^b W_l^b + \sum_n \sum_{b \in B_n} F_n^b W_n^b \\ & + \sum_t \sum_i TOC_{it} + \sum_s \sum_k \sum_r \sum_t XKS_{kst} (OSK_{skrt} \cdot PS_{srt} + RKS_{ksrt} \cdot PC_{srt}) \\ & + \sum_l \sum_i \sum_r \sum_t XIL_{ilt} \cdot OIL_{ilrt} \cdot PL_{lrt} + \sum_n \sum_i \sum_r \sum_t XIN_{int} \cdot OIN_{inrt} \cdot PN_{nrt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{رابطه (۳)} \quad \text{MIN } Z_3 = & \sum_i \sum_s \sum_v \sum_{b \in B_s} \sum_t ET \cdot W_s^b \left[(X'_{ivst} + X''_{ivst}) \frac{C_{is}}{V'_{iv}} + \sum_{s'=1}^s XSS_{ivs't} \cdot \frac{CS_{s's}}{V'_{iv}} \right] \\ & + \sum_k \sum_s \sum_t ET \cdot TKS_{ks} \cdot XKS_{kst} + \sum_i \sum_n \sum_t ET \cdot TIN_{in} \cdot XIN_{int} \\ & + \sum_i \sum_l \sum_t ET \cdot TIL_{il} \cdot XIL_{ilt} + \sum_{b \in B_i} \sum_i PO_i^b W_i^b + \sum_{b \in B_s} \sum_s PO_s^b W_s^b \\ & + \sum_{b \in B_n} \sum_n PO_n^b W_n^b + \sum_{b \in B_l} \sum_l PO_l^b W_l^b + \sum_i \sum_r \sum_t Q_{irt} \cdot PP_{ir} \\ & + \sum_i \sum_n \sum_r \sum_t OIN_{inrt} \cdot PR_{nr} \cdot XIN_{int} + \sum_i \sum_l \sum_r \sum_t OIL_{ilrt} \cdot PD_{lr} \cdot XIL_{ilt} \end{aligned}$$

Subject to:

$$\text{رابطه (۴)} \quad AT_{ivst} = X'_{ivst} \left(T0_{ivt} + \frac{C_{is}}{V'_{iv}} \right) + \sum_{s'=1}^s XSS_{ivs't} \left(GT_{ivs't} + \frac{CS_{s's}}{V'_{iv}} \right) \quad \forall i, v, s, t$$

$$\text{رابطه (۵)} \quad GT_{ivst} = AT_{ivst} + \sum_r TD_{ivs} \cdot D_{srt} \cdot X_{ivst} \quad \forall i, v, s, t$$

$$\text{رابطه (۶)} \quad X'_{ivst} + \sum_{s'=1}^s XSS_{ivs't} = \sum_{s'=1}^s XSS_{ivss't} + X''_{ivst} \quad \forall i, v, s, t$$

$$\text{رابطه (۷)} \quad \sum_v \sum_s X'_{ivst} = \sum_{b \in B_i} W_i^b \quad \forall i, t$$

$$X_{ivst} \leq \sum_{s'} X'_{ivs't} \quad \forall i, v, s, t \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_i \sum_v X_{ivst} = \sum_{b \in B_s} W_s^b \quad \forall s, t \quad \text{رابطه ۹}$$

$$X_{ivst} = X'_{ivst} + \sum_{s'} XSS_{ivs't} \quad \forall i, v, s, t \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_s X'_{ivst} = \sum_s X''_{ivst} \quad \forall i, v, t \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\sum_r VOL_r \left(\sum_s X_{ivst} \cdot D_{srt} \right) \leq cap_{iv} \quad \forall i, v, t \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\begin{aligned} TOC_{it} = & \sum_r Q_{irt} \cdot PI_{irt} + \sum_r \sum_s RSI_{sirt} \cdot PH_{irt} + \sum_r INV_{irt} \cdot MC_{irt} \\ & + \sum_v \sum_s [(X'_{ivst} + X''_{ivst}) \cdot C_{is} \cdot TC_{ivt} + X'_{ivst} \cdot FC_{iv}] \\ & + \sum_s \sum_{s'} \sum_v XSS_{ivss't} \cdot CS_{ss'} \cdot TC_{ivt} \\ & + \sum_n \sum_r XIN_{int} \cdot OIN_{inrt} \cdot TRR_{inrt} + \sum_l \sum_r XIL_{ilt} \cdot OIL_{ilrt} \cdot TRD_{ilrt} \end{aligned} \quad \forall i, t \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$TOC_{it} \leq BU_{it} \quad \forall i, t \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$INV_{irt} = INV_{ir(t-1)} + Q_{irt} - \sum_s \left(D_{srt} \cdot \sum_v X_{ivst} \right) \quad \forall i, r, t \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$D_{srt} = \sum_k XKS_{kst} \cdot D_{krt} \quad \forall s, r, t \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\sum_s XKS_{kst} = 1 \quad \forall k, t \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$XKS_{kst} \leq \sum_{b \in B_s} W_s^b \quad \forall s, k, t \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$\sum_n XIN_{int} = \sum_{b \in B_i} W_i^b \quad \forall i, t \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$\sum_l XIL_{ilt} = \sum_{b \in B_i} W_i^b \quad \forall i, t \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$\sum_{b \in B_i} W_i^b \leq 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\sum_{b \in B_s} W_s^b \leq 1 \quad \forall s \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\sum_{b \in B_n} W_n^b \leq 1 \quad \forall n \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\sum_{b \in B_l} W_l^b \leq 1 \quad \forall l \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$OSK_{skrt} = XK S_{kst} \cdot D_{krt} \quad \forall k, s, r, t \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$RKS_{ksrt} = \beta_r \cdot OSK_{skr, t-LP_r} \quad \forall k, s, r, t > LP_r \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$RKS_{ksrt} = 0 \quad \forall k, s, r, t \leq LP_r \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\sum_k RKS_{ksrt} = \sum_i RSI_{sirt} \quad \forall s, r, t \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\sum_n OIN_{inrt} = \alpha_r \cdot \sum_s RSI_{sirt} \quad \forall i, r, t \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\sum_l OIL_{ilrt} = (1 - \alpha_r) \cdot \sum_s RSI_{sirt} \quad \forall i, r, t \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$INV_{irt} \leq \sum_s \left(\sum_{t'=t+1}^{t+LP_r-1} D_{srt'} \cdot \sum_v X_{ivst} \right) \quad \forall i, r, t \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$Q_{irt} \leq \sum_{b \in B_i} Cappr_{irt}^b \cdot W_i^b \quad \forall i, r, t \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$\sum_i XIN_{int} \cdot OIN_{inrt} \leq \sum_{b \in B_n} Cap_{nr}^b \cdot W_n^b \quad \forall n, r, t \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$\sum_r \sum_i XIL_{ilt} \cdot OIL_{ilrt} \leq \sum_{b \in B_l} Cap_l^b \cdot W_l^b \quad \forall l, t \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$RSI_{sirt} \leq \sum_v X_{ivst} \cdot BM \quad \forall i, s, r, t \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$OIN_{inrt} \leq XIN_{int} \cdot BM \quad \forall i, n, r, t \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$OIL_{ilrt} \leq XIL_{ilt} \cdot BM \quad \forall i, l, r, t \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

$$OSK_{skrt} \cdot OIL_{ilrt}, OIN_{inrt}, RSI_{sirt}, RKS_{ksrt}, INV_{irt}, D_{srt}, Q_{irt}, AT_{ivst}, GT_{ivst}, TOC_{it} \geq 0 \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

$$W_i^b, W_s^b, W_l^b, W_n^b, XKS_{kst}, XIL_{ilt}, XIN_{int}, X_{ivst}, X'_{ivst}, X''_{ivst}, XSS_{ivs't} \in \{0,1\} \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

تابع هدف اول، مجموع حداکثر زمان بین مراکز دو سطح متوالی تخصیص یافته به هم را کمینه می‌کند. تابع هدف دوم، به کمینه کردن هزینه‌ها اختصاص دارد. عبارتهای اول تا چهارم تابع هدف، مربوط به هزینه‌های ثابت احداث مراکز با یک سطح ظرفیت معین است. عبارت پنجم به مجموع هزینه‌های تولید و بازرسی، نگهداری موجودی و حمل‌ونقل مرکز تولید/بازرسی i و در نهایت عبارتهای ششم تا هشتم به هزینه عملیاتی مراکز توزیع/جمع‌آوری، بازیافت و دفع اشاره دارند. تابع هدف سوم میزان انتشار گازهای آلاینده را در سر تا سر شبکه کمینه می‌کند که از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول، میزان آلاینده‌گی را که به واسطه حمل‌ونقل وسایل نقلیه بین گره‌های مختلف شبکه در محیط انتشار می‌یابد، محاسبه می‌کند. در بخش دوم میزان آلاینده‌گی که در نتیجه احداث هر یک از مراکز در محیط انتشار می‌یابد، در نظر گرفته شده است و در بخش سوم میزان آلاینده‌گی که به واسطه اجرای فرایندهای مختلف در مراکز تولید/بازرسی، بازیافت و دفع در محیط انتشار می‌یابد، لحاظ شده است. محدودیت ۴ زمان رسیدن وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i به مرکز توزیع/جمع‌آوری s را در دوره t نشان می‌دهد. محدودیت ۵ زمان عزیمت وسیله نقلیه v مرکز تولید/بازرسی i از مرکز توزیع/جمع‌آوری s را در دوره t بیان می‌کند. محدودیت ۶ پیوستگی مسیر را تضمین می‌کند. محدودیت ۷ نشان می‌دهد که اگر مرکز تولید/بازرسی i با سطح ظرفیت b تأسیس شود، آنگاه وسیله نقلیه آن مرکز حتماً یک نخستین مرکز توزیع/جمع‌آوری ملاقات شده دارد. محدودیت ۸ بیانگر آن است که اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s از مرکز تولید/بازرسی i تأمین شود، آن مرکز تولید/بازرسی حتماً به یک s' (نخستین مرکز توزیع/جمع‌آوری) متصل است. محدودیت ۹ نشان می‌دهد اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s با سطح ظرفیت b تأسیس شود، آنگاه از یک مرکز تولید/بازرسی تأمین می‌شود. بر اساس محدودیت ۱۰ اگر مرکز توزیع/جمع‌آوری s از مرکز تولید/بازرسی i تأمین شود، آنگاه آن مرکز در مسیر وسیله حمل‌ونقل مرکز تولید/بازرسی i قرار دارد (نخستین مرکز s در مسیر، یا بعد از مرکز s' در مسیر). محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند که اگر مرکز تولید/بازرسی i نخستین مرکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص یافته را ملاقات کند، آنگاه حتماً آخرین مرکز توزیع/جمع‌آوری تخصیص یافته را هم ملاقات می‌کند. محدودیت ۱۲ نشان می‌دهد که میزان کل تقاضای تأمین شده مراکز توزیع/جمع‌آوری در هر دوره باید حداکثر به اندازه ظرفیت وسیله نقلیه v باشد. محدودیت ۱۳ مجموع هزینه‌های مرکز تولید/بازرسی i شامل هزینه‌های تولید و بازرسی، هزینه نگهداری موجودی و هزینه‌های حمل‌ونقل را در دوره t نشان می‌دهد. محدودیت ۱۴ حداکثر بودجه در دسترس برای هزینه‌های مرکز تولید/بازرسی i در دوره t را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۵ بیانگر میزان موجودی مرکز تولید/بازرسی i در انتهای دوره t است. محدودیت ۱۶ بیانگر این است که تقاضای مرکز توزیع/جمع‌آوری s با مجموع تقاضاهای خرده‌فروشان تخصیص یافته به آن مرکز برابر است. محدودیت ۱۷ تضمین می‌کند هر خرده‌فروش حتماً از یک مرکز توزیع/جمع‌آوری تأمین می‌شود. بر اساس محدودیت ۱۸ خرده‌فروش k در صورتی به مرکز توزیع/جمع‌آوری s تخصیص

داده می‌شود که آن مرکز تأسیس شده باشد. محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهند اگر مرکز تولید/بازرسی i با سطح ظرفیت b تأسیس شود، آنگاه آن مرکز حتماً به یک مرکز بازیافت و دفع تخصیص می‌یابد. بر اساس محدودیت‌های ۲۱ تا ۲۴ اگر هر یک از مراکز تأسیس شوند، آنگاه حتماً یک سطح ظرفیت به آنها اختصاص می‌یابد. محدودیت ۲۵ نشان می‌دهد مقدار محصولی که به خرده‌فروش k ارسال می‌شود برابر با مقدار تقاضای آن خرده‌فروش است. محدودیت ۲۶ مقدار محصول منقضی شده را که از خرده‌فروش k به مرکز توزیع/جمع‌آوری s در دوره t حمل می‌شود، نشان می‌دهد. محدودیت ۲۷ بیان می‌کند که در دوره‌های قبل از طول عمر محصول، هیچ محصولی از خرده‌فروش‌ها به مراکز توزیع/جمع‌آوری ارسال نمی‌شود. محدودیت ۲۸ نشان می‌دهد محصولاتی که از خرده‌فروش‌ها به مراکز توزیع/جمع‌آوری برگشت داده می‌شوند، به‌طور مستقیم برای بازرسی، از مراکز توزیع/جمع‌آوری به مراکز تولید/بازرسی ارسال می‌شوند. محدودیت‌های ۲۹ و ۳۰ بیانگر این هستند که پس از بازرسی کیفیت محصولات منقضی شده در مرکز تولید/بازرسی، بخشی از آن به مرکز بازیافت و بخش دیگر آن به مرکز دفع ارسال می‌شوند. محدودیت ۳۱ حداکثر مقدار موجودی انتهای دوره در مرکز تولید/بازرسی i با توجه به طول عمر محصول را نشان می‌دهد. محدودیت ۳۲ حداکثر مقدار تولید در مرکز تولید/بازرسی i در دوره t را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۳۳ و ۳۴ بیانگر حداکثر ظرفیت مراکز بازیافت و دفع هستند. محدودیت‌های ۳۵، ۳۶ و ۳۷ نشان می‌دهند که اگر دو مرکز در دو سطح متوالی به هم تخصیص یابند، آنگاه محصول بین آنها جابه‌جا می‌شود. محدودیت‌های ۳۸ و ۳۹ نوع متغیرها را مشخص می‌کنند.

روش حل

مدل ارائه شده در این مقاله، یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است. به‌منظور یکپارچه‌سازی توابع هدف، روش LP متریک به کار گرفته شده است. به این صورت که هر تابع هدف به‌تنهایی و بدون در نظر گرفتن توابع هدف دیگر کمینه می‌شود و در نهایت مقدار بهینه توابع هدف (Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*) با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های مسئله در تابع هدف روش LP متریک مطابق رابطه ۴۰ قرار می‌گیرد. جواب بهینه مدل، از حل این مدل تک‌هدفه که به دنبال حداقل کردن فاصله هر تابع از مقدار بهینه خود است، به دست می‌آید (میرزاپور آل هاشم، ملکی و آریانزاد، ۲۰۱۱).

$$\text{رابطه ۴۰} \quad \text{MIN } Z_{LP\text{-metric}} = \left[W_1 \frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*} + W_2 \frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2^*} + W_3 \frac{Z_3 - Z_3^*}{Z_3^*} \right]$$

W_i بیانگر درجه اهمیت (وزن) برای هدف i ام بوده که مرتبط با نظر تصمیم‌گیرنده است $(\sum_{i=1}^3 W_i = 1)$.

ماهیت پیچیده مدل پیشنهادی و قرار گرفتن آن در زمره مسائل NP-hard، لزوم بهره‌گیری از رویکردهای فراابتکاری را ایجاد می‌کند. روش‌های فراابتکاری نه تنها امکان حل مسئله با اندازه‌های بزرگ را به ما می‌دهند، بلکه کوتاه‌تر شدن زمان رسیدن به جواب نزدیک به بهینه را نیز مهیا می‌سازند. از این رو در این مقاله، به‌منظور حل مدل، رویکردی از الگوریتم ژنتیک^۲ پیشنهاد شده است.

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

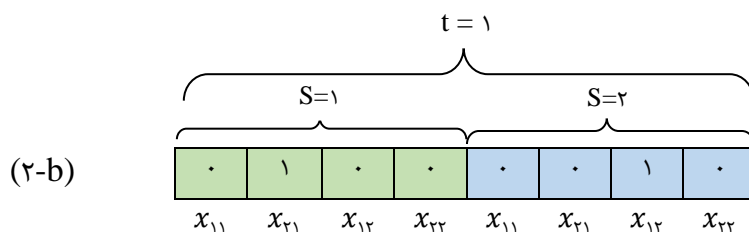
از الگوریتم ژنتیک، به‌عنوان یک روش جست‌وجوی تصادفی یاد می‌شود، زیرا در فضای جواب به‌صورت تصادفی نمونه‌برداری می‌کند. این الگوریتم برای شروع، جمعیتی از کروموزوم‌ها را انتخاب می‌کند که هر یک جوابی از فضای مسئله هستند. پس از تولید جمعیت اولیه، توسط عملگر انتخاب والد، تعدادی از کروموزوم‌ها انتخاب شده و بعد از اجرای عملگرهای تقاطع و جهش روی والدین، فرزندان جدیدی تولید می‌شوند. در نهایت از بین فرزندان و والدین، جمعیت جدید انتخاب می‌شود. الگوریتم تا برقراری یکی از دو شرط تعداد نسل‌های تولیدشده یا تعداد تکرارهای عدم بهبود، تکرار می‌شود. ساختار پیشنهادی الگوریتم ژنتیک چندهدفه به‌صورت زیر است:

نحوه نمایش جواب

هر جواب X ، یعنی یک کروموزوم، شامل تعدادی ماتریس است که هر ماتریس معرف یکی از متغیرهای تصمیم مسئله است. به‌طور مثال در شکل (۲-ا) برای متغیر X_{ivst} یک ماتریس چهاربعدی با ابعاد $T \times S \times V \times I$ تعریف شده، به‌طوری که ستون‌ها نشان‌دهنده دوره‌های زمانی، سطرها بیانگر مکان بالقوه مراکز توزیع/ جمع‌آوری و درایه‌های آن نیز یک ماتریس با ابعاد $i \times v$ است. به این صورت که اگر مرکز تولید/ بازرسی i با وسیله نقلیه v به مرکز توزیع/ جمع‌آوری s در دوره t تخصیص یابد، مقدار درایه مربوطه در آن ماتریس، ۱ و در غیر این صورت مقدار آن صفر می‌شود. به همین صورت برای سایر متغیرها نیز ماتریسی در نظر گرفته خواهد شد. هر کروموزوم دارای رشته‌هایی است که درایه‌های همه ماتریس‌ها را شامل می‌شود.

(۲-ا)

	1	2	...	T
1	$[X]_{i*v}$	$[X]_{i*v}$...	$[X]_{i*v}$
2	$[X]_{i*v}$	$[X]_{i*v}$...	$[X]_{i*v}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮
S	$[X]_{i*v}$	$[X]_{i*v}$...	$[X]_{i*v}$



شکل ۲. نحوه نمایش جواب

شکل (b-۲) قسمتی از کروموزوم را برای متغیر X_{ivst} با دو مرکز تولید/بازرسی، دو وسیله نقلیه و دو مرکز توزیع/جمع‌آوری، در دوره اول، نشان می‌دهد. عدد ۱ بیانگر این است که مرکز تولید/بازرسی ۲ با وسیله نقلیه ۱ به مرکز توزیع/جمع‌آوری ۱ در دوره اول تخصیص می‌یابد. همچنین مرکز تولید/بازرسی ۱ با وسیله نقلیه ۲ به مرکز توزیع/جمع‌آوری ۲ در دوره اول تخصیص می‌یابد.

تولید جمعیت اولیه

برای هر متغیر باینری مسئله، یک عدد صفر یا ۱ و برای متغیرهای عدد صحیح و پیوسته، یک عدد در بازه $[0, 1]$ به صورت تصادفی تولید می‌شود. این کار به اندازه تعداد افراد جمعیت تکرار می‌شود تا جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک ایجاد شود.

تابع برازندگی

از آنجا که مدل مورد بررسی در این مقاله، مدلی چندهدفه است، تابع هزینه کل، از ترکیب خطی سه تابع مجموع هزینه‌های سیستم، مجموع حداکثر زمان و میزان آلاینده‌های منتشرشده در کل شبکه با رویکرد LP متریک به دست می‌آید و مقدار تابع برازندگی برای مقایسه کیفیت دو جواب منحصر به فرد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{evaluation}(X) = Total\ Cost(X) \cdot [1 + Penalty \cdot Total\ Violation(X)] \quad (41)$$

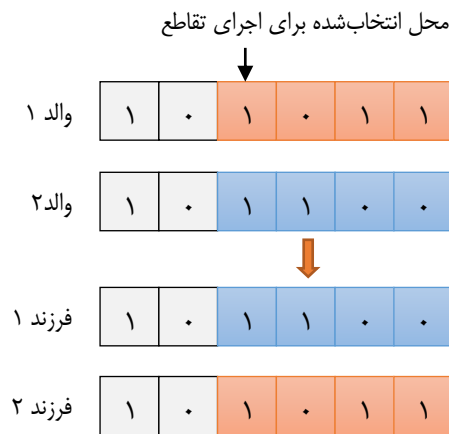
در رابطه ۴۱، $Total\ Cost(X)$ ، هزینه کل حل مسئله پژوهش است که به وسیله جواب منحصر به فرد X به دست آمده است و $Penalty$ نیز جریمه تخطی از محدودیت‌های مسئله است. $Total\ Violation(X)$ ، متوسط میزان غیرموجه بودن جواب X را در هر یک از محدودیت‌های مسئله نشان می‌دهد.

نحوه انتخاب والدین

برای انتخاب والدین، از سه روش نخبه‌گرایی، چرخ رولت و انتخاب تصادفی استفاده شده است. به این صورت که ۳۰ درصد والدین، از بهترین کروموزوم‌های نسل قبل انتخاب می‌شوند، ۵۰ درصد با استفاده از روش چرخ رولت و ۲۰ درصد نیز به صورت تصادفی از نسل قبل انتخاب می‌شوند.

عملگر تقاطع

عملگر تقاطع، روی دو کروموزوم یا دو والد انتخاب‌شده اعمال می‌شود و دو فرزند تولید می‌کند. تعداد کروموزوم‌هایی که برای عملگر تقاطع انتخاب می‌شوند، به نرخ تقاطع بستگی دارند. برای هر کروموزوم انتخاب‌شده، یک عدد تصادفی بین صفر و ۱، تولید شده و توسط روش چرخ رولت، تعیین می‌شود که کدام متغیرها برای اعمال عملگر تقاطع انتخاب می‌شوند. در این الگوریتم برای متغیرهای باینری، از سه روش برای اعمال تقاطع استفاده شده است. ۲۰ درصد متغیرها به روش تک‌نقطه‌ای، ۴۰ درصد به روش دونقطه‌ای و ۴۰ درصد نیز به روش یکنواخت، تحت عملگر تقاطع قرار می‌گیرند.



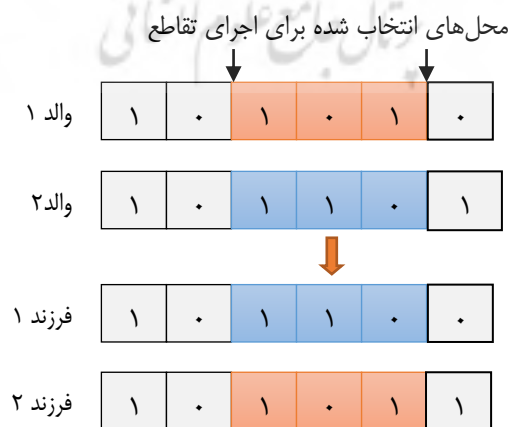
شکل ۳. عملکرد عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای

در روش تک‌نقطه‌ای به صورت تصادفی یکی از ژن‌های کروموزم انتخاب می‌شود و ژن‌های آن نقطه تا انتها برای دو والد انتخاب‌شده با یکدیگر تعویض می‌شوند. تفاوت روش دونقطه‌ای با تک‌نقطه‌ای در این است که در این روش به جای یک ژن، دو ژن به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و ژن‌های بین این دو نقطه بین والدین جابه‌جا می‌شوند. در تقاطع یکنواخت نیز یک توالی به اندازه ابعاد کروموزم به صورت تصادفی از اعداد صفر و ۱ ایجاد می‌شود. سپس بر اساس روابط ۴۲ و ۴۳ مقدار مربوط به هر ژن در کروموزم‌های فرزند محاسبه می‌شود.

$$C1(i) = \alpha(i).P1(i) + (1 - \alpha(i)).P2(i) \quad \text{رابطه ۴۲}$$

$$C2(i) = \alpha(i).P2(i) + (1 - \alpha(i)).P1(i) \quad \text{رابطه ۴۳}$$

در روابط بالا $P1(i)$ و $P2(i)$ مقدار موجود در ژن i ام کروموزم والد اول و دوم، $C1(i)$ و $C2(i)$ نشان‌دهنده مقدار موجود در ژن i ام برای فرزند اول و دوم و $\alpha(i)$ عدد مربوط به i امین مؤلفه از توالی تصادفی تولید شده است. نحوه عملکرد روش‌های مورد استفاده در این بخش در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۴. عملکرد عملگر تقاطع دونقطه‌ای

والد ۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱
والد ۲	۱	۰	۱	۱	۰	۰
توالی α	۰	۱	۱	۰	۰	۱
↓						
فرزند ۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱
فرزند ۲	۱	۰	۱	۰	۱	۰

شکل ۵. عملکرد عملگر تقاطع یکنواخت

عملگر تقاطع مورد استفاده برای متغیرهای عدد صحیح و پیوسته، عملگر تقاطع حسابی است. در تقاطع حسابی ماتریس α با ابعادی مشابه با کروموزوم مد نظر از اعدادی تصادفی در بازه $[-\lambda, 1 + \lambda]$ تولید می‌شود. سپس از روابطی مشابه با روابط ۴۲ و ۴۳ برای تولید فرزندان استفاده می‌شود. در این بخش بایستی در نظر داشت که ممکن است حین محاسبات مقادیری بالاتر از ۱ و کمتر از صفر به ژن‌های فرزندان اختصاص یابد. در این شرایط مقادیر بالاتر از ۱ با مقدار ۱ و مقادیر کمتر از صفر با صفر جایگزین می‌شوند. نمونه عملکرد این نوع تقاطع با در نظر گرفتن مقدار 0.05 برای λ در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

والد ۱	۰/۶۸	۰/۴۵	۰/۲۳	۰/۸۶	۰/۳۴	۰/۱۵
والد ۲	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۸۹	۰/۲۱	۰/۴۸	۰/۰۴
توالی α	۰/۲۳	۱/۰۲	-۰/۰۴	۰/۵۷	۰/۷۸	۰/۳۹
↓						
فرزند ۱	۰/۳۵	۰/۴۶	۰/۹۲	۰/۵۸	۰/۳۷	۰/۰۸
فرزند ۲	۰/۵۸	۰/۱۱	۰/۲	۰/۴۹	۰/۴۵	۰/۱۱

شکل ۶. عملکرد تقاطع حسابی

عملگر جهش

تعداد کروموزوم‌هایی که برای اعمال این عملگر انتخاب می‌شوند، به نرخ جهش بستگی دارند. برای هر کروموزوم انتخاب‌شده، یک عدد تصادفی بین صفر و ۱ تولید می‌شود و توسط روش چرخ رولت، تعیین می‌شود که کدام متغیرها برای جهش انتخاب می‌شوند. عملگر جهش پیشنهادشده در این پژوهش برای متغیرهای عدد صحیح و پیوسته، جهش

گوسی^۱ است. به این ترتیب که برای هر یک از ژن‌ها، یک عدد تصادفی از توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار σ تولید می‌شود، سپس عدد تصادفی ایجادشده، به مقدار آن ژن اضافه شده و ژن‌های جهش‌یافته تولید می‌شوند.

Chromosome: $\langle x_1, \dots, x_n \rangle$

$$x'_i = x_i + N(0, \sigma) \quad i = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

در رابطه ۴۴، x_i معرف ژن λ ام و x'_i ژن جهش‌یافته λ ام است. اگر x'_i به عدد منفی تبدیل شود، مقدار آن صفر و اگر x'_i از ۱ بیشتر شود، مقدار آن، برابر با ۱ در نظر گرفته خواهد شد. شکل ۷ نمونه عملکرد جهش گوسی را نشان می‌دهد. همچنین اگر ژن از جنس باینری باشد، عملکرد جهش باینری پیشنهاد شده است که عدد صفر را به ۱ و عدد ۱ را به صفر تبدیل می‌کند.

x_i	۰/۷	۰/۶	۰/۲	۰/۹	۰/۱	۰/۸
$N(0, \sigma)$	۰/۲	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۵	۰/۶
x'_i	۰/۹	۱	-۰/۱	۱/۱	۰/۶	۱/۴
			↓	↓		↓
x'_i	۰/۹	۱	۰	۱	۰/۶	۱

شکل ۷. عملکرد عملگر جهش گوسی

انتخاب جمعیت برای تکرار بعد

در این پژوهش برای انتخاب جمعیت، از روش نخبه‌گرایی استفاده شده است. به این صورت که نسل قبل و فرزندان تولیدشده در یک ظرف قرار می‌گیرند، سپس به تعداد جمعیت اصلی از بهترین جواب‌ها، برای نسل بعد انتخاب می‌شوند.

تنظیم پارامترها

الگوریتم ژنتیک، به این دلیل در دنیای واقعی و در طبیعت به نتیجه بسیار خوبی رسیده و تنوع ژنتیکی بالایی ایجاد کرده که نرخ تولید فرزندان و نرخ جهش برای تولید هر نسل جدید در طبیعت، کاملاً تصادفی است. این تصادفی بودن، به ایجاد تنوع بزرگی از زنجیره‌های DNA منجر می‌شود و این تنوع می‌تواند در پیدا کردن نقطه بهینه مؤثر باشد. بنابراین از این رفتار الگوریتم ژنتیک در طبیعت برای تنظیم پارامترها الگو گرفته‌ایم، به طوری که ابتدا برای نرخ تقاطع و نرخ جهش از روش آزمایش و خطا، مقدار اولیه‌ای تعیین شده است. برای این منظور، ترکیبات مختلف اعداد را در بازه [۰/۱، ۱] در نظر گرفته و برای هر زوج، یک بار الگوریتم ژنتیک اجرا شده و نتایج ذخیره شده است. نرخ تقاطع

($P_{0C} = 0/5$) و نرخ جهش ($P_{0m} = 0/1$) که بهترین نتیجه را کسب کرده‌اند، به‌عنوان نرخ اولیه در نظر گرفته شدند. سپس به‌منظور بهبود سرعت الگوریتم، نرخ تقاطع و جهش را طی فرایند حل، یک عدد ثابت در نظر نمی‌گیریم. بدین صورت که الگوریتم با تعیین مقادیر اولیه برای نرخ تقاطع (P_{0C}) و نرخ جهش (P_{0m}) شروع می‌شود و پس از ده تکرار، ممکن است طی فرایند حل، نرخ تقاطع و جهش برای تکرارهای مختلف متفاوت شود. کنترل روی نرخ تقاطع و جهش بدین صورت است که اگر پس از تکرار دهم، در هر سه تکرار متوالی، مقدار تابع برازش بهبود پیدا کند، نرخ تقاطع و جهش ثابت می‌ماند و اگر بهبودی حاصل نشود، برای نرخ تقاطع، یک عدد تصادفی از تابع توزیع یکنواخت در بازه [P_{0C} ، $0/9$] و برای نرخ جهش، یک عدد تصادفی از تابع توزیع یکنواخت در بازه [P_{0m} ، $0/4$] تولید می‌شود و الگوریتم، تکرار بعد را با این دو نرخ جدید انجام می‌دهد. این فرایند تا برقراری شرط توقف که در این الگوریتم ۲۰۰ تکرار است، ادامه می‌یابد. این رویکرد کاملاً مطابق با فرایندی است که در طبیعت رخ می‌دهد تا ماهیت تصادفی بودن و تنوع جمعیت را به الگوریتم بدهد و نتیجه آن دستیابی به جواب‌هایی با کیفیت و تنوع بسیار بالا و همچنین سرعت حل مناسب الگوریتم برای مسائل پیچیده با تعداد متغیرهای بالا است. همچنین میزان جمعیت اولیه، ۵۰۰ انتخاب شده است.

نتایج محاسباتی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، ده مسئله نمونه با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تعریف شده که در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای مربوط به مسائل نمونه، به‌صورت تصادفی و با استفاده از توزیع یکنواخت تولید می‌شوند که بازه برخی از پارامترها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۴. مسائل نمونه ایجادشده

تعداد دوره	تعداد تنوع محصول	تعداد انواع و بسپله نقیبه	تعداد مراکز بالقوه دفع	تعداد مراکز بالقوه بازیافت	تعداد خرده‌فروش	تعداد مراکز بالقوه توزیع / جمع‌آوری	تعداد مراکز بالقوه تولید / بازرسی	شماره مسئله
۳	۲	۲	۲	۲	۳	۲	۲	۱
۴	۲	۲	۲	۲	۴	۴	۲	۲
۴	۲	۲	۲	۳	۴	۴	۲	۳
۳	۲	۲	۳	۲	۴	۴	۳	۴
۴	۲	۲	۴	۴	۶	۵	۳	۵
۳	۳	۳	۴	۴	۸	۷	۴	۶
۳	۲	۳	۳	۳	۱۰	۸	۵	۷
۳	۳	۲	۳	۳	۱۲	۱۰	۶	۸
۲	۲	۲	۳	۳	۲۰	۱۵	۱۰	۹
۱	۲	۲	۵	۵	۳۰	۲۰	۱۵	۱۰

جدول ۵. مقادیر اسمی پارامترهای مدل در بازه توزیع یکنواخت

پارامتر	دامنه تغییر	پارامتر	دامنه تغییر
F_i^b	$U(1000000, 18000000)$	TD_{ivs}	$U(0/03, 0/05)$
F_n^b	$U(700000, 1000000)$	Cap_l^b	$U(300000, 500000)$
F_l^b	$U(500000, 800000)$	Cap_{nr}^b	$U(400000, 600000)$
PI_{irt}	$U(800, 2000)$	FC_{iv}	$U(5000, 7000)$
PC_{srt}	$U(150, 200)$	VOL_r	$U(0/0005, 0/006)$
PL_{irt}	$U(100, 250)$	ET	$U(3, 4/7)$
PN_{nrt}	$U(350, 600)$	LP_r	$U(2, 20)$
TKS_{ks}	$U(20, 100)$	PP_{ir}	$U(2/2, 3)$
TIL_{il}	$U(15, 45)$	PR_{nr}	$U(2/5, 3/9)$
TIN_{in}	$U(20, 60)$	PD_{lr}	$U(4, 5)$
C_{is}	$U(60, 400)$	α_r	$U(0/6, 0/8)$
V'_{iv}	$U(20, 50)$	β_r	$U(0/1, 0/2)$
D_{krt}	$U(20, 50)$	MC_{irt}	$U(200, 300)$

از آنجا که مدل ریاضی پیشنهادی برای نخستین بار مطرح شده، ابتدا امکان‌پذیری یا شدنی بودن مدل، با حل مسائل در اندازه‌های کوچک توسط نرم‌افزار گمز^۱ با حل‌کننده بارون، بررسی شده است. سپس به منظور آزمودن کارایی الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از اجرای آن در مثال‌های اندازه کوچک با نتایج حل روش دقیق توسط نرم‌افزار گمز، مقایسه شده‌اند. برای کلیه محاسبات، از کامپیوتری شخصی با مشخصات پردازشگر corei3 2.27 GHZ و حافظه داخلی 4GB استفاده شده است. در جدول ۶ نتایج مربوط به حل مسائل کوچک نشان داده شده است. GAP، درصد اختلاف بین مقدار تابع هدف کل (با رویکرد LP متریک) حاصل از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار گمز است که به صورت رابطه ۴۵ محاسبه می‌شود و در آن OF_{GA} مقدار تابع هدف به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک و OF_{GAMS} مقدار تابع هدف به دست آمده از حل مدل توسط نرم‌افزار گمز است.

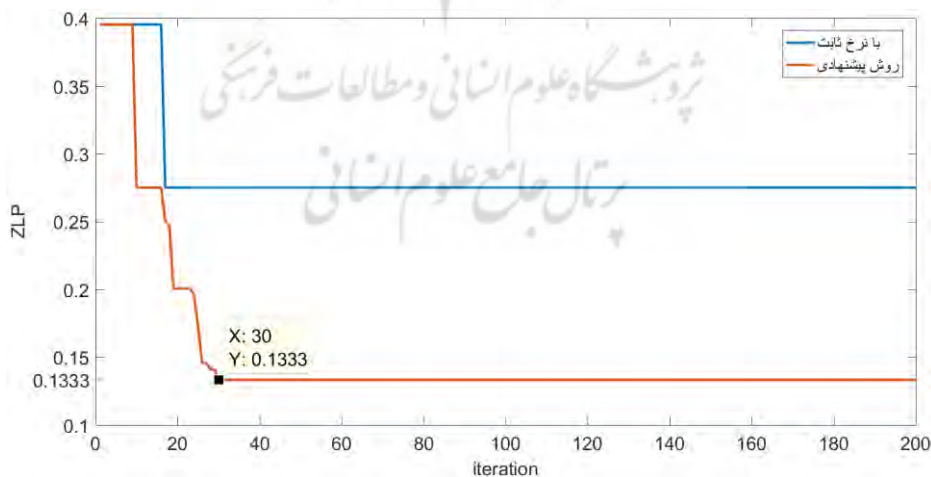
$$GAP = \frac{OF_{GA} - OF_{GAMS}}{OF_{GAMS}} \times 100 \quad \text{رابطه ۴۵}$$

با توجه به جدول ۶ به طور متوسط زمان حل مسائل توسط نرم‌افزار گمز، ۴۱۵ ثانیه است که این مقدار برای الگوریتم ژنتیک ۱۲۰/۹۹ ثانیه است، این امر نشان از زمان حل بسیار مناسب روش فراابتکاری دارد. همچنین کیفیت جواب‌های ارائه شده توسط الگوریتم، از نظر بهترین جواب حاصل برای تابع هدف نیز قابل قبول است. میانگین خطا برای مقدار تابع هدف برابر با ۳/۸۳ درصد است. نتایج، کارایی بالای الگوریتم را از لحاظ زمان و کیفیت جواب‌ها آشکار می‌کند.

جدول ۶. نتایج محاسباتی برای حل مسائل با اندازه کوچک

مسئله	الگوریتم پیشنهادی					گمز					
	Gp (%)	زمان حل (ثانیه)	Z ₃	Z ₂	Z ₁	Z _{LP-metric}	زمان حل (ثانیه)	Z ₃	Z ₂	Z ₁	Z _{LP-metric}
۱	۰/۴	۵۷/۶۷	۸۱۴۵۸۶۰	۳۷۴۵۳۹۲۶	۳۳۴	۰/۱۳۰۸	۹۲	۷۹۴۹۸۸۲	۳۵۴۲۸۸۱۰	۳۷۳	۰/۱۳۰۲
۲	۴/۵۹	۱۴۴/۱۹	۷۴۷۳۹۲۴	۳۷۸۲۵۶۸۶	۳۸۳	۰/۱۳۴۴	۱۷۶	۷۹۵۱۰۷۸	۳۵۸۴۶۰۹۰	۳۷۲	۰/۱۲۸۵
۳	۱/۷۵	۷۰/۸۴	۷۹۸۲۳۳۱۷	۳۸۸۱۹۶۷۲	۴۶۰	۰/۱۳۳۳	۶۵۸	۷۹۵۳۳۷۶	۳۶۸۱۰۳۸۰	۴۹۵	۰/۱۳۱۰
۴	۸/۶	۲۱۱/۲۶	۷۵۷۵۶۱۴	۳۲۹۴۰۰۰۶	۳۰۷	۰/۰۵۴۳	۷۳۴	۷۵۷۵۵۵۴	۳۲۸۸۹۰۱۰	۳۰۱	۰/۰۵۰
میانگین	۳/۸۳	۱۲۰/۹۹					۴۱۵				

به منظور نشان دادن کارایی رویکرد پیشنهادی در تنظیم پارامترهای الگوریتم، مسئله سوم را با ثابت در نظر گرفتن نرخ‌های تقاطع و جهش طی فرایند حل، برای ۲۰۰ تکرار توسط الگوریتم ژنتیک حل کردیم و نتایج آن را با نتایج به دست آمده از الگوریتم، در حالتی که نرخ‌های تقاطع و جهش طی فرایند حل تغییر می‌یافتند، مقایسه کردیم. با توجه به نمودار شکل ۸، تغییر نرخ تقاطع و نرخ جهش طی فرایند حل، به بهبود مداوم الگوریتم منجر شده است و در نهایت در تکرار ۳۰، به جواب نزدیک به بهینه رسیده است، در حالی که وقتی نرخ‌ها را تا انتهای فرایند حل، ثابت در نظر گرفته‌ایم، با توجه به نمودار، الگوریتم از نقطه‌ای به بعد قادر به ایجاد بهبود در جواب نیست و ممکن است در زمان خیلی طولانی‌تری به جواب نزدیک به بهینه دست یابد. این امر کارایی بالای رویکرد پیشنهادی را برای حل مسائل پیچیده با تعداد متغیرهای بالا نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک با نرخ ثابت و روش پیشنهادی

به دلیل ماهیت پیچیده مدل، نرم‌افزار گمز فقط در اندازه‌های کوچک قادر به حل مسائل در زمان قابل قبول است، در حالی که در ابعاد بزرگ‌تر محاسبه جواب دقیق در زمان معقول امکان‌پذیر نیست. بنابراین مثال‌های اندازه متوسط و بزرگ

با الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل شده‌اند. از طرفی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه بسیار پیچیده‌تر از الگوریتم‌های تک‌هدفه است. در مسائل چندهدفه، یک جواب بهینه به‌تنهایی وجود نداشته و مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب به‌عنوان بهینه در نظر گرفته می‌شوند که بایستی با توجه به این مجموعه از جواب‌ها، راجع به عملکرد الگوریتم اظهار نظر شود. برای ارزیابی کیفیت الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، شاخص‌های متعدد و متنوعی وجود دارند که در این مقاله از دو شاخص تعداد جواب‌های غیر مغلوب یافت‌شده (QM^1) و فاصله (SM^2) برای ارزیابی کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی در ابعاد متوسط و بزرگ، استفاده شده است. شاخص تعداد حل‌های غیرمغلوب به‌عنوان معیاری عملکردی برای سنجش کارایی الگوریتم‌ها، نشان‌دهنده تعداد آلت‌رناتیو‌هایی است که می‌توان برای انتخاب به تصمیم‌گیرنده ارائه کرد. در واقع هرچه تعداد این حل‌ها بیشتر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر است. شاخص فاصله، میزان یکنواختی نقاط نامغلوب را در فضای حل اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر کم این معیار بیانگر توزیع یکنواخت‌تر جواب در پارتوی شناسایی‌شده است. نحوه محاسبه این شاخص در رابطه ۴۶ ارائه شده است (نکوقدیرلی و همکاران، ۲۰۱۴).

$$SM = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad \text{رابطه ۴۶}$$

در رابطه بالا، n تعداد جواب‌های پارتو، d_i فاصله اقلیدسی بین دو جواب غیرمغلوب مجاور بوده و \bar{d} متوسط این فاصله‌ها است.

جدول ۷. مقایسه نتایج محاسباتی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ

مسئله	تکرار ۵۰			تکرار ۱۰۰			تکرار ۲۰۰		
	زمان حل (ثانیه)	SM	QM	زمان حل (ثانیه)	SM	QM	زمان حل (ثانیه)	SM	QM
۵	۱۹۰/۹۱	۰/۴۴	۳۱	۳۸۸	۰/۳۹	۳۴	۷۶۸/۶۸	۰/۳۶۲	۳۶
۶	۲۵۳/۸۷	۰/۶۴	۳۰	۵۱۲/۲۳	۰/۵۸	۳۴	۱۰۰۴/۹۶	۰/۳۸۱	۳۹
۷	۴۲۰/۱۴	۰/۵۲۱	۲۷	۸۷۱/۱۷	۰/۳۰۳	۳۱	۱۵۸۳/۲۹	۰/۳۱۵	۳۴
۸	۴۹۹/۱۴	۰/۶۳۶	۳۵	۹۹۷/۴۲	۰/۴۸۲	۳۶	۱۷۱۹	۰/۴۱۳	۴۲
۹	۸۳۳/۱۵	۰/۵۷۲	۳۵	۱۶۴۱/۳۱	۰/۶۱	۳۴	۲۷۹۰/۲۳	۰/۵۱۲	۳۰
۱۰	۲۱۵۲/۴۵	۰/۳۹۴	۲۴	۴۱۷۴/۸۸	۰/۲۲۴	۲۳	۶۰۱۳/۸	۰/۳۳۶	۳۲
میانگین	۷۲۴/۹۴	۰/۵۳	۳۰/۳۳	۱۴۳۰/۸۳	۰/۴۳۱	۳۲	۲۳۱۳/۳۲	۰/۳۸۶	۳۵/۵

1. Quantity Metric
2. Spacing Metric

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۷، میانگین تعداد جواب‌های نامغلوب کسب شده توسط الگوریتم، از $30/33$ به 32 و $35/5$ به ترتیب در تکرارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ افزایش یافته است. با توجه به شاخص فاصله نیز، با افزایش تکرارها، جواب‌های پارتوی به دست آمده توسط الگوریتم، دارای توزیع یکنواخت‌تری است. به طوری که میانگین کلی این شاخص برای ۲۰۰ تکرار برابر $0/386$ است که نسبت به تکرارهای ۱۰۰ و ۵۰ بهتر عمل کرده است. همچنین زمان حل الگوریتم برای مسائل نمونه قابل قبول است. بیشترین زمان حل، مربوط به مسئله ۱۰ با $6013/8$ ثانیه برای ۲۰۰ تکرار است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، در رابطه با مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، شامل مراکز ترکیبی تولید/بازرسی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، خرده‌فروش‌ها و مراکز دفع و بازیافت با در نظر گرفتن چندین دوره، چندین محصول فاسدشدنی، ناوگان حمل‌ناهمگن و چندین سطوح ظرفیت برای مراکز، مطالعه شده است. برای این مسئله، یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سیستم (هزینه مکان‌یابی مراکز با سطح ظرفیت معین، هزینه عملیاتی مراکز، هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری موجودی مرکز ترکیبی تولید/بازرسی)، مجموع حداکثر زمان در هر رده و انتشار آلاینده‌ها در کل شبکه، ارائه شد. به طور همزمان، تعداد و مکان مناسب مراکز و سطوح ظرفیت آنها، چگونگی تخصیص مراکز در سطوح متوالی، مسیر مناسب از مراکز تولید/بازرسی به مراکز توزیع/جمع‌آوری، مقدار تولید و موجودی در هر دوره و مقدار محصول بین مراکز تخصیص یافته به هم در هر دوره توسط مدل تعیین شد. بنابراین تصمیم‌های مکان‌یابی، مسیریابی و موجودی در زنجیره تأمین، بسیار به هم وابسته بوده و تعیین مقادیر بهینه این متغیرها در تعامل با هم است که می‌تواند به یافتن یک سیستم بهینه زنجیره تأمین با حداقل هزینه‌های ممکن منجر شود. با توجه به NP-hard بودن مسئله، برای حل مدل، الگوریتم ژنتیک چندهدفه‌ای ارائه شد. سپس به منظور آزمودن کارایی الگوریتم پیشنهادی، تعدادی مسائل اندازه کوچک، متوسط و بزرگ به صورت تصادفی تولید شدند. میانگین درصد خطای الگوریتم برای تابع هدف در مقایسه با روش دقیق، در حل مسائل اندازه کوچک، کمتر از ۴ درصد گزارش شد و نشان دادیم با رویکردی که در تنظیم پارامترهای الگوریتم اعمال کردیم، الگوریتم قادر است در زمان بسیار کوتاهی به جواب نزدیک به بهینه دست یابد. همچنین برای ارزیابی جواب‌های حاصل از الگوریتم ژنتیک در ابعاد متوسط و بزرگ، از دو شاخص تعداد جواب‌های نامغلوب یافت شده و فاصله استفاده شد. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل با ابعاد متعدد است.

در تحقیقات آتی، در نظر گرفتن اثرهای عدم قطعیت پارامترها روی مدل به وسیله روش‌هایی چون بهینه‌سازی فازی یا استوار، فرض وجود پنجره زمانی انعطاف‌پذیر، توسعه مدل با در نظر گرفتن شرایط تخفیف کلی، لحاظ کردن ارزش زمانی پول با توجه به اینکه که مدل ارائه شده یک مدل چنددوره‌ای است و نرخ تورم می‌تواند بر تصمیم‌گیری‌ها در بلندمدت تأثیرگذار باشد و به کارگیری و توسعه روش‌های فراابتکاری دیگر برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه و مقایسه آن با الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود.

منابع

- محمدی، امیرسالار؛ عالم تبریز، اکبر؛ پیشوایی، میرسامان (۱۳۹۷). طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته همراه با تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت. *فصل‌نامه مدیریت صنعتی*، ۱۰ (۱)، ۶۱-۸۴.
- وکیلی، پریراد؛ حسینی مطلق، سید مهدی؛ غلامیان، محمدرضا؛ جوکار، عباس (۱۳۹۶). ارائه مدل ریاضی مسیریابی - موجودی چندمحصوله برای اقلام دارویی در زنجیره تأمین سرد و روش حل ابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی انطباقی. *فصل‌نامه مدیریت صنعتی*، ۹ (۲)، ۳۸۳-۴۰۷.

References

- Ahmadi Javid, A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 582-597.
- Ahmadi Javid, A., & Seddighi, A.H. (2012). A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks. *Engineering Optimization*, 44(6), 637-656.
- Diabat, A., Abdallah, T., & Henschel, A. (2015). A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration. *Computers & Operations Research*, 54, 245-256.
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). Two-echelon multiple vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, 9-28.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: a comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626.
- Gzara, F., Nematollahi, E., & Dasci, A. (2014). Linear location-inventory models for service parts logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, 69, 53-63.
- Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of Manufacturing Systems*, 42, 93-103.
- Li, R., Lan, H., & Mawhinney, J. (2010). A Review on Deteriorating Inventory Study. *Journal of Service Science and Management*, 3(1), 117-129.
- Liu, B., Chen, H., Li, Y., & Liu, X. (2015). A Pseudo-Parallel Genetic Algorithm Integrating Simulated Annealing for Stochastic Location-Inventory-Routing Problem with Consideration of Returns in E-Commerce. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Vol. 2015.
- Liu, S., & Lee, S. (2003). A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11-12), 941-950.
- Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Malekly, H., Aryanezhad, M.B. (2011). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a

- supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134, 28–42.
- Mohammadi, A.S., Alem Tabriz, A., & Pishvae, M. (2018). Designing Green Closed loop Supply Chain Network with Financial Decisions under Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 10(1), 61- 84. (in Persian)
- Nekooghadirli, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghezavati, V.R., & Javanmard, Sh. (2014). Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 76, 204-221.
- Pishvae, M.S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433-3446.
- Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S.H., & Naderi, B. (2018). Modelling and Solving the Integrated Inventory-Location-Routing Problem in a multi-period and multi-perishable Product Supply Chain with Uncertainty: Lagrangian Relaxation Algorithm. *Computers & Chemical Engineering*, 109, 9-22.
- Sajjadi, S.R., & Cheraghi, S.H. (2011). Multi-products location–routing problem integrated with inventory under stochastic demand. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 7(4), 454-476.
- Saragih, N.I., Nur-Bahagia, S., & Syabri, I. (2018). A Heuristic Method for Location-inventory-routing Problem In A Three-Echelon Supply Chain System, *Computers & Industrial Engineering*, 127, 875-886.
- Shen, Z. M., & Qi, L. (2007). Incorporating inventory and routing costs in strategic location models. *European journal of operational research*, 179 (2), 372-389.
- Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011). Optimal production planning for a multi- product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers & Operations Research*, 38(3), 641-650.
- Tavakkoli-Moghaddam, R. & Raziei, Z. (2016). A New Bi-Objective Location-Routing-Inventory Problem with Fuzzy Demands. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1116–1121.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Forouzanfar, F., Ebrahimnejad, S. (2013). Incorporating location, routing, and inventory decisions in a bi-objective supply chain design problem with risk-pooling. *Journal of Industrial Engineering International*, 9(1), 1-6.
- Tiwari, A., Chang, P., Tiwari, M. K., & Kandhway, R. (2016). A Hybrid Territory Defined evolutionary algorithm approach for closed loop green supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 432-447.
- Turan, B., Minner, S. and Hartl, R. F. (2017). A VNS approach to multi-location inventory redistribution with vehicle routing. *Computers and Operations Research*, 78, 526–536.
- Vakili, P., Hosseini-Motlagh, S.M., Gholamian, M.R., & Jokar, A. (2017). A developed model and heuristic algorithm for inventory routing problem in a cold chain with pharmaceutical products. *Industrial Management Journal*, 9(2), 383-407. (in Persian)

- Yang, X., Ma, H., & Zhang, D. (2010). Research into ILRIP for Logistics Distribution Network of Deteriorating Item Based on JITD. *Information Computing and Applications*, 152-160. Springer, Verlag Berlin.
- Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvaei, M.S. (2014). A robust possibilistic programming approach to multi-period location-allocation of organ transplant centers under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 139-148.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182-214.

