Journal of Industrial Innovations 4(3) (2026) 27 – 52

Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

Sustainable Supply Chain Network Design Based on Value - Creation Indices (Case Study: Tire Industry)

Morteza Khakzar Bafruei [a*], Majid Torabi [b], Mohadeseh Khosravi [c]

[a] Industrial Engineering Department, Engineering Faculty, University of Science and Culture, Tehran, Iran. m.khakzar@usc.ac.ir
[b] Industrial Engineering Department, Engineering Faculty, University of Science and Culture, Tehran, Iran. m_t2662@gmail.com
[c] Industrial Engineering Department, Engineering Faculty, University of Science and Culture, Tehran, Iran. mkhosravi034@gmail.com

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Khakzar Bafruei M, Torabi M, Khosravi M. Sustainable Supply Chain Network Design Based on Value - Creation Indices (Case Study: Tire Industry). Journal of Industrial Innovations. 2026; 4(3):27-52.

https://doi.org/10.22034/jii.2026.736191

KEYWORDS

Supply chain design;
Automobile tire industry;
Index of value-creation;
Sustainability;
Metaheuristic algorithms.

ABSTRACT

Supply chain design in today 's world requires a balance between conflicting economic goals and sustainability requirements. The aim of this study is to present a mathematical model for sustainable supply chain design which covers three dimensions of profitability, environmental and social. The innovation of this paper lies in the simultaneous consideration of the Human Development Index (HDI) and the value creation index within a closed-loop supply chain in the Iranian tire industry. In the baseline paper from which this problem was modeled, only the forward supply chain was taken into account. A bi-objective mixed integer linear programming (MILP) model was developed which follows the first objective function to maximize the profitability and the second objective function to minimize the co_2 emissions in the transportation facilities and routes. The human development index was added to the model to account for the social dimension of sustainability. The proposed model was validated with small dimensions and using exact solution methods. Then, due to the complexity of the problem, two metaheuristic algorithms have been developed to solve it in real dimensions and their performance is compared with the exact solutions. The results indicate that metaheuristic algorithms have good performance in achieving the optimal solutions with short computational time. The sensitivity analysis also shows that considering sustainability considerations, it has a significant effect on the feasibility and final configuration of the supply chain network. The proposed model can be used as an analytical tool to managers to better understand complex relationships between profitability and sustainability and make informed decisions in the design of supply chain network.

Extended Abstract

1. Introduction

In today 's complex world, with the development of industries, the importance of supply chains has been identified more than ever. the main objective of these chains is to create a profitable network consisting of suppliers, factories, distribution centers and customers. in this regard, there are three levels of decision making: strategic (determining the number, size and location of facilities), tactical (commodity flow and inventory level) and operational (short - term planning). according to the definition of the world commission on environment and development (1987), sustainable development needs to meet today 's needs without harming the future generations. in the past, the focus was on economic performance, but today social and legal pressures led industries to improve environmental and social performance and propose a sustainable supply chain concept. this approach combines traditional goals such as cost reduction and productivity increase with environmental and social objectives.

* Corresponding author.
E-mail address:m.khakzar@usc.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22034/jii.2026.736191
Received: April 18, 2026; Received in revised form: May 27, 2026; Accepted: June 1, 2026.
Article type: Research Paper

2. mathematical modeling and formulation

In this research, a multi - level sustainable supply chain network has been designed with constant demand for tire industry with the help of a case study. the present study will design a multi-objective model in closed loop network for different products and relationships between levels, costs, return levels, green and optimization.

3. the implementation of the model and the analysis of the data

Each research problem in mathematical operations and modeling are two methods of accurate and approximate solution. usually, in exact method the input values for solving the problem are not very large and the problem model is solved in acceptable time. but in the present world due to the large number of models, exact solution methods are not able to solve the models at the desired time, so researchers have applied approximate methods. these methods solve the problem at low time and obtain very close solution to the optimal solution, including approximate methods, meta - heuristic methods.

4. conclusion

In this research, a multilevel, multi-period and multiple products model is proposed for designing a closed loop supply chain network in fixed demand conditions and considering secondary customers of the system.the present model, in the forward direction, has the suppliers, producers (production and reproduction units as a facilitator), customers and in the backward direction have the levels of product collection, destruction, secondary customers.the model is mixed linear programming and has the objective function to maximize the profit and also reduce the house flower gases.

نوآوری‌های صنعتی، دوره ۴، شماره ۳، سال ۱۴۰۵، صفحات ۲۷ تا ۵۲

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار بر اساس شاخص‌های ایجاد ارزش (مطالعه موردی صنعت تایر خودرو)

مرتضی خاکزار بفروئی [الف*]، مجید ترابی [ب]، محدثه خسروی [ج]

[الف] گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران. m.khakzar@usc.ac.ir

[ب] گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران. m_t2662@gmail.com

[ج] گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران. mkhosravi034@gmail.com

واژگان کلیدی

طراحی زنجیره تأمین؛ صنعت تایر خودرو؛ شاخص ایجاد ارزش؛ پایداری؛ الگوریتم‌های فراابتکاری.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

چکیده

طراحی زنجیره تأمین در دنیای امروز نیازمند ایجاد توازن میان اهداف متضاد اقتصادی و الزامات پایداری است. پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین پایدار حلقه بسته انجام‌شده که به‌طور هم‌زمان سه بعد سودآوری، زیست‌محیطی و اجتماعی را پوشش می‌دهد. نوآوری این مقاله، در نظر گرفتن هم‌زمان شاخص توسعه انسانی (HDI) و شاخص ایجاد ارزش در یک زنجیره حلقه بسته در صنعت تایر در ایران است. در مقاله پایه‌ای که این مسأله از آن الگو گرفته شده است، زنجیره تأمین روبه‌جلو در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی مسأله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط دوهدفه توسعه داده شد که تابع هدف اول بیشینه‌سازی سودآوری و تابع هدف دوم کمینه‌سازی انتشار گاز دی‌اکسید کربن در تسهیلات و مسیرهای حمل‌ونقل را دنبال می‌کند. برای لحاظ کردن بعد اجتماعی پایداری، شاخص توسعه انسانی (HDI) به‌صورت محدودیت به مدل اضافه شده است. مدل پیشنهادی ابتدا با ابعاد کوچک و استفاده از روش‌های حل دقیق اعتبارسنجی شد. سپس با توجه به پیچیدگی مسأله، دو الگوریتم فراابتکاری چندهدفه برای حل آن در ابعاد واقعی توسعه یافته و کارایی آنها با جواب‌های دقیق مقایسه شد. نتایج حاکی از کارایی مطلوب الگوریتم‌های فراابتکاری در دستیابی به جواب‌های نزدیک به بهینه با زمان محاسباتی کوتاه است. تحلیل حساسیت‌های انجام‌شده نیز نشان می‌دهد که لحاظ کردن هم‌زمان ملاحظات پایداری، تأثیر معناداری بر امکان‌پذیری و پیکربندی نهایی شبکه زنجیره تأمین دارد. مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری تحلیلی در اختیار مدیران قرار گیرد تا روابط پیچیده میان سودآوری و پایداری را بهتر درک کرده و تصمیمات آگاهانه‌تری در طراحی شبکه زنجیره تأمین اتخاذ نمایند.

۱- مقدمه

در دنیای پیچیده امروز، با گسترش صنایع، اهمیت زنجیره‌های تأمین بیش‌ازپیش مشخص‌شده است. هدف اصلی طراحی این زنجیره‌ها، ایجاد شبکه‌ای سودآور شامل تأمین‌کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز توزیع و مشتریان است. در این راستا، سه سطح تصمیم‌گیری استراتژیک (تعیین تعداد، اندازه و مکان تسهیلات)، تاکتیکی (جریان کالا و سطح موجودی) و عملیاتی (برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت) وجود دارد. بر اساس تعریف کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه (۱۹۸۷)، توسعه پایدار باید نیازهای امروز را

* نویسنده مسئول؛

آدرس پست الکترونیک: m.khakzar@usc.ac.ir

بدون آسیب به نسل‌های آینده تأمین کند. در گذشته، تمرکز بر عملکرد اقتصادی بود، اما امروزه فشارهای اجتماعی و قانونی، صنایع را به سمت بهبود عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی سوق داده و مفهوم زنجیره تأمین پایدار را مطرح کرده است. این رویکرد، اهداف سنتی مانند کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری را با اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی تلفیق می‌کند. یک سازمان واقعاً پایدار باید سه رکن اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را مد نظر قرار دهد. بااین‌حال، در ادبیات موضوع، به بعد اجتماعی کمتر توجه شده و شاخص‌های آن (غیر از ایجاد اشتغال) به‌ندرت بررسی شده‌اند. همچنین، شاخص‌های تولید ارزش مانند ارزش‌افزوده اقتصادی و NPV کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مدل‌ها، هزینه‌ها بر اساس کالای فروخته‌شده محاسبه می‌شود، نه صرفاً بر اساس جریان کالا. این مقاله به بررسی صنعت تایر خودرو می‌پردازد. تنوع محصولات و وجود مشتریان متفاوت، نیازمند برنامه‌ریزی هدفمند است. در این مطالعه، با طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار بر اساس شاخص‌های تولید ارزش، اهداف حداکثرسازی تولید ارزش (با استفاده از شاخص NPV)، کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2) و انتخاب مکان‌هایی با کمترین سطح توسعه‌یافتگی (HDI) برای تأکید بر جنبه اجتماعی دنبال می‌شود. پس از مدل‌سازی، مسأله با الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب و ازدحام ذرات حل می‌شود. در ادامه در بخش دوم مقاله ادبیات تحقیق مرور شده و شکاف تحقیقاتی ارائه شده است. در بخش سوم مقاله مدلسازی مسأله تشریح شده است. در بخش چهارم و پنجم، به ترتیب نتایج حل مدل به همراه تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات

در مسائل طراحی زنجیره تأمین پایدار، سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود اما مرور ادبیات نشان می‌دهد که به بعد اجتماعی توجه کمی شده و بیشتر به شاخص اشتغال توجه شده است. محققانی مانند احمدی و همکاران [۱]، باربوسا و همکاران [۲] و پوپویک و همکاران [۳] به کمبود چارچوب جامع و تعریف شفاف برای شاخص‌های اجتماعی اشاره‌کرده‌اند. موتا و همکاران [۴] و مارتا و همکاران [۵] نیز تأکید دارند که بیشتر مطالعات تنها به شاخص ایجاد شغل بسنده کرده‌اند و فرصت‌های پژوهشی زیادی برای بررسی سایر شاخص‌های اجتماعی و مالی وجود دارد. از سوی دیگر، به شاخص‌های تولید ارزش در زنجیره تأمین کمتر پرداخته شده است. با توجه به استراتژیک بودن صنعت تایر خودرو، طراحی یک زنجیره تأمین پایدار برای این محصول ضرورتی انکارناپذیر است. در این بخش پیشینه تحقیقات در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار، با تمرکز بر ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بررسی شده است.

ملو و همکاران [۶] یک مسأله برنامه‌ریزی پایدار پویا برای چندین محصول و در چهار سطح را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها در ابتدا به کلاس‌بندی مطالعه خود پرداخته و مدل را در کلاس اول شامل دو سطح مراکز توزیع و مشتریان، کلاس دوم در سه سطح شامل کارخانه، مراکز توزیع و مشتریان و کلاس سوم شامل چهار سطح کارخانه، مراکز توزیع مرکزی، مراکز توزیع محلی و مشتریان طبقه‌بندی کرده‌اند. در انتهای این مقاله به تدوین نتایج عملی خود و با استفاده از آنالیز حساسیت و بکارگیری مسائل با ابعاد مختلف پرداخته شده است. ملو و همکاران [۷] در یک مطالعه مروری به بررسی مقالات گوناگون در حوزه مکان‌یابی تسهیلات پرداخته‌اند. آنان به این نکته تأکید داشته‌اند که طراحی مدلی برای برنامه‌ریزی پایدار نقشی اساسی و مهم در تصمیمات استراتژیک زنجیره‌تأمین ایفا می‌کند. مطالعات آنان نشان داده است که دسته بسیار زیادی از مقالات به طراحی مدلی تک کالایی و قطعی و در یک دوره زمانی برای برنامه‌ریزی پایدار در زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند و مدل‌های چندکالایی و در چند دوره و با رویکرد حل غیرقطعی از جمله مواردی است که کمتر و تنها در سال‌های اخیر به آن پرداخته شده است.

یک مدل چندهدفه از زنجیره‌تأمین حلقه بسته برای مسأله برنامه‌ریزی پایدار توسط امین و ژانگ [۸] پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی آنان شامل چهار سطح به‌صورت چندین کارخانه، مراکز جمع‌آوری، فروشگاه‌ها و محصولات تحویلی به مشتریان است. توابع هدف نیز شامل کمینه‌کردن هزینه‌های کل زنجیره‌تأمین پیشنهادی و درنظر گرفتن عوامل زیست‌محیطی است. این پژوهش برای حل مدل پیشنهادی خود از روش مجموع وزنی و روش محدودیت اپسیلون برای مواجهه با دو هدفه بودن مدل بهره برده است. شانکار و همکاران [۹] به طراحی یک مدل چند هدفه برای برنامه‌ریزی پایدار چندسطحی در شبکه زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند. آنان زنجیره‌تأمین پیشنهادی خود را بر اساس یک کالا و چهار سطح در نظر گرفته‌اند. این چهار سطح شامل

تأمین‌کنندگان، مراکز تولید، مراکز توزیع و مشتریان بوده است. هدف آن‌ها کمتر کردن هم‌زمان هزینه‌های مربوط به برنامه‌ریزی پایدار و نیز هزینه‌های جابجایی مواد در زنجیره‌تأمین بوده است. آنان برای حل مدل پیشنهادی خود از الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کرده‌اند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها کارایی بالای خود در مدل‌سازی چهار سطحی برای برنامه‌ریزی پایدار را نشان داده است.

شهابی و همکاران [۱۰] به طراحی مدلی برای کنترل موجودی و نیز برنامه‌ریزی پایدار در شبکه زنجیره‌تأمین چندسطحی پرداخته‌اند. مدل پیشنهادی آن‌ها شامل چهار سطح توزیع‌کنندگان، انبارها، مراکز فعالیت و خرده‌فروشان بوده است. نکته قابل‌توجه در این مطالعه استفاده از مراکز فعالیت می‌باشد که در نقش یک توزیع‌کننده عمده به کار گرفته می‌شود تا هزینه‌های حمل‌ونقل ناشی از انتقال بار کاهش یابد. تابع هدف این مسأله به‌صورت کمینه کردن هزینه‌های ناشی از حمل‌ونقل و نگهداری موجودی می‌باشد. شکل تابع هدف و محدودیت‌های مسأله از نوع مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بوده است.

افشاری و همکاران [۱۱] یک مدل چند هدفه برای برنامه‌ریزی پایدار در شبکه زنجیره‌تأمین سبز طراحی و مدل‌سازی کرده‌اند. این مدل به مکان‌یابی مراکز توزیع و خدمات در یک جریان روبه‌جلو و بالعکس می‌پردازد. تابع هدف مسأله به‌صورت هم‌زمان به دنبال کاهش هزینه‌های ناشی از حمل‌ونقل و نگهداری موجودی و افزایش سطح رضایت‌مندی مشتریان با رویکرد پایدار است. مدل مسأله به‌صورت مدل عدد صحیح مختلط می‌باشد و برای حل آن از نرم‌افزارهای تجاری و با استفاده از یک نمونه مطالعاتی استفاده شده است.

یک برنامه‌ریزی ریاضی برای مکان‌یابی محصولات کشاورزی توسط اعتمادی‌نیا و همکاران [۱۲] پیشنهاد شده است. در مقاله آنها، یک سیاست کلی تحت عنوان فروش عمده کالا در این مسأله ارائه شده است. این مدل در سه سطح و شامل مرکز تولید، مراکز توزیع و سطح مصرف تعریف شده است. مدل مسأله به‌صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط می‌باشد که شامل کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه زنجیره‌تأمین است و مبحث انتقال کالا به مراکز تسهیلات را نیز در نظر می‌گیرد. نتایج حاصل از این مقاله نشان‌دهنده صرفه‌جویی اقتصادی در تولید محصولات کشاورزی بوده است.

طراحی یک مدل از زنجیره‌تأمین حلقه بسته با رویکرد مکان‌یابی- مسیریابی تسهیلات توسط ژاله‌چیان و همکاران [۱۳] پیشنهاد شده است. نکته موردتوجه در این پژوهش بررسی موضوع مطرح‌شده در حالت وجود عدم قطعیت است. جهت مقابله با این عدم قطعیت، از یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی برای مسأله پیشنهادشده است. سطوح مختلف پیشنهادشده برای این مدل شامل توزیع‌کننده، مراکز توزیع باز (دائمی)، مراکز توزیع احتمالی، مراکز توزیع و بازیافت باز و خرده‌فروش است. همچنین جهت حل مدل از رویکردهای تئوری بازی‌ها و الگوریتم فراابتکاری استفاده شده است.

یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط، برای مکان‌یابی در مبحث موجودی زنجیره‌تأمین حلقه بسته توسط کایا و اورک [۱۴] پیشنهاد شده است. این مدل جهت مکان‌یابی بهینه تسهیلات، حجم موجودی، هزینه‌های مربوط به محصولات جدید و جمع‌آوری محصولات استفاده‌شده طراحی و مدل‌سازی شده است. شکل تابع هدف مسأله به‌صورت بیشینه‌سازی سود کل زنجیره‌تأمین است. برای حل مدل پیشنهادی مسأله از روش‌های فراابتکاری استفاده شده است. این الگوریتم‌های فراابتکاری شامل آنیل شبیه‌سازی‌شده، جستجوی ممنوعه و الگوریتم ژنتیک است و این نتایج این الگوریتم‌ها برای مسائل با ابعاد مختلف، با روش جستجوی همسایگی مقایسه شده‌اند.

یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی استوار برای شبکه زنجیره‌تأمین سبز توسط مارتینز و فرانسو [۱۵] ارائه شده است. هدف از زنجیره‌تأمین سبز طراحی شده توسط آنان به دست آوردن تعداد و نقاط بهینه تسهیلات برای خدمت‌دهی به مشتریان و به‌صورت هم‌زمان کمینه کردن انتشار گاز کربن دی‌اکسید است. این نویسندگان، نقش برنامه‌ریزی استوار و هزینه‌های حمل‌ونقل در انتشار گاز کربن دی‌اکسید و در سطوح تقاضای مختلف مشتریان بررسی می‌کنند. طلایی و همکاران [۱۶] یک مدل زنجیره‌تأمین سبز برای برنامه‌ریزی پایدار در زنجیره‌تأمین حلقه بسته و با سطوح برگشت‌پذیر ارائه داده‌اند. زنجیره‌تأمین ارائه‌شده در این مطالعه از نوع دو تابع هدفه است و به بررسی همزمان سود اقتصادی زنجیره‌تأمین و کاهش گاز کربن دی‌اکسید پرداخته است. همچنین

مدل پیشنهادی از نوع مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط است و سطوح روبه‌جلو و رو به عقب را در نظر می‌گیرد. روش حل این پژوهش با استفاده از روش محدودیت اپسیلون بوده و برای نشان دادن کارایی مدل از یک نمونه مطالعاتی استفاده‌شده است.

یک مسأله برنامه‌ریزی پایدار برای شبکه زنجیره‌تأمین جهانی توسط امین و باکی [۱۷] پیشنهاد شده است. مدل آن‌ها شامل یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته است که در آن جریان روبه‌جلو و نیز در جهت برگشت در نظر گرفته شده‌اند. مدل مسأله چند هدفه و از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است. همچنین مدل با استفاده از یک نمونه مطالعاتی در کانادا پیاده‌سازی و اجرا شده است. سیرنیواسان و خان [۱۸] نیز از یک مدل چند سطحی برای تولید و بازتولید در مبحث برنامه‌ریزی استوار بهره برده‌اند. زنجیره‌تأمین پیشنهادی در مدل به‌صورت حلقه بسته بوده است و تابع هدف مسأله کمینه‌سازی هزینه‌های درگیر در زنجیره می‌باشد. همچنین شکل مدل مسأله به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته با رویکرد سناریویی بوده است.

خراسانی و الماسی‌فرد [۱۹] به طراحی مدلی دو هدفه برای برنامه‌ریزی استوار در زنجیره‌تأمین سبز یا سطوح مختلف عدم قطعیت‌ها پرداخته‌اند. هدف از مدل‌سازی مسأله کمینه کردن هزینه‌های ناشی از زنجیره‌تأمین و نیز کاستن اثرات منفی محیطی بر روی عملکرد زنجیره سبز است. برای رویارویی با عدم قطعیت‌ها در مدل از رویکرد منطق فازی استفاده شده است. همچنین سه مدل سه سطحی و دارای سطوح توزیع‌کنندگان، تولیدکنندگان و مشتریان می‌باشد. از سایر مطالعات اخیر انجام‌شده می‌توان به مطالعات یادگاری و همکاران [۲۰] اشاره کرد. آنان به طراحی یک مدل از زنجیره‌تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. همچنین مسأله لجستیک و نیز تصمیم‌گیری در مورد مکان تسهیلات را موردتحقیق قرار داده‌اند. روش بکار برده شده در این مسأله استفاده از جستجوی همسایگی است. یک مسأله تولید و مکان‌یابی برای مسأله مراکز تولید جمعی توسط استرانگ و همکاران [۲۱] پیشنهاد شده است. مدل شامل ارائه مسأله‌ای دوسطحی برای مکان‌یابی تولید جمعی فولاد و آهن‌آلات و سایر تجهیزات وابسته به آن است. مدل مسأله شامل کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل میان این مراکز تولید است و از روش P-Median برای حل مدل بهره برده است.

سرکار و همکاران [۲۲] به بررسی مسأله برنامه‌ریزی پایدار برای گازهای تجدید پذیر جهت تبدیل گازهای گلخانه‌ای به گازهای مورد استفاده پرداخته‌اند. مدل آنان شامل درنظر گرفتن شاخص‌های زیست‌محیطی است که در چهار سطح زنجیره مورداستفاده قرار گرفته است. همچنین مدل به‌صورت یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بوده و برای حل از روش فراابتکاری ژنتیک بهره جسته‌اند. سعادتی و حسینی‌نژاد [۲۳] در یک مطالعه موردی در یک کارخانه شکر در ایران مسأله برنامه‌ریزی استوار برای بهره‌برداری از ضایعات شکر را موردبررسی خود قرار داده‌اند. آنان به تعیین تعداد مکان‌های موردنیاز، ظرفیت هر تسهیل، روش انتقال مناسب و جریان مواد در هر مرکز کارخانه پرداخته‌اند. نتایج مدل‌سازی آنان منجر به کاهش میزان کمبودها در تولید شده است.

مارتا و همکاران [۵] به طراحی یک مدل شبکه زنجیره‌تأمین پایدار پرداختند. آن‌ها هدف اقتصادی را حداکثر کردن مقدار تجمعی ارزش‌افزوده اقتصادی در دوره‌های مختلف در نظر گرفتند و در مدل از دو هدف EVA و MVA استفاده کردند. EVA نشان‌دهنده تولید ثروت در شرکت است و مقدار آن از تقسیم سود بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری توسط سهام‌داران، محاسبه می‌شود. MVA شاخص تجمعی از عملکرد شرکت می‌باشد و از مجموع EVA هایی که در آینده بدست خواهد آمد، محاسبه می‌شود. برای هدف محیط‌زیستی کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن و برای هدف اجتماعی شاخصی به‌عنوان توسعه انسانی (HDI) تعریف کردند که شامل ۳ شاخص زیر است.

۱- زندگی سالم و طولانی که با امید به زندگی در بدو تولد اندازه‌گیری می‌شود.
۲- دسترسی به آموزش که با میانگین سال‌های تحصیل اندازه‌گیری می‌شود.
۳- استاندارد زندگی مناسب که با سرانه درآمد ناخالص ملی اندازه‌گیری می‌شود.

آن‌ها با توجه به سه مورد فوق برای هر منطقه شاخص توسعه انسانی را حساب کرده‌اند (عددی بین صفر تا ۱). ضمناً در مدل تعریف کردند که کارخانه‌ها و مراکز توزیع باید در محل‌هایی با شاخص توسعه انسانی پایین باز شوند. بنابراین مجموع HDI برای

بازکردن تسهیلات، باید کمتر یا مساوی با میانگین HDI برای همه محل‌های کاندید باشد.

دلفانی و همکاران [۲۴] برای طراحی شبکه زنجیره تأمین دارویی تحت شرایط عدم قطعیت یک مدل جدید مکان‌یابی-تخصیص-موجودی را به‌عنوان یک سیستم حمل‌ونقل چند هدفه، چند سطحی، چند محصولی، چند دوره‌ای و چندوجهی پیشنهاد می‌دهند. مدل پیشنهادی آن‌ها شامل اهداف چندگانه حداقل رساندن کل هزینه‌ها و زمان تحویل و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان سیستم حمل‌ونقل به‌طور هم‌زمان است. برای کنترل اثرات پارامترهای دارای عدم قطعیت از جمله هزینه‌های سفارش، تحویل، خرید و حمل‌ونقل و ظرفیت وسایل نقلیه، انبارها و مراکز توزیع، یک رویکرد بهینه‌سازی فازی استوار، توسعه داده‌شده است. آن‌ها برای حل مدل از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی غیرمغلوب (NSGA-II) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO) استفاده کرده‌اند.

عباسی و همکاران [۲۵] مدل ریاضی عدد صحیح مختلط چند هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز در طول همه‌گیری کووید-۱۹ ارائه می‌دهند که مدل پیشنهادشده توسط آنها سه اصل پایداری را هم شامل می‌شود (حداقل کردن انتشار گاز کربن دی‌اکسید و حداقل کردن کل هزینه‌ها). هزینه‌های در نظر گرفته‌شده توسط آن‌ها شامل هزینه‌های ضدعفونی و گندزدایی، هزینه‌های تجهیزات حفاظت شخصی (PPE)، آزمایش‌های کووید-۱۹، آموزش، داروها، واکسن‌ها و هزینه‌های واکسیناسیون می‌شود.

کومار و کومار [۲۶] برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار در شرایط عدم قطعیت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه کرده‌اند که هدف آن حداقل‌کردن هزینه‌های کلی (هزینه‌های تأسیس، تولید و حمل‌ونقل/مسیریابی) ضمن در نظر گرفتن انتشار کربن و چند عامل اجتماعی به‌طور هم‌زمان است. آن‌ها برای پرداختن به عدم قطعیت از برنامه‌ریزی مبتنی بر شانس استفاده کرده‌اند.

گلی و همکاران [۲۷] یک شبکه زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر، پایدار چند محصولی، چند دوره‌ای و مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) با یک سیستم زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس ارائه کرده‌اند. اجزا این زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع، مشتریان مرحله اول و دوم، مراکز تعمیر و جداسازی، مراکز بازیافت و مراکز دفع است. به‌منظور ایجاد انعطاف‌پذیری در این زنجیره تأمین، امکان ارسال مستقیم به مشتریان از مراکز توزیع یا کارخانه‌های تولیدی وجود دارد. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه است که آن‌ها با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی به یک مدل تک هدفه تبدیل می‌کنند. علاوه‌بر این، در این مقاله برای مقابله با عدم قطعیت در پارامتر تقاضا، از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده می‌شود. سعیدی‌فر و همکاران [۲۸] یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی زنجیره تأمین پایدار با تاکید بر ابعاد تاب‌آوری ارائه کرده‌اند. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها توانایی ایجاد تعادل بین اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را دارد و می‌تواند پاسخ مناسبی به تغییرات و اختلالات احتمالی در زنجیره تأمین ارائه‌دهد.

محمدقاسمی و همکاران [۲۹] برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار در صنعت برق تحت عدم قطعیت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه‌کرده‌اند. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها شامل مکان‌یابی مراکز تولید، انتخاب تأمین‌کننده، تخصیص بهینه جریان و تعیین قیمت بهینه پنل‌های خورشیدی است. اهداف پایداری مدل شامل حداکثر سازی سود زنجیره تأمین، حداقل سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و حداکثرسازی قابلیت اطمینان است. آن‌ها به‌منظور کنترل پارامترهای غیرقطعی مدل روش بهینه‌سازی استوار امکانی استفاده کرده‌اند. همچنین آن‌ها برای حل مدل از هر دو روش دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کرده‌اند.

رضوی‌نژاد و همکاران [۳۰] یک چارچوب برای مدیریت چابک زنجیره تأمین دارو با تمرکز بر اینترنت اشیا و تجزیه‌وتحلیل کلان‌داده‌ها برای مدیریت مؤثر زنجیره تأمین داروی کشور ایران ارائه کرده‌اند. برای تحقق این هدف آن‌ها به طراحی شبکه زنجیره‌تأمین دارو با هدف حداقل‌کردن هزینه‌ها و حداکثر سازی تقاضای برآورده نشده پرداخته‌اند. با توجه به وجود عدم قطعیت در تقاضای دارو و هزینه‌های حمل‌ونقل، از روش برنامه‌ریزی امکانی استوار برای کنترل پارامترهای غیرقطعی استفاده شده است.

مظفری و همکاران [۳۱] به توسعه مدل ریاضی شبکه زنجیره‌تأمین معکوس پایدار جهت مدیریت پسماند جامد شهری پرداخته‌اند. در مدل ارائه شده توسط آن‌ها پارامترهای هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز مختلف غیرقطعی در نظر گرفته‌شده است. همچنین آن‌ها جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار و روش برتسیمس و سیم و برای حل مدل چند هدفه از روش محدودیت اپسیلون استفاده کرده‌اند.

سعیدی و همکاران [۳۲] یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه را معرفی می‌کنند که یک سیستم صف‌بندی را در عملیات حمل‌ونقل ادغام می‌کنند و درعین‌حال از پنل‌های خورشیدی برای تأمین انرژی تأسیسات کشاورزی با انرژی پاک استفاده می‌کنند. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در زمان انتظار و جایگزینی برق تأمین‌شده از شبکه با انرژی تجدیدپذیر، آلودگی و هزینه را به حداقل می‌رساند. آن‌ها مثال کوچک با استفاده از یک رویکرد دقیق حل کرده‌اند، درحالی‌که در سناریوهای بزرگ از الگوریتم فرا ابتکاری بهینه‌سازی ملخ (GOA) استفاده کرده‌اند.

سجودی و همکاران [۳۳] یک مطالعه کامل ارائه می‌دهند که یک شبکه زنجیره تأمین ماهی دو کاناله دایره‌ای را با در نظر گرفتن ابعاد پایداری که سهم اصلی آن است، طراحی می‌کنند. مدل پیشنهادی توسط آن‌ها یک چارچوب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند محصولی، چند دوره‌ای و چند هدفه است که اهداف آن به حداکثر رساندن سود کل و تأثیر اجتماعی و درعین‌حال به حداقل رساندن تأثیر زیست‌محیطی است. علاوه بر این، آن‌ها از روش برنامه‌ریزی فازی استوار برای مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از ماهیت پویای محیط کسب‌وکار استفاده می‌کنند. برای حل مدل چند هدفه پیشنهادی، یک راه‌حل جدید به نام برنامه‌ریزی آرمانی چبیشف چندگزینه‌ای فازی با تابع مطلوبیت توسعه داده‌اند. برای نشان دادن کاربرد مدل توسعه‌یافته، آن‌ها یک مطالعه موردی در یک کارخانه بسته‌بندی ماهی در آمل، را بررسی کرده‌اند. در ادامه برای مقایسه آسان‌تر مقاله‌های بررسی شده، مقایسه آن‌ها را از نظر تابع هدف، متغیرهای تصمیم، پارامترهای هزینه، محدودیت‌ها، ویژگی‌های مدل ریاضی و جریان شبکه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مقایسه مقالات مرور شده

نویسنده	تابع هدف		متغیرهای تصمیم			پارامترهای هزینه								محدودیت‌ها				ویژگی‌های مدل		جریان شبکه	
	هزینه/سود	پایداری	مکان‌یابی	مقدار	[illegible]	هزینه تسهیلات	هزینه حمل	هزینه نگهداری	هزینه کمبود	هزینه انبارداری	تسهیلات	تعداد محصول	عرضه	تعادلی	چند دوره‌ای	چند محصولی	روبه‌جلو	حلقه بسته
مارتا و همکاران [۵]	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
ملو و همکاران [۶]	✓	✓	✓	✓		✓	✓				✓		✓					✓
ملو و همکاران [۷]	✓	✓				✓	✓				✓				✓	✓		✓
امین و ژانگ [۸]	✓	✓				✓	✓	✓					✓					
شانکار و همکاران [۹]	✓	✓	✓	✓		✓	✓				✓			✓		✓		✓
شهابی و همکاران [۱۰]	✓			✓		✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓		✓	
افشاری و همکاران [۱۱]	✓			✓		✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	
اعتمادی نیا و همکاران [۱۲]	✓		✓	✓		✓			✓	✓		✓			✓	✓		✓
ژاله‌چیان و همکاران [۱۳]	✓			✓		✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓	
کایا و اورک [۱۴]	✓		✓				✓				✓	✓		✓	✓		✓	
مارتینز و فرانسو [۱۵]	✓																✓	
طلایی و همکاران [۱۶]	✓					✓			✓						✓		✓	
امین و باکی [۱۷]	✓					✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓			
سیرنیوسان و خان [۱۸]	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓			✓				
خراسانی و الماسی‌فرد [۱۹]	✓								✓	✓					✓		✓	
یادگاری و همکاران [۲۰]	✓		✓	✓		✓								✓	✓	✓		✓

نویسنده (سال)	تابع هدف		متغیرهای تصمیم			پارامترهای هزینه					محدودیت‌ها				ویژگی‌های مدل		جریان شبکه	
	هزینه/سود	پایداری	مکان‌یابی	مقدار حمل‌ونقل	هزینه تسهیلات	هزینه حمل	هزینه نگهداری	هزینه کمبود	هزینه انبارداری	تسهیلات	تعداد محصول	عرضه	تعادلی	چند دوره‌ای	چند محصولی	روبه‌جلو	حلقه بسته
استرانگ و همکاران [۲۱]	✓		✓			✓				✓	✓		✓	✓		✓	
سرکار و همکاران [۲۲]	✓		✓	✓	✓			✓	✓		✓			✓	✓		✓
سعادتی و حسینی‌نژاد [۲۳]	✓		✓	✓	✓	✓				✓	✓						✓
دلفانی و همکاران [۲۴]	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓				✓	✓	✓	
عباسی و همکاران [۲۵]	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓		✓	✓			✓	✓
کومار و کومار [۲۶]	✓		✓	✓		✓							✓			✓	
گلی و همکاران [۲۷]	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓			✓	✓	✓	✓	✓
سعیدی‌فر و همکاران [۲۸]	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓			✓	
محمدقاسمی و همکاران [۲۹]	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓	✓	
رضوی‌نژاد و همکاران [۳۰]	✓		✓	✓	✓	✓				✓			✓	✓		✓	
مظفری و همکاران [۳۱]	✓	✓	✓		✓	✓				✓	✓					✓	✓
سعیدی و همکاران [۳۲]	✓	✓		✓		✓							✓	✓	✓	✓	
سجودی و همکاران [۳۳]	✓	✓				✓				✓			✓	✓	✓	✓	✓
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

در این پژوهش تمام موارد در نظر گرفته در مقاله پایه (مارتا و همکاران [۵]) شامل هزینه سود، پایداری، هزینه تسهیلات و حمل‌ونقل و سفارش‌دهی و کمبود و نگهداری، محدودیت ظرفیت، چند دوره‌ای و چند محصولی بودن را در نظر گرفته شده است. علاوه‌بر این، این زنجیره حلقه بسته در نظر گرفته شده است تا با استفاده مجدد از تایرهای برگشتی، ضمن افزایش میزان سود کل زنجیره‌تأمین به کاهش انتشار آلایندگی‌ها در محیط‌زیست هم توجه شود. بنابراین نوآوری اصلی این مقاله، در نظر گرفتن همزمان شاخص توسعه انسانی (HDI) و شاخص ایجاد ارزش در یک زنجیره حلقه بسته در صنعت تایر در ایران است. در مقاله پایه‌ای که این مسأله از آن الگو گرفته شده است، زنجیره تأمین روبه‌جلو در نظر گرفته شده است. حلقه بسته در نظر گرفتن این زنجیره همراه با در نظر گرفتن دو نوع مشتری نیز از نوآوری دیگر این مقاله است. در ادبیات مقالات متعددی در طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته وجود دارد اما در آنها تابع هدف EVA نیست و تمرکز بر بعد اجتماعی با شاخص توسعه انسانی نشده است.

۳- مدل‌سازی و فرمول‌بندی ریاضی مسأله

در این پژوهش یک شبکه زنجیره تأمین پایدار چند سطحی، چند دوره‌ای با تقاضای ثابت برای صنعت تایر خودرو با کمک یک نمونه مطالعاتی طراحی‌شده است. مسأله حاضر به طراحی مدلی چند هدفه در شبکه حلقه بسته برای محصولات مختلف و روابط میان سطوح، هزینه‌ها، سطوح بازگشتی، سبز بودن خواهد پرداخت. به‌صورت کلی شکل زنجیره تأمین این پژوهش به‌صورت شکل ۱ است.

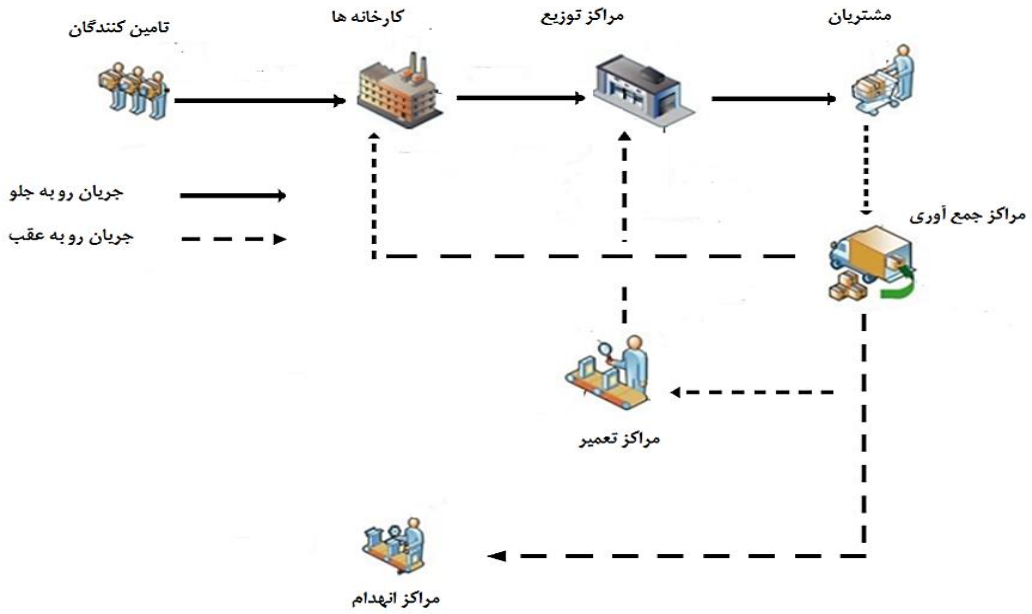
۳-۱ مفروضات مسئله

مفروضات اصلی مسأله عبارتند از:

- تعداد مکان‌های واحدهای مختلف تعریف‌شده در مسأله نظیر سطوح تأمین، تولید،... و انهدام و نیز ظرفیت مربوط به هر یک مشخص است.
- کمبود در مسأله پیشنهادی مجاز نیست.
- مقادیر تقاضا برای مشتریان اولیه و نیز مشتریان محصولات بازگشتی از پیش مشخص بوده و واحد مشتریان خود

وظیفه تقسیم به این دو دسته مشتریان را بر عهده دارد.

- انبارهایی در هر یک از واحدهای تولید، توزیع و جمع‌آوری و مراکز تعمیر وجود داشته که این ظرفیت محدود بوده و نیز هزینه موجودی در انتهای دوره برای آن‌ها محاسبه خواهد شد.
- جریان‌های موجودی بین سطوح نیازمند حمل‌ونقل است و شیوه‌های مختلف حمل در نظر گرفته می‌شوند.
- هزینه‌های راه‌اندازی برای سطوح مختلف و با توجه به ظرفیت‌های هر واحد در مسأله وجود دارد.
- در هنگام فرآیند حمل‌ونقل و جریان بین سطوح و نیز فرآیندهای تولید مقدار مشخصی گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌شود.



شکل ۱ مدل پیشنهادی تحقیق

۳-۲ فرمول‌بندی ریاضی

۳-۲-۱ مجموعه‌ها

مجموعه		نماد
مجموعه تأمین‌کنندگان مختلف	:	$s = 1,2,\dots,S$
مجموعه مراکز تولید و بازتولید	:	$m = 1,2,\dots,M$
مجموعه مشتریان مختلف	:	$c = 1,2,\dots,C$
مجموعه مراکز جمع‌آوری	:	$b = 1,2,\dots,B$
مجموعه مراکز توزیع	:	$d = 1,2,\dots,D$
مجموعه مراکز تعمیر	:	$f = 1,2,\dots,F$
مجموعه مراکز انهدام	:	$k = 1,2,\dots,K$
مجموعه مشتریان رده دوم	:	$e = 1,2,\dots,E$
مجموعه محصولات مختلف تولیدشده	:	$p = 1,2,\dots,P$
مجموعه مواد اولیه مختلف	:	$r = 1,2,\dots,R$
مجموعه روش‌های تولید مختلف	:	$n = 1,2,\dots,N$
مجموعه شیوه‌های حمل مختلف	:	$l = 1,2,\dots,L$
دوره‌های برنامه‌ریزی	:	$t = 1,2,\dots,T$
مجموعه مکان‌های بالقوه تأسیس مراکز	:	$i = 1,2,\dots,I$

۳-۲-۲ پارامترها

تعریف پارامتر		نماد
مقدار تقاضای مشتری i از محصول p در دوره t	:	DM_{ip}^{t}
قیمت فروش هر واحد محصول p درجه‌یک در مرکز مشتریان در دوره t	:	PSM_{cp}^{t}
قیمت فروش هر واحد محصول p پس از تعمیر در مرکز مشتریان در دوره t	:	PSF_{cp}^{t}
هزینه خرید یک واحد ماده اولیه r از تأمین‌کننده s در دوره t	:	CSR_{sr}^{t}
هزینه خرید یک واحد از محصول بازگشتی p از مرکز i در دوره t	:	CSP_{ip}^{t}
هزینه ثابت احداث مراکز مختلف i در دوره زمانی t	:	$CFIX_{i}^{t}$
هزینه کل تولید یک واحد از محصول p در مرکز تولید i ام به شیوه n و در دوره t	:	CP_{mpn}^{t}
هزینه عملیاتی جهت تولید یک واحد محصول p در مرکز تولید i ام به شیوه n در دوره t	:	COP_{ipn}^{t}
هزینه جمع‌آوری و بازرسی یک واحد از محصول p در مرکز i در دوره t	:	CIP_{ip}^{t}
هزینه نگهداری موجودی یک واحد محصول p در مرکز i ام در دوره t	:	CHP_{ip}^{t}
هزینه حمل‌ونقل و جریان از مرکز i به مرکز j توسط شیوه حمل l در دوره t	:	CTR_{ijl}^{t}
زمان تولید یک واحد محصول تولیدی p در مراکز تولید m به شیوه n و در دوره t	:	TM_{pn}^{t}
زمان حمل در جریان انتقال محصول p از مرکز i به مرکز j به شیوه حمل l و در دوره t	:	TTR_{ijpl}^{t}
مدت‌زمان لازم جهت بازرسی محصول p	:	TI_{p}
حد بالای زمان انتظار برای مشتری حاضر در مرکز i ام جهت تحویل محصول p در دوره t	:	LMT_{ip}^{t}
ظرفیت تأمین‌کننده s ام جهت تأمین مواد اولیه r	:	$CAPS_{sr}$
ظرفیت مرکز تولید m ام جهت تولید محصول p به شیوه تولید n ام	:	$CAPM_{mpn}$
ظرفیت تعمیر محصول بازگشتی p در مرکز تعمیر f به شیوه n ام	:	$CAPF_{fpn}$
ظرفیت توزیع محصول p در مراکز توزیع d	:	$CAPD_{dp}$
ظرفیت فروش محصولات در مرکز مشتری	:	$CAPC_{cp}$
ظرفیت جمع‌آوری و بازرسی محصول p در مراکز جمع‌آوری b	:	$CAPB_{bp}$
ظرفیت انهدام محصولات غیرقابل استفاده در مراکز انهدام k	:	$CAPK_{kp}$
ظرفیت نگهداری محصول در مراکز i ام در دوره t	:	$CAPH_{i}^{t}$
نرخ باز تولید محصول معیوب به ازای هر واحد محصول p و با استفاده از شیوه n ام	:	RW_{pn}
نرخ بازپرسازی از ماده اولیه r در هر واحد تولید محصول p	:	RR_{rp}
نرخ بازگشت ماده اولیه r به هنگام تحویل محصول بازگشتی p	:	ROR_{rp}
نرخ بازیابی و بازتولید محصول بازگشتی p جهت استفاده در جریان بازتولید	:	RM_{p}
نرخ فروش مجدد محصولات بازیابی شده P به مشتری رده دوم	:	RSS_{p}
نرخی که قابلیت انهدام از محصول p را داراست	:	RK_{p}
نرخی که قابلیت تعمیر از محصول p را داراست	:	RF_{p}
نرخ تجهیز ظرفیت برای هر واحد محصول p	:	RMO_{p}
حد مجاز انتشار آلاینده در مراکز مختلف در مرکز i ام	:	EM_{i}
حد مجاز انتشار آلودگی در انتقال بین مراکز از مرکز i به مرکز j	:	TP_{ij}
حد بالای کل انتشار در مراکز مختلف	:	TEM
حد بالای کل انتشار در انتقال بین مراکز	:	TEP
شاخص انسانی تأسیس مرکز i ام	:	HDI_{i}
میانگین کل شاخصه انسانی	:	$AVHDI$
عدد بسیار بزرگ	:	M

۳-۲-۳ متغیرهای تصمیم

متغیر		نماد
مقدار محصول p حمل شده بین تسهیلات i و jبه شیوه l در دوره t	:	AT_{ijpl}^{t}
مقدار محصول p پردازش‌شده با استفاده از شیوه پردازش n ام در مرکز i در دوره t	:	AM_{ipn}^{t}
مقدار محصول p تعمیر شده در مرکز تعمیر fبه روش n در دوره t	:	AF_{fpn}^{t}
مقدار محصولات فروش رفته به‌صورت لجستیک مستقیم از محصول p در مرکز مشتریان در دوره t	:	AC_{cp}^{t}
مقدار محصول p فروش رفته از محصولات تعمیری fدر مرکز مشتریان در دوره t	:	AS_{cp}^{t}
مقدار محصول p توزیع شده توسط مرکز توزیع d در دوره t	:	AD_{dp}^{t}
مقدار موجودی از محصولات p در مرکز i در دوره t	:	INV_{ip}^{t}
اگر مرکز i در دوره t بازگشایی شود در غیر اینصورت	:	$YO_{i}^{t}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$
اگر شیوه ساخت n ام در دوره t استفاده شود در غیر اینصورت	:	$YN_{n}^{t}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$
اگر از شیوه حمل l ام در دوره t راه‌اندازی شود در غیر اینصورت	:	$YL_{l}^{t}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$
اگر از تأمین‌کننده s در دوره t جهت تأمین مواد موردنیاز استفاده شود در غیر اینصورت	:	$YS_{S}^{t}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$
اگر برای حمل کالا از مرکز i به مراکز jاز شیوه حمل l استفاده شود در غیر اینصورت	:	$YT_{ijl}^{t}=\begin{cases}1\\0\end{cases}$

۳-۲-۴ تابع هدف اول

در تابع هدف مسأله، هزینه جریان‌های روبه‌جلو و رو به عقب در مسأله وجود دارد. جریان‌ها شامل حمل‌ونقل محصول تولیدی و نیز مواد اولیه بین سطوح مختلف و نیز جمع‌آوری و تعمیر قطعات معیوب در سطوح بازگشتی و یا انهدام در مراکز انهدام است. در نظر گرفتن موارد بیان‌شده شامل حمل‌ونقل و نیز بازگشایی مراکز در کنار موجودی مواد و محصولات و عملیاتی بودن آن هزینه‌زا می‌باشد. اما در کنار هزینه‌های بیان‌شده کارخانه تولیدی قادر خواهد بود تا محصول نهایی خود را به مشتریان به فروش برساند. دسته‌ای از مشتریان به‌صورت مستقیم به‌عنوان مشتریان اصلی (مشتریان درجه اول یا مشتریان اولیه) در شبکه تعریف‌شده‌اند. همچنین ممکن است با توجه به نرخ پیش‌بینی‌شده در جهت بازگشت، دسته‌ای از محصولات معیوب بوده و در جهت بازگشت مورد تعمیر و یا بازتولید قرار گیرند. در کنار هزینه‌بر بودن این امر، دسته دیگری از مشتریان موجودند که علاقه‌مند به خرید محصول بازتولید شده و یا تعمیر شده می‌باشند. به این صورت که محصول بازگشتی پس از تعمیر کامل (در صورت تعمیر پذیر بودن)، به مرکز مشتریان رفته و این بار توسط مشتریان رده دوم (مشتریان ثانویه) خریداری می‌شود. لذا در کنار هزینه‌های در نظر گرفته‌شده در شبکه پیشنهادی، درآمد حاصل از فروش تولید نیز وجود خواهد داشت. تابه هدف اول، مجموع سود است که از جمع تفاضل هزینه‌های هر دوره از درآمد همان دوره حاصل می‌شود. لذا در جهت بیشینه‌سازی سود حاصل از تولید و فروش، می‌توان معادله کلی (۱) را برای تابع هدف اول مسأله درنظر گرفت:

$$Max\ Z=\sum_{t}\frac{(Revenue(t)-Cost(t))}{(1+r(t))^{t}} \qquad (۱)$$

سود ناخالص (درآمد) حاصل از فروش محصولات به‌صورت زیر قابل‌محاسبه می‌باشد.

$$Revenue(t)=\sum_{c}\sum_{p}AC_{cp}^{t}*PSM_{cp}^{t}+\sum_{c}\sum_{p}AS_{cp}^{t}*PSF_{cp}^{t} \qquad (۲)$$

مقدار سود ناخالص از مقدار به فروش رسیده به مشتریان و مقدار فروش حاصل از محصولات تعمیر شده حاصل می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر مربوط به سود، در معادله کلی (۱) به ازای هر دوره محاسبه خواهد شد. همچنین از معادله (۳)، برای پیدا کردن مقدار ارزش فعلی استفاده می‌شود:

$$NPV(t) = \frac{(Revenue(t) - Cost(t))}{(1 + r(t))^t} \quad (۳)$$

هزینه‌های در نظر گرفته‌شده در مسأله پیشنهادی شامل هزینه‌های مربوط به هزینه‌های راه‌اندازی مراکز (معادله ۴)، هزینه‌های مربوط به سفارش‌دهی مواد خام (معادله ۵)، هزینه تولید محصولات در شبکه تأمین (معادله ۶)، هزینه‌های عملیاتی در مراکز مختلف (معادله ۷)، هزینه‌های جمع‌آوری محصولات (معادله ۸) هزینه نگهداری موجودی (معادله ۹) و نیز حمل‌ونقل (معادله ۱۰) است.

$$\begin{aligned} Opening\ Cost(t) &= \sum_s CFIX_s^t(YO_s^t - YO_s^{t-1}) \\ &+ \sum_m CFIX_m^t(YO_m^t - YO_m^{t-1}) + \sum_d CFIX_d^t(YO_d^t - YO_d^{t-1}) \\ &+ \sum_c CFIX_c^t(YO_c^t - YO_c^{t-1}) + \sum_b CFIX_b^t(YO_b^t - YO_b^{t-1}) \\ &+ \sum_f CFIX_f^t(YO_f^t - YO_f^{t-1}) + \sum_k CFIX_k^t(YO_k^t - YO_k^{t-1}) \end{aligned} \quad (۴)$$

$$Ordering\ Cost(t) = \sum_s \sum_m \sum_r \sum_l AT_{smrl}^t * CSR_{sr}^t \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} Production\ Cost(t) &= \sum_m \sum_p \sum_n AM_{mpn}^t * CP_{mpn}^t \\ &+ \sum_m \sum_p \sum_n AM_{mpn}^t * CP_{mpn}^t * RW_{pn} \end{aligned} \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} Operation\ Cost(t) &= \sum_f \sum_p \sum_n AF_{fpn}^t * COP_{fpn}^t \\ &+ \sum_m \sum_p \sum_n AM_{mpn}^t * COP_{mpn}^t + \sum_k \sum_p \sum_n AM_{kpn}^t * COP_{kpn}^t \end{aligned} \quad (۷)$$

$$\begin{aligned} Collection\ Cost(t) &= \sum_c \sum_b \sum_p \sum_l AT_{cbpl}^t * (CSP_{cp}^t + CIP_{cp}^t) \\ &+ \sum_f \sum_d \sum_p \sum_l AT_{fdpl}^t * (CSP_{fp}^t + CIP_{fp}^t) \end{aligned} \quad (۸)$$

$$\begin{aligned} Inventory\ Holding\ Cost(t) &= \sum_m \sum_p INV_{mp}^t * CHP_{mp}^t \\ &+ \sum_f \sum_p INV_{fp}^t * CHP_{fp}^t + \sum_b \sum_p INV_{bp}^t * CHP_{bp}^t + \sum_d \sum_p INV_{dp}^t * CHP_{dp}^t \end{aligned} \quad (۹)$$

$$\begin{aligned} Transportation\ Cost(t) &= \sum_s \sum_m \sum_p \sum_l AT_{smpl}^t * CTR_{sml}^t \\ &+ \sum_m \sum_d \sum_p \sum_l AT_{mdpl}^t * CTR_{mdl}^t + \sum_d \sum_c \sum_p \sum_l AT_{dcpl}^t * CTR_{dcl}^t \\ &+ \sum_c \sum_b \sum_p \sum_l AT_{cbpl}^t * CTR_{cbl}^t + \sum_b \sum_f \sum_p \sum_l AT_{bfpl}^t * CTR_{bfl}^t \\ &+ \sum_b \sum_k \sum_p \sum_l AT_{bkpl}^t * CTR_{bkl}^t + \sum_b \sum_m \sum_p \sum_l AT_{bmpl}^t * CTR_{bml}^t \\ &+ \sum_f \sum_d \sum_p \sum_l AT_{fdpl}^t * CTR_{fdl}^t \end{aligned} \quad (۱۰)$$

۳-۲-۵ تابع هدف دوم

تابع هدف دوم مسأله میزان انتشار گازهای آلاینده محیطی است. این تابع هدف به دنبال آن است که میزان انتشار این گازهای آلاینده را حداقل کند. این کمینه نمودن به دو صورت خود را نشان می‌دهد. بخش اول این کمینه کردن در خصوص

کمینه کردن انتشار آلاینده‌ها در مراکز مورد تأسیس می‌باشد. به این صورت که هر مرکز در صورت تأسیس و تصمیم‌گیری برای ایجاد در مدل، به تولید حجم مشخصی ماده صنعتی می‌پردازد که تولید این ماده صنعتی انتشار گازهای آلاینده را به دنبال خواهد داشت. در بخش دوم این کمینه‌سازی در جریان میان تسهیلات در جهت‌های روبه‌جلو و نیز رو به عقب وجود خواهد داشت. همان‌گونه که پیداست در هر نقطه از شبکه پیشنهادی جهت انتقال مواد خام، محصول تولید شده، جمع‌آوری و بازگشت برای بازتولید و تعمیر نیازمند جریانی به سمت مراکز مختلف است. این جریان خود را به شکل حمل‌ونقل بین سطوح یا مراکز نشان می‌دهد. از طرفی با فرض درنظر گرفتن یک سیستم یکپارچه جهت انتقال منابع بین سطوح، میزان مشخصی از انتشار وجود خواهد داشت. لذا تابع هدف دوم مسأله در این قسمت به دنبال راهکاری جهت کمینه‌سازی این هزینه‌ها بوده است. بر طبق فرضیات مسأله و موارد شرح داده‌شده، معادله تابع هدف دوم را می‌توان به‌صورت زیر مدل‌سازی نمود.

$$Min\ Z_2(t) = \sum_t Facility\ emission(t) + Transportation\ emission(t) \quad (۱۱)$$

$$\begin{aligned} Facility\ emission(t) &= \sum_s Em_s * YO_s^t + \sum_m Em_m * YO_m^t + \sum_d Em_d * YO_d^t + \sum_c Em_c * YO_c^t \\ &+ \sum_b Em_b * YO_b^t + \sum_f Em_f * YO_f^t + \sum_k Em_k * YO_k^t \end{aligned} \quad (۱۲)$$

$$\begin{aligned} Transportation\ emissin(t) &= \sum_s \sum_m \sum_l TP_{sm} * YT_{sml}^t + \sum_m \sum_d \sum_l TP_{md} * YT_{mdl}^t \\ &+ \sum_d \sum_c \sum_l TP_{dc} * YT_{dcl}^t + \sum_c \sum_b \sum_l TP_{cb} * YT_{cbl}^t \\ &+ \sum_b \sum_m \sum_l TP_{bm} * YT_{bml}^t + \sum_b \sum_f \sum_l TP_{bf} * YT_{bfl}^t \\ &+ \sum_b \sum_k \sum_k TP_{bk} * YT_{bkl}^t + \sum_f \sum_d \sum_l TP_{fd} * YT_{fdl}^t \end{aligned} \quad (۱۳)$$

۳-۲-۶ محدودیت‌های مسئله

در محدودیت (۱۴)، میزان جریان ورودی از مواد اولیه به مرکز تولید باید با جریان ورودی ماده اولیه از تأمین‌کننده و نیز مقدار بازگشتی از مرکز جمع‌آوری با یکدیگر برابر باشد. همچنین لازم به ذکر است که این جریان در هنگام بازگشت از مرکز جمع‌آوری به مرکز تولید با نرخ مشخصی روبروست. همچنین موارد فوق در هر دوره زمانی به انجام می‌رسد. در محدودیت (۱۵)، جریان محصولات نهایی از مراکز توزیع خارج‌شده و به مشتریان تحویل داده می‌شود. ازاین‌رو باید بین تقاضای مشتریان و خروجی از مراکز توزیع می‌بایست تعادل برقرار باشد.

$$\sum_p \sum_n RR_{rp} * AM_{mpn}^t = \sum_b \sum_p \sum_l ROR_{rp} * AT_{bmpl}^t + \sum_s \sum_l AT_{smrl}^t \qquad \forall m, r, t \quad (۱۴)$$

$$\sum_d \sum_l AT_{dcpl}^t = DM_{cp}^t \qquad \forall c, p, t \quad (۱۵)$$

در محدودیت (۱۶)، میزان محصولی که به توزیع‌کنندگان جهت توزیع به سطوح بعدی منتقل می‌شود می‌بایست از نرخ تولید و نرخ بازتولید محصولات معیوب کمتر باشد. محدودیت (۱۷)، بیانگر این است که حداقل جریان بازگشتی برابر درصدی از مقدار تقاضای بازگشتی از مشتریان به سمت مراکز جمع‌آوری می‌باشد.

$$\sum_d \sum_l AT_{mdpl}^t \leq \sum_n AM_{mpn}^t (1 + RW_{pn}) \qquad \forall m, p, t \quad (۱۶)$$

$$\sum_{c}\sum_{b}\sum_{l} AT^{t}_{cbpl} \le \sum_{c} RM_{p} * DM^{t}_{cp} \qquad \forall p,t \qquad (۱۷)$$

در محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۰)، جریان ورودی به مرکز جمع‌آوری می‌بایست با جریان خروجی از این مرکز برابر باشد. این به آن معنی است که درصدی از جریان مشتریان به سمت مرکز جمع‌آوری و با نرخ مشخصی نیازمند تعمیر، بازتولید و یا انهدام می‌باشند؛ لذا می‌بایست بین مقادیر ورودی و خروجی تعادل برقرار نمود.

$$\sum_{m}\sum_{l} AT^{t}_{bmpl} = \sum_{c}\sum_{l} AT^{t}_{cbpl} * RSS_{p} \qquad \forall p,t \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{f}\sum_{l} AT^{t}_{bfpl} = \sum_{c}\sum_{l} AT^{t}_{cbpl} * RF_{p} \qquad \forall p,t \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{k}\sum_{l} AT^{t}_{bkpl} = \sum_{c}\sum_{l} AT^{t}_{cbpl} * RK_{p} \qquad \forall p,t \qquad (۲۰)$$

در محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲)، میزان جریان ورودی به مرکز تعمیر و انهدام می‌بایست از میزان پردازش‌شده در این مراکز کمتر یا مساوی باشند.

$$\sum_{b}\sum_{l} AT^{t}_{bfpl} \le \sum_{n} AM^{t}_{fpn} \qquad \forall f,p,t \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{k}\sum_{l} AT^{t}_{bkpl} \le \sum_{n} AM^{t}_{kpn} \qquad \forall k,p,t \qquad (۲۲)$$

در محدودیت (۲۳) نرخ ورود به مرکز تعمیر با نرخ خروجی از محصولات همواره باید کمتر و مساوی باشد.

$$\sum_{d} AT^{t}_{fdpl} \le \sum_{n} AM^{t}_{fpn} * RF_{p} \qquad \forall f,p,l,t \qquad (۲۳)$$

بر طبق معادلات (۲۴) تا (۲۷)، میزان موجودی باقیمانده در انتهای هر دوره برنامه‌ریزی در مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری و تعمیر باید کمتر مساوی با میزان موجودی منتقل‌شده در این مراکز باشد. در محدودیت (۲۸)، مقدار خروجی مواد اولیه از نقاط تأمین‌کنندگان همواره از ظرفیت تأمین مواد اولیه کمتر می‌باشد.

$$INV^{t}_{mp} - INV^{t-1}_{mp} \le \sum_{n} AM^{t}_{mpn} - \sum_{d}\sum_{l} AT^{t}_{mdpl} \qquad \forall m,p,t \qquad (۲۴)$$

$$INV^{t}_{dp} - INV^{t-1}_{dp} \le \sum_{m}\sum_{l} AT^{t}_{mdpl} \qquad \forall d,p,t \qquad (۲۵)$$

$$INV^{t}_{bp} - INV^{t-1}_{bp} \le \sum_{c}\sum_{l} AT^{t}_{cbpl} \qquad \forall b,p,t \qquad (۲۶)$$

$$INV^{t}_{fp} - INV^{t-1}_{fp} \le \sum_{b}\sum_{l} AT^{t}_{bfpl} \qquad \forall f,p,t \qquad (۲۷)$$

$$\sum_{m}\sum_{l} AT^{t}_{smrl} \le CAPS_{sr} \qquad \forall s,r,t \qquad (۲۸)$$

محدودیت (۲۹) بیانگر ظرفیت تولید (در کنار در نظر گرفتن نرخ معیوب) می‌باشد. همچنین باید توجه داشت که این محدودیت در مراکز تولیدی برقرار است که بازگشایی شوند.

$$AM^{t}_{mpn} \le CAPM_{mpn} * YO^{t}_{m} \qquad \forall m,p,n,t \qquad (۲۹)$$

در محدودیت (۳۰)، نرخ تجهیز ظرفیت در مقدار موجودی نمایانگر میزان موجودی در مراکز تولید می‌باشد، همچنین این مقدار نمی‌بایست از ظرفیت موجودی تجاوز نماید. از طرفی این امر در مواقعی اتفاق می‌افتد که مرکزی تأسیس شود.

$$\sum_{p} RMO_{p} * INV^{t}_{mp} \le CAPH^{t}_{m} * YO^{t}_{m} \qquad \forall m,t \qquad (۳۰)$$

محدودیت (۳۱) و (۳۲) بیان می‌دارد که جریان ورودی در هنگام ظرفیت توزیع و نیز انبارهای موجودی همواره باید رعایت شود.

$$AD_{dp}^{t} \le CAPD_{dp} * YO_{d}^{t} \qquad \forall d,p,n,t \qquad (۳۱)$$

$$\sum_{p} RMO_{p} * INV_{dp}^{t} \le CAPH_{d}^{t} * YO_{d}^{t} \qquad \forall d,t \qquad (۳۲)$$

محدودیت (۳۳) و (۳۴) بیان می‌دارد که جریان ورودی در هنگام ظرفیت تعمیر و نیز انبارهای موجودی همواره باید رعایت شود.

$$AF_{fp}^{t} \le CAPF_{fpn} * YO_{f}^{t} \qquad \forall f,p,n,t \qquad (۳۳)$$

$$\sum_{p} RMO_{p} * INV_{fp}^{t} \le CAPH_{f}^{t} * YO_{f}^{t} \qquad \forall f,t \qquad (۳۴)$$

محدودیت (۳۵) و (۳۶) بیان می‌دارد که میزان جریان ورودی در هنگام ظرفیت تحویل محصول به مشتری و نیز انبارهای موجودی همواره باید رعایت شود.

$$AC_{cp}^{t} \le CAPC_{cp} * YO_{c}^{t} \qquad \forall c,p,n,t \qquad (۳۵)$$

$$\sum_{p} RMO_{p} * INV_{cp}^{t} \le CAPH_{c}^{t} * YO_{c}^{t} \qquad \forall c,t \qquad (۳۶)$$

در محدودیت (۳۷) مقدار ارسالی از مرکز جمع‌آوری به سایر مراکز نبایست از ظرفیت جمع‌آوری در این مراکز بیشتر شود. برای این محدودیت داریم:

$$\sum_{m}\sum_{p}\sum_{l} AT_{bmpl}^{t} + \sum_{f}\sum_{p}\sum_{l} AT_{bfpl}^{t} + \sum_{k}\sum_{p}\sum_{l} AT_{bkpl}^{t} \le \ CAPB_{mp} * YO_{b}^{t} \qquad \forall b,t \qquad (۳۷)$$

در محدودیت‌ها (۳۸) و (۳۹)، تنها زمانی برقرار هستند که یک مرکز انهدام تأسیس شود. در غیراین‌صورت برقرار نخواهد بود.

$$AT_{bkpl}^{t} \le CAPK_{kp} * YO_{k}^{t} \qquad \forall k,p,n,t \qquad (۳۸)$$

$$\sum_{p} RMO_{p} * INV_{kp}^{t} \le CAPH_{k}^{t} * YO_{k}^{t} \qquad \forall k,t \qquad (۳۹)$$

در محدودیت (۴۰)، میزان زمان لازم بین انتقال از مرکز تولید به توزیع، توزیع به مشتری و زمان لازم جهت تولید همواره از حد بالای انتظار مشتری کمتر می‌باشد.

$$\sum_{n} TM_{pn}^{t} * YN_{n}^{t} + \sum_{m}\sum_{l} YT_{mdl}^{t} * TTR_{mdpl}^{t} + \sum_{d}\sum_{l} YT_{dcl}^{t} * TTR_{dcpl}^{t} \ \le \ LMT_{cp}^{t} \quad \forall\, c,p,t \qquad (۴۰)$$

محصولات بازگشتی درصورتی‌که مورد بازتولید و یا تعمیر قرار گیرند مشتریان خاص خود را دارند (مشتریان رده دوم). همچنین حدی برای تحویل به مشتریان رده دوم در نظر گرفته‌شده است که همان زمان انتظار جهت تحویل محصول بازتولید و یا تعمیر شده می‌باشد. بنابراین مجموع زمان بازتولید و تعمیر این محصولات و نیز زمان لازم برای انتقال مجدد به مرکز مشتری در مسیر بازگشت و نیز زمان جمع‌آوری و بازرسی آن‌ها می‌بایست از زمان مورد انتظار برای مشتریان رده دوم کمتر باشد. در محدودیت (۴۱) می‌بایست توجه شود که زمان مسیرهای بازگشتی نیز با توجه به وجود شیوه حمل می‌بایست درنظر گرفته شود.

$$\begin{aligned}\sum_{n} TM_{pn}^{t} * YN_{n}^{t} + \sum_{m}\sum_{l} YT_{mdl}^{t} * TTR_{mdpl}^{t} + \sum_{d}\sum_{l} YT_{dcl}^{t} * TTR_{dcpl}^{t} \\ + \sum_{c}\sum_{l} YT_{cbl}^{t} * TTR_{cbpl}^{t} + \sum_{b}\sum_{l} YT_{bml}^{t} * TTR_{bmpl}^{t} + \\ \sum_{b}\sum_{l} YT_{bfl}^{t} * TTR_{bfpl}^{t} + \sum_{f}\sum_{l} YT_{fdl}^{t} * TTR_{fdpl}^{t} + TI_{p} \le \ LMT_{ep}^{t}\end{aligned} \qquad (۴۱)$$

در محدودیت‌های (۴۲) تا (۴۹)، حتماً در انتقال بین مراکز مختلف باید مراکز باز باشند و نیز شیوه حمل‌ونقل نیز برقرار باشد.

$$YT_{sml}^{t} \le \frac{1}{3}(YS_{S}^{t} + YO_{m}^{t} \ + \ YL_{l}^{t}) \qquad \forall s,m,l,t \qquad (۴۲)$$

$$YT_{mdl}^{t} \le \frac{1}{3}(YO_{m}^{t} + YO_{d}^{t} + YL_{l}^{t}) \qquad \forall m,d,l,t \qquad (۴۳)$$

$$YT_{dcl}^{t} \le \frac{1}{3}(YO_{d}^{t} + YO_{c}^{t} + YL_{l}^{t}) \qquad \forall d,c,l,t \qquad (۴۴)$$

$$YT_{cbl}^{t} \le \frac{1}{3}(YO_{c}^{t} + YO_{b}^{t} + YL_{l}^{t}) \qquad \forall c,b,l,t \qquad (۴۵)$$

$$YT_{bml}^{t} \le \frac{1}{3}(YO_{b}^{t} + YO_{m}^{t} + YL_{l}^{t}) \qquad \forall m,b,l,t \qquad (۴۶)$$

$$YT_{bfl}^{t} \le \frac{1}{3}\left(YO_{b}^{t} + YO_{f}^{t} + YL_{l}^{t}\right) \qquad \forall f,b,l,t \qquad (۴۷)$$

$$YT_{bkl}^{t} \le \frac{1}{3}(YO_{b}^{t} + YO_{k}^{t} + YL_{l}^{t}) \qquad \forall k,b,l,t \qquad (۴۸)$$

$$YT_{fdl}^{t} \le \frac{1}{3}\left(YO_{f}^{t} + YO_{d}^{t} + YL_{l}^{t}\right) \qquad \forall f,d,l,t \qquad (۴۹)$$

در معادلات (۵۰) تا (۵۷) این شرط برقرار است که اگر شیوه حمل موجود باشد مقدار یک به خود خواهد گرفت و تمام معادلات از یک عدد بسیار بزرگ کوچکتر خواهند بود و لذا همگی محدودیت‌ها برقرار خواهند شد.

$$\sum_{p} AT_{smpl}^{t} \le M * YT_{sml}^{t} \qquad \forall s,m,l,t \qquad (۵۰)$$

$$\sum_{p} AT_{mdpl}^{t} \le M * YT_{mdl}^{t} \qquad \forall d,m,,t \qquad (۵۱)$$

$$\sum_{p} AT_{dcpl}^{t} \le M * YT_{dcl}^{t} \qquad \forall d,c,l,t \qquad (۵۲)$$

$$\sum_{p} AT_{cbpl}^{t} \le M * YT_{cbl}^{t} \qquad \forall c,b,l,t \qquad (۵۳)$$

$$\sum_{p} AT_{bmpl}^{t} \le M * YT_{bml}^{t} \qquad \forall b,m,l,t \qquad (۵۴)$$

$$\sum_{p} AT_{bfpl}^{t} \le M * YT_{bfl}^{t} \qquad \forall b,f,l,t \qquad (۵۵)$$

$$\sum_{p} AT_{bkpl}^{t} \le M * YT_{bkl}^{t} \qquad \forall b,k,l,t \qquad (۵۶)$$

$$\sum_{p} AT_{fdpl}^{t} \le M * YT_{fdl}^{t} \qquad \forall f,d,l,t \qquad (۵۷)$$

در محدودیت‌های (۵۸) و (۵۹) همواره میزان انتشار می‌بایست از حد خاصی که در مدل تعریف می‌شود کمتر باشد.

$$\sum_{s} Em_{s} * YO_{s}^{t} + \sum_{m} Em_{m} * YO_{m}^{t} + \sum_{d} Em_{d} * YO_{d}^{t} + \sum_{c} Em_{c} * YO_{c}^{t} + \sum_{b} Em_{b} * YO_{b}^{t} + \sum_{f} Em_{f} * YO_{f}^{t} + \sum_{k} Em_{k} * YO_{k}^{t} \le TEM \qquad (۵۸)$$

$$\sum_{s}\sum_{m}\sum_{l} TP_{sm} * YT_{sml}^{t} + \sum_{m}\sum_{d}\sum_{l} TP_{md} * YT_{mdl}^{t} + \sum_{d}\sum_{c}\sum_{l} TP_{dc} * YT_{dcl}^{t} + \sum_{c}\sum_{b}\sum_{l} TP_{cb} * YT_{cbl}^{t} + \sum_{b}\sum_{m}\sum_{l} TP_{bm} * YT_{bml}^{t} + \sum_{b}\sum_{f}\sum_{l} TP_{bf} * YT_{bfl}^{t} + \sum_{b}\sum_{k}\sum_{l} TP_{bk} * YT_{bkl}^{t} + \sum_{f}\sum_{d}\sum_{l} TP_{fd} * YT_{fdl}^{t} \le TEP \qquad (۵۹)$$

با محدودیت‌های (۶۰) تا (۶۸)، مرکز یا شیوه تأسیس شده در تمام دوره‌های برنامه‌ریزی برقرار و قابل‌استفاده باشد.

$$YO_{s}^{t-1} \le YO_{s}^{t} \qquad \forall m,t \qquad (۶۰)$$

$$YO_m^{t-1} \le YO_m^t \qquad \forall m,t \qquad (۶۱)$$
$$YO_d^{t-1} \le YO_d^t \qquad \forall d,t \qquad (۶۲)$$
$$YO_c^{t-1} \le YO_c^t \qquad \forall d,t \qquad (۶۳)$$
$$YO_b^{t-1} \le YO_b^t \qquad \forall b,t \qquad (۶۴)$$
$$YO_f^{t-1} \le YO_f^t \qquad \forall f,t \qquad (۶۵)$$
$$YO_k^{t-1} \le YO_k^t \qquad \forall k,t \qquad (۶۶)$$
$$YL_l^{t-1} \le YL_l^t \qquad \forall l,t \qquad (۶۷)$$
$$YN_n^{t-1} \le YN_n^t \qquad \forall l,t \qquad (۶۸)$$

محدودیت (۶۹)، شاخص توسعه انسانی را بیان می‌کند و بدین‌صورت تعریف می‌گردد که در هر دوره بازگشایی می‌بایست از میانگین کل شاخص توسعه انسانی در هر دوره کمتر باشد تا آن مرکز بازگشایی شود.

$$\sum_i \mathrm{HDI}_i * YO_i^t \le AVHDI \sum_i YO_i^t \qquad \forall t \qquad (۶۹)$$

دسته آخر محدودیت‌ها (۷۰) تا (۷۴)، مربوط به محدودیت‌های صفر و یک متغیرهای دودویی است.

$$YO_i^t \in (0,1) \qquad (۷۰)$$
$$YN_n^t \in (0,1) \qquad (۷۱)$$
$$YL_l^t \in (0,1) \qquad (۷۲)$$
$$YS_S^t \in (0,1) \qquad (۷۳)$$
$$YT_{ijl}^t \in (0,1) \qquad (۷۴)$$

۴- اجرای مدل و تحلیل نتایج

هر مسأله تحقیق در عملیات و مدل‌سازی ریاضی، از دو روش حل دقیق و تقریبی قابل‌حل است. معمولاً در روش دقیق مقادیر ورودی جهت حل مسأله خیلی بزرگ نبوده و مدل مسأله در زمان قابل قبولی حل می‌شود. اما در دنیای واقعی به دلیل بزرگ بودن مدل‌ها، روش‌های حل دقیق قادر به حل مدل‌ها در زمان مطلوب نیستند، ازاین‌رو محققان به استفاده از روش‌های تقریبی روی آورده‌اند. این روش‌ها مسأله را درزمانی کم حل نموده و جوابی بسیار نزدیک به بهینه را به‌دست می‌آورند، ازجمله روش‌های تقریبی، روش‌های فراابتکاری است. در این قسمت به توضیح مختصری درباره دو روش حل فراابتکاری ارائه می‌شود. نظریه پیشنهاد شده توسط ولپرت و ماکردی بیانگر این است که هیچ الگوریتمی‌منحصر به فرد برای بهینه‌سازی همه مسائل ریاضی وجود ندارد. دلیل اصلی درنظر گرفتن الگوریتم‌های فراابتکاری و ترکیب آن‌ها استفاده از امتیازات این الگوریتم‌ها در مراحل تشدید و متنوع‌سازی است.

۴-۱ الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوبNSGA-II

این الگوریتم ابتدا توسط دب و همکاران معرفی و پیاده‌سازی شد. برای درنظرگرفتن مراحل NSGA-II، الگوریتم با توسعه راه‌حل‌های تصادفی شروع می‌شود و سپس راه‌حل‌های توسعه‌یافته ارزیابی می‌شوند. برای انتخاب مجموعه بهتر از راه‌حل‌ها، دو اپراتور مؤثر این الگوریتم شامل ازدحام و مرتب‌سازی در روش الگوریتم استفاده می‌شوند. مکانیسم انتخاب NSGA-II بر اساس انتخاب تورنومنت باینری است. علاوه بر این، یک متغیر جهش یکنواخت در الگوریتم اعمال می‌شود تا هم از گیرافتادن در پاسخ بهینه محلی جلوگیری کند و نیز تنوع‌پذیری الگوریتم را بیشتر کند.

۴-۲ الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO)

الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات PSO جزء یکی از قدیمی‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که توسط کندی و ابرت

پیشنهاد شده است. اصول الگوریتم باعث می‌شود که الگوریتم تکامل ذرات با تعیین سرعت به پاسخ‌های بهینه نزدیک شود. برای دستیابی به این موضوع، سه نوع عنصر که بهترین وضعیت ذره (pbest)، بهترین ذره‌ای که تاکنون داشته‌ایم (gbest) و سرعت آن مورد نیاز است. جهت تنظیم پارامترهای این الگوریتم‌های فراابتکاری روش‌های مختلفی وجود دارد که در اینجا از روش تاگوچی بهره برده‌ایم. با استفاده از روش تاگوچی بهترین پارامترهای هر الگوریتم فراابتکاری در جدول ۲ قرار داده شده است.

جدول ۲ مقادیر تنظیم‌شده پارامترها برای الگوریتم‌های پیشنهادی

الگوریتم	پارامترهای الگوریتم‌ها
MOPSO	W=0.65; C1=1.2; C2=1.8; N-pop=45; Max-iteration=100
NSGA-II	Pc=0.75; Pm=0.12; N-pop=190; Max-iteration=150

۴-۳ حل مدل

در این قسمت از پژوهش پس از به‌دست آوردن مقادیر تنظیم‌شده پارامترها برای حل مسأله، مدل پیشنهادی حل‌شده است. برای حل الگوریتم فراابتکاری از نرم‌افزار متلب استفاده‌شده است. هم‌چنین برای حل مدل پیشنهادی از یک سیستم رایانه با مشخصات ویندوز ۱۰ رم ۱۶ گیگابایت استفاده شده است. برای حل مدل از نمونه‌های مسائل پیشنهادی در ابعاد مختلف استفاده‌شده است. وجود مسائل مختلف با ابعاد مختلف سبب می‌شود تا کارایی مسأله در ابعاد مختلف و تنظیمات مختلف ورودی در مسأله مورد آزمایش قرار گیرد. همچنین این امر سبب خواهد شد تا اعتماد به مدل پیشنهادی و عملکرد آن به‌صورت کامل مورد آزمایش قرار گیرد. مقادیر ورودی اندیس‌ها و پارامترها به‌صورت جدول ۳ می‌باشد. با توجه به شاخص‌های مطرح شده، تعداد مکان‌های بالقوه جهت تأمین، تولید، تعمیر، انهدام و سایر موارد مشخص‌شده است. دو دسته مشتریان در مدل درنظر گرفته‌شده‌اند که به‌صورت مشتریان مستقیم محصولات و مشتریان رده دوم در مسأله دیده شده‌اند. از طرفی‌دیگر، ۶ نوع محصول مختلف جهت بررسی پیشنهاد داده شده‌اند که این محصولات حدود ۵۴ درصد میزان فروش این شرکت را شامل می‌شوند. افق برنامه‌ریزی جهت پیاده‌سازی مدل ۶ دوره یک‌ماهه از ابتدای سال ۱۳۹۹ تا انتهای شهریور همان سال در نظر گرفته شده است. هم‌چنین تمامی‌مقادیر هزینه‌ها و درآمدها برای هر پارامتر برحسب ۱۰۰۰۰۰ ریال می‌باشد. در این مقاله، سه نوع حمل‌ونقل (کامیون سبک، کامیون متوسط و کامیون سنگین) در نظر گرفته شده است. میزان انتشار کربن دی‌اکسید این وسایل در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳ مقادیر شاخص‌های در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی

اندیس	تعریف اندیس	تعداد	توضیحات بیشتر
S	تأمین‌کنندگان	۵	تهران، کرج، قزوین، ساری، رشت
M	مراکز تولید و بازتولید	۴	تهران، فیروزکوه، پردیس، جاجرود
C	مشتریان مختلف	۴	تهران، فیروزکوه، پردیس، جاجرود
B	مراکز جمع‌آوری	۴	تهران، فیروزکوه، پردیس، جاجرود
D	مراکز توزیع	۴	تهران، فیروزکوه، پردیس، جاجرود
F	مراکز تعمیر	۳	تهران، دماوند، رودهن
K	مراکز انهدام	۲	رودهن، دماوند
E	مشتریان رده دوم	۳	ورامین، رباط‌کریم، شهرری
P	محصولات مختلف تولیدشده	۶	دنا، بارز، یزد، گلدستون، ایران تایر، پارس
R	مواد اولیه مختلف	۴	آج، زهوار، آستر، لاستیک طبیعی و مصنوعی
N	روش‌های تولید مختلف	۶	روش ۱، روش ۲، روش ۳، روش ۴، روش ۵، روش ۶
L	شیوه‌های حمل‌ونقل	۳	شیوه ۱، شیوه ۲، شیوه ۳
T	دوره برنامه‌ریزی	۶	فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور ۱۳۹۹

جدول ۴ میزان انتشار کربن دی‌اکسید

نوع وسیله نقلیه	میزان انتشار کربن دی‌اکسید (kg/km)
کامیون سبک	۰.۰۴۲
کامیون متوسط	۰.۱۵
کامیون سنگین	۰.۳۸۴

۴-۴ نتایج پیاده‌سازی

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شده است، جهت کاهش هزینه‌های بازگشایی مراکز جدید، مرکز تولید، نقش بازتولید و ارسال کالا و خدمات به مشتریان را نیز بر عهده دارد. این امر سبب خواهدشد تا در بازار رقابتی ضمن حفظ قابلیت رقابتی بودن، میزان هزینه‌های شرکت نیز کاهش قابل‌توجهی داشته باشد. داده‌های شرکت در مبحث تقاضای محصول نشان‌دهنده رشد در میزان تقاضا در شش ماه اول سال ۱۳۹۹ بوده است. با وجود رشد اقتصادی منفی در سالیان اخیر در کشور نشان‌دهنده قابلیت بالای شرکت در کسب بازار رقابتی بوده است. لذا رشد و صعود در بخش تقاضا نشان‌دهنده قابلیت بالای شبکه پیشنهادی و کارایی بالای سیستم در مبحث تولید و فروش و نیز ارائه خدمات پس از فروش به مشتریان سیستم بوده است. جهت حل مدل توسط نرم‌افزار گمز و نیز الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی و نیز برازش هر چه بهتر این روش‌ها و انجام مقایسه بر روی پاسخ نهایی، نیاز به حل مسائل مختلف در ابعاد متفاوت است. برای اطمینان از صحت و اعتبارسنجی مدل، از نرم‌افزار گمز استفاده شده و با توجه به دو هدفه بودن مسأله از روش محدودیت اپسیلون استفاده شده است و جواب‌های گزارش‌شده به ازای بهترین حالت تابع هدف سود است. ازاین‌رو در این قسمت از پژوهش حاضر برحسب تجارب شرکت و نیز بهره‌گیری ازنظر خبرگان بخش تایر خودرو و نیز مسائل مشابه، ۱۲ مسأله در حجم‌های نمونه‌ای متفاوت در نظر گرفته شده که تنظیمات آن به شرح جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۵ طبقه‌بندی مسائل

مسأله	پارامترهای مسأله
۱	$s=1;\ m=1; c=1; b=1; d=1; f=1; k=1; e=1; p=1; r=1; n=1; l=1; t=1$
۲	$s=1;\ m=1; c=1; b=1; d=1; f=1; k=1; e=1; p=1; r=1; n=1; l=1; t=1$
۳	$s=2;\ m=1; c=1; b=1; d=1; f=1; k=1; e=1; p=1; r=1; n=2; l=1; t=2$
۴	$s=2;\ m=2; c=2; b=2; d=1; f=1; k=1; e=1; p=2; r=2; n=2; l=1; t=2$
۵	$s=2;\ m=2; c=2; b=2; d=2; f=1; k=1; e=1; p=2; r=2; n=2; l=2; t=2$
۶	$s=3;\ m=2; c=2; b=2; d=2; f=2; k=1; e=2; p=3; r=2; n=3; l=2; t=3$
۷	$s=3;\ m=2; c=2; b=2; d=2; f=2; k=2; e=2; p=3; r=2; n=3; l=2; t=3$
۸	$s=3;\ m=3; c=3; b=3; d=3; f=2; k=2; e=2; p=4; r=3; n=4; l=2; t=4$
۹	$s=4;\ m=3; c=3; b=3; d=3; f=2; k=2; e=3; p=4; r=3; n=5; l=3; t=5$
۱۰	$s=4;\ m=3; c=3; b=3; d=3; f=3; k=2; e=3; p=5; r=4; n=5; l=3; t=5$
۱۱	$s=5;\ m=4; c=4; b=4; d=4; f=3; k=2; e=3; p=6; r=4; n=6; l=3; t=6$
۱۲	$s=5;\ m=4; c=4; b=4; d=4; f=3; k=2; e=3; p=6; r=4; n=6; l=3; t=6$

با توجه به جدول ۵ مسائل مختلف نشان داده شده است، علاوه بر دارا بودن پراکندگی مناسب، به ترتیب از مسائل با حجم کمتر به سمت مسائل با پیچیدگی بیشتر دسته‌بندی شده‌اند. مسائل حاضر با استفاده از دو نرم‌افزار گمز و نیز متلب شبیه‌سازی و کدنویسی شده‌اند و نتایج مربوط به روش دقیق و نیز هرکدام از روش‌های فراابتکاری در جدول ۶ به نمایش درآمده است. در این جدول نیز بهترین جواب تابع هدف سودآوری گزارش شده است.

روش استفاده‌شده در جهت حل مدل به روش قطعی و پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار گمز تنها قادر است تا مسائل با حجم کوچک را حل نماید. اما نیازمند زمان حل قابل‌توجهی است. از مسأله پنجم به بعد، به علت نمایی بالا رفتن زمان حل، نرم‌افزار قادر به حل مدل توسط روش قطعی نبوده است و لذا نیازمند استفاده از روش‌های حل فراابتکاری در حل مدل پیشنهادی و خصوصاً در ابعاد بزرگ است. در قسمت الگوریتم‌های فراابتکاری، کارایی مدل توسط حل آن به‌وسیله ۱۲ مسأله مختلف نشان داده‌شده است. در هر قسمت، الگوریتم‌های فراابتکاری توانسته‌اند با سبقت گرفتن از روش قطعی در زمان بسیار مناسب‌تر به پاسخ نزدیک به بهینه مسأله و با تقریب بسیار خوب نزدیک شوند. در جهت مقایسه روش‌های حل فراابتکاری با مقایسه پاسخ‌های بهینه مسأله می‌توان تا حدود زیادی مطلوبیت هرکدام را دریافت. بر این اساس بر دو شاخص زیر می‌توان تکیه نمود:

مقدار تابع هدف بهینه: در این قسمت روش فراابتکاری NSGA-II توانست نسبت به الگوریتم‌های فراابتکاری MOPSO بهتر ظاهر شده و علی‌الخصوص در مسائل بزرگتر، مقادیر بهتری را به دست دهند.

زمان رسیدن به پاسخ بهینه: در خصوص رسیدن به پاسخ بهینه، کم‌ترین زمان همواره پارامتری تعیین‌کننده به‌شمار می‌آید. با مقایسه زمان حل روش‌های مختلف دیده‌شده که الگوریتم فراابتکاری و چندهدفه MOPSO توانسته درزمانی کمتر از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II، جواب داشته باشد. روند پاسخ نهایی مسأله و نیز زمان حل در روش‌های پیشنهادی در شکل ۲ و ۳ ارائه‌شده است. خروجی‌های جزئی‌تر مدل در جدول ۷ آمده است.

جدول ۶ نتایج حل مدل با روش‌های پیشنهادی

مقدار هدف/ مسائل	GAMS	CPU time	MOPSO	CPU time	NSGA-II	CPU time
مسأله ۱	۴۹۸۶۳۴	۱۲۴۳	۴۸۸۶۶۲	۰/۴۱	۴۸۹۱۶۰	۰/۳۴
مسأله ۲	۵۰۶۲۲۰	۱۴۹۷	۴۹۶۰۹۵	۱/۸۵	۴۹۶۶۰۲	۱/۵۵
مسأله ۳	۵۱۲۱۱۶	۱۸۲۳	۵۰۱۸۷۴	۷/۳۶	۵۰۲۳۸۶	۶/۱۷
مسأله ۴	۵۴۳۸۶۷	۲۰۰۹	۵۳۲۹۹۰	۱۰/۵۲	۵۳۳۵۳۴	۸/۸۳
مسأله ۵	۵۹۹۵۲۷	۲۸۱۲	۵۸۷۵۳۷	۱۵/۵۴	۵۸۸۱۳۶	۱۳/۰۳
مسأله ۶	–	–	۶۱۴۸۵۶	۴۵/۸۶	۶۱۵۴۸۳	۳۸/۴۶
مسأله ۷	–	–	۶۳۷۹۸۹	۱۱۲/۲۷	۶۳۸۶۴۰	۹۴/۱۶
مسأله ۸	–	–	۶۸۳۵۵۲	۱۱۵/۴۲	۶۸۴۲۵۰	۱۸۴/۲۴
مسأله ۹	–	–	۷۴۳۳۲۱	۱۳۳/۷۴	۷۴۴۰۸۰	۲۶۱/۵۹
مسأله ۱۰	–	–	۸۱۴۸۵۰	۲۰۲/۰۸	۸۱۵۶۸۲	۳۱۹/۲۱
مسأله ۱۱	–	–	۸۹۶۸۶۲	۲۹۷/۱۴	۸۷۰۷۴۹	۴۵۸/۸۴
مسأله ۱۲	–	–	۹۲۸۳۵۷	۴۱۲/۳۹	۹۲۹۳۰۴	۵۰۶/۸۴

جدول ۷ مقادیر سود و هزینه‌ها برای نمونه مطالعاتی

مقادیر متغیرها	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
درآمد کل زنجیره‌تأمین	۹۸۷۷۷۶	۹۹۸۳۰۴	۱۰۲۶۳۸۴	۱۰۶۱۹۲۰	۱۰۵۹۰۸۸	۱۰۵۷۰۲۴
هزینه راه اندازی	۱۳۴۴۰۰	–	–	–	–	–
هزینه سفارش دهی	۴۱۰۱۸۴	۵۵۰۸۰۱	۵۹۹۵۶۰	۵۰۷۴۴۶	۴۴۴۰۸۰	۳۹۱۲۹۶
هزینه تولید	۲۲۰۴۰۰	۲۳۲۶۷۲	۲۲۶۹۷۶	۲۳۵۹۳۶	۲۴۳۵۵۲	۲۴۰۷۵۲
هزینه عملیاتی	۴۷۳۴۶/۶۸	۴۷۵۳۹/۹۴	۴۷۵۷۸/۷۸	۴۷۷۳۰/۶۲	۴۷۹۳۸/۳۴	۴۸۰۱۸/۰۶
هزینه جمع‌آوری	۶۹۱۲	۱۰۳۶۸	۱۲۹۶۰	۱۲۹۶۰	۱۷۲۸۰	۱۷۲۸۰
هزینه نگهداری	۱۲۰۴۰۰	۱۰۸۴۷۹	۹۲۰۰۰	۲۱۰۸۷۶	۲۵۹۷۵۴	۳۱۲۸۷۶
هزینه حمل‌ونقل	۴۸۱۳۲/۹۱	۴۸۴۴۳/۹۳	۴۷۳۰۹/۱۴	۴۶۹۷۱/۴۹	۴۶۴۸۳/۵۵	۴۶۸۰۱/۸۳
سود زنجیره‌تأمین	۶۰۴۷۲/۴۱	۱۷۸۹۷۶/۱	۱۹۸۴۲۴/۱	۲۲۱۰۰۹/۹	۱۹۸۱۰۶/۱	۱۹۵۹۰۰/۱
سود کل زنجیره‌تأمین	۱۰۵۲۸۸۹					

۴-۵ آنالیز حساسیت

در این قسمت با تغییرات از پیش تعیین‌شده در برخی پارامترهای حساس مدل، روند تغییرات را برای هر یک از پارامترها و تاثیرات آن در مدل مسأله بررسی شده‌اند. برای بررسی هر چه بهتر، روند دوره‌های مختلف و میانگین تغییرات آن‌ها در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته است. روند کلی تقاضا در دو دوره به‌صورت جدول ۸ می‌باشد. در این‌جا مقادیر مربوط به تقاضای مشتریان یکبار به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد کاهش و سپس افزایش‌یافته است و نتیجه این تغییرات در مقادیر توابع هدف و نیز الگوریتم‌های پیشنهادی و سایر فاکتورهای تاثیرگذار مدل به نمایش درآمده است. در جدول ۸ تحلیل حساسیت مربوط به تقاضا و اثرات آن بر روی مراکز بازگشایی شده و نیز مقادیر توابع هدف اول و دوم و در نهایت روش‌های فراابتکاری مذکور به نمایش درآمده است. با کاهش نرخ تقاضا نیاز به بازگشایی مراکز جدید وجود نداشته چراکه مراکز موجود قادر هستند تولید و توزیع و انجام بازتولید را انجام دهند و بازگشایی مراکز جدید تنها به افزایش هزینه‌ها خواهد انجامید. به علت کاهش نرخ تقاضا، میزان سود سیستم کاهش می‌یابد. در حالت دوم با افزایش نرخ تقاضا، جهت پاسخ‌گویی هرچه بهتر تولید و توزیع، تعدادی مراکز جدید در هر دو جهت روبه‌جلو و رو به عقب، بازگشایی خواهند شد تا ضمن پوشش تقاضای بازار نیازمندی به امر تولید و توزیع و نیاز به بازتولید و دپوی بیشتر را به انجام برساند. با افزایش نرخ تقاضا میزان بهره‌وری تولید و توزیع افزایش‌یافته در نتیجه شاهد یک افزایش نرخ در سود نهایی سیستم خواهیم بود. در انتها افزایش جابجایی‌ها منجر به افزایش نرخ انتشار گاز کربن دی‌اکسید در تابع هدف دوم مسأله نیز خواهد شد.

جدول ۸ تحلیل حساسیت مربوط به تقاضا

پارامتر	تقاضا			
تغییرپذیری	50% ↓	25% ↓	25% ↑	50% ↑
مراکز جدید بازگشایی‌شده در جهت روبه‌جلو	-	-	4	6
تعداد مراکز بازگشایی‌شده در جهت رو به عقب	-	-	3	7
MOPSO	-44.7%	-23.2%	+4.4%	+9.2%
NSGA-	-45.3%	-24.7%	+4.3%	+9.1%
تابع هدف اول	-23.6%	-11.9%	+1.2%	+2.7%
تابع هدف دوم	-32.4%	-16.7%	+0.8%	+1.8%

در این ادامه حدود مربوط به میزان انتشارت و تأثیر آن بر فاکتورهای مهم مسأله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی در جدول ۹ به نمایش درآمده است. با توجه به جدول ۹ مقادیر تحلیل‌شده پس از تنظیم مقدار انتشار به نمایش درآمده‌اند. کاهش میزان انتشارت به این معنی است که میزان جریان‌های روبه‌جلو و رو به عقب باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که موجب کاهش انتشارت در کل سیستم شود. این امر به این معنی است که انتخاب مراکز باید به صورتی انجام پذیرد که این مقادیر رعایت شوند. این موضوع موجب خواهد شد تا برخی مراکز مورد استفاده قرار نگیرند. لذا مراکز جدیدی در مسأله بازگشایی نخواهند شد. این امر موجب در میزان تولید، توزیع و خدمات به مشتریان اولیه و ثانویه تأثیر گذاشته و موجب می‌شود تابع هدف اول و دوم مسأله کاهش یابند. در قسمت بعدی با افزایش حدود تا ۲۵ درصد، مدل پیشنهادی تا حدودی با فراغ بیشتر به انتخاب مکان‌های بالقوه دست خواهد زد. این امر سبب شده تا برخی مراکز دیگر در سیستم بازگشایی شوند. همچنین این موضوع به میزان محدودی مقدار توابع هدف اول و دوم را افزایش داده است. در قسمت بعدی با افزایش ۵۰ درصدی میزان انتشار، مدل صرفه اقتصادی نداشته و بدون هیچگونه تغییری مقادیر نهایی را بازتاب خواهد کرد.

جدول ۹ تحلیل حساسیت مربوط به حدود انتشار

پارامتر		حدود انتشار			
تغییرپذیری		50% ↓	25% ↓	25% ↑	50% ↑
مراکز جدید بازگشایی‌شده در جهت رفت		-	-	3	3
تعداد مراکز بازگشایی‌شده در جهت بازگشت		-	-	2	2
	MOPSO	-36.65%	-19.02%	+9.42%	-
	NSGAII	-37.15%	-20.25%	+9.20%	-
مقادیر تابع هدف	تابع هدف اول	-19.35%	-9.76%	+2.57%	-
	تابع هدف دوم	-26.57%	-13.69%	+1.71%	-

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل چندسطحی، چنددوره‌ای و چندمحصولی برای طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته در شرایط تقاضای ثابت و با درنظر گرفتن مشتریان ثانویه سیستم پیشنهاد شده است. مدل حاضر در جهت روبه‌جلو، دارای سطوح تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان (واحدهای تولید و بازتولید به‌صورت ترکیبی به‌عنوان یک تسهیل درنظر گرفته شده‌اند)، مشتریان بوده است و در جهت رو به عقب دارای سطوح جمع‌آوری محصولات، انهدام، مشتریان ثانویه است. مدل به‌صورت برنامه‌ریزی خطی مختلط و دارای تابع هدف حداکثرسازی سود و نیز کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. مسأله حاضر از ابعاد طراحی شبکه و سودآوری قابل‌بررسی و نتیجه‌گیری است.

از بعد طراحی شبکه در نظر گرفتن سطوحی که به‌صورت هم‌زمان چندین فعالیت را به انجام می‌رساند از اهمیت بسزایی برخوردار بوده است. مطالعات گذشته با افزودن سطوح مجزا سعی در نظر گرفتن تمامی ابعاد مدل داشته‌اند. اما در پژوهش حاضر ضمن در نظر گرفتن تجمیعی آن در یک سطح نه‌تنها سطوح و بالطبع جریان‌های شبکه کم‌تر شده است، بلکه در طی زمان این عامل موجب کاهش در هزینه‌های سیستم خواهد شد. یکی از دلایل آن عدم نیاز به بازگشایی و تأسیس سطوح جدید می‌باشد که هزینه اولیه بسیار کمتری را به سیستم تولید، توزیع و فروش محصولات وارد می‌سازد. از بعد دیگر طراحی شبکه به‌صورت زنجیره‌ای حلقه بسته و بازگشتی سبب افزایش بهره‌وری سیستم و نیز جلب اعتماد مشتریان در نقاط فروش تقاضا شده است. نتایج نشان داده شده در بخش قبلی بیانگر سیر صعودی در افزایش تقاضا مکان‌های موردمطالعه بوده است. یکی از دلایل این امر توجه به محصولات بازگشتی و نیز ارسال برخی محصولات به مشتریان ثانویه سیستم بوده است. لذا در کل فرآیند تولید تا انهدام بخشی از محصولات بازگشتی، کلیه محصولات مورداستفاده قرارگرفته و با ایجاد مراکز باز تولید، اعتمادپذیری مشتریان نسبت به امر فروش محصولات کارخانه افزایش چشم‌گیری داشته است.

طراحی بهینه شبکه مورد نظر سبب بهینه‌سازی سود نیز شده است. تقاضای مشتریان سیستم به‌صورت ثابت در نظر گرفته‌شده است. فروش شرکت موردمطالعه، توسط تقاضای بیشتر محصولات بالاتر رفته که این امر بر اثر بازاریابی درست و ایجاد اعتماد برای مشتریان سیستم شکل گرفته است. همچنین تنوع بسیار خوب محصولات از بعد کیفیت و طراحی ساخت سبب شده تا بازه قیمتی مناسبی برای خرید محصولات متنوع پیش‌روی مشتریان قرار داشته باشد. درنظر گرفتن این عوامل در کنار موارد گفته‌شده در طراحی شبکه، باعث بالا رفتن میزان فروش از یکسو و پایین آمدن هزینه‌های سیستم از سوی دیگر شده است. نتیجه این امر ایجاد دامنه سود مناسب در زمان بررسی مورد مطالعاتی بوده است.

یکی از بینش‌های مدیریتی حاصل از این تحقیق، در نظر گرفتن مراکز موقت در شبکه توزیع و بازگشت است. بدین معنی که افزودن این مراکز می‌تواند در دوره‌هایی که تقاضا افزایش می‌یابد و همراه با آن جریان بازگشت محصول نیز افزایش می‌یابد موجب کاهش هزینه‌های کل زنجیره و افزایش سود زنجیره شود. همچنین مدیران می‌توانند با پذیرش کاهش چنددرصدی سود زنجیره، بهبود قابل‌توجهی در بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی ایجاد نمایند و همچنین جایگاه و اعتبار زنجیره را در این شاخص بهبود بخشند.

در این مقاله پارامترهای مسأله، به‌صورت قطعی در نظر گرفته شده است. هرچند قطعی در نظر گرفتن برخی از پارامترها که در کوتاه‌مدت نوسان کمی دارد تأثیر زیادی بر نتایج ندارد، اما نوسانات شدید در پارامترهایی مانند تأمین مواد اولیه در زنجیره تولید تایر می‌تواند بر نتایج مؤثر باشد و جواب‌های بدست آمده را گاهی اوقات نشدنی کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مسأله این تحقیق با عدم قطعیت در تأمین مواد اولیه تولید مدلسازی شده و با رویکردهای برنامه‌ریزی غیرقطعی مانند رویکرد بهینه‌سازی استوار به حل آن پرداخته شود. از موارد دیگری که در تحقیقات آتی می‌توان در نظر گرفت افزودن مباحث قابلیت اطمینان در سیستم تولید و توزیع، ریسک‌های تأمین و اضافه کردن محدودیت‌های برنامه‌ریزی تولید در مسأله این تحقیق است.

مراجع

[1] Batty M, Axhausen KW, Giannotti F, Pozdnoukhov A, Bazzani A, Wachowicz M, et al. Smart cities of the future. The European Physical Journal Special Topics. 2012;214(1):481-518. https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3

[2] Barbosa-Póvoa AP, Da Silva C, Carvalho A. Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. European journal of operational research. 2018;268(2):399-431. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036

[3] Popovic T, Barbosa-Póvoa A, Kraslawski A, Carvalho A. Quantitative indicators for social sustainability assessment of supply chains. Journal of cleaner production. 2018;180:748-68. 2 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.142

[4] Mota B, Gomes MI, Carvalho A, Barbosa-Povoa AP. Sustainable supply chains: An integrated modeling approach under uncertainty. Omega. 2018;77:32-57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.05.006

[5] Sabogal-De La Pava ML, Vidal-Holguín CJ, Manotas-Duque DF, Bravo-Bastidas JJ. Sustainable supply chain design considering indicators of value creation. Computers & Industrial Engineering. 2021;157:107294. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107294

[6] Melo MT, Nickel S, Da Gama FS. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. Computers & Operations Research. 2006;33(1):181-208. https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.005

[7] Melo MT, Nickel S, Saldanha-Da-Gama F. Facility location and supply chain management-A review. European journal of operational research. 2009;196(2):401-12. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007

[8] Amin SH, Zhang G. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. Applied mathematical modelling. 2013;37(6):4165-76. https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.039

[9] Shankar BL, Basavarajappa S, Chen JC, Kadadevaramath RS. Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network-A multi-objective evolutionary approach. Expert Systems with Applications. 2013;40(2):551-62. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.065

[10] Shahabi M, Akbarinasaji S, Unnikrishnan A, James R. Integrated inventory control and facility location decisions in a multi-echelon supply chain network with hubs. Networks and Spatial Economics. 2013;13(4):497-514. https://doi.org/10.1007/s11067-013-9196-4

[11] Afshari H, Sharafi M, ElMekkawy T, Peng Q. Optimizing multi-objective dynamic facility location decisions within green distribution network design. Procedia Cirp. 2014;17:675-9. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.147

[12] Etemadnia H, Goetz SJ, Canning P, Tavallali MS. Optimal wholesale facilities location within the fruit and vegetables supply chain with bimodal transportation options: An LP-MIP heuristic approach. European Journal of Operational Research. 2015;244(2):648-61. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.044

[13] Zhalechian M, Tavakkoli-Moghaddam R, Zahiri B, Mohammadi M. Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. Transportation research part E: logistics and transportation review. 2016;89:182-214. https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011

[14] Kaya O, Urek B. A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain. Computers & Operations Research. 2016;65:93-103. https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.07.005

[15] Martínez JCV, Fransoo JC. Green facility location. Sustainable supply chains: a research-based textbook on operations and strategy: Springer; 2016. p. 219-34. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29791-0_9

[16] Talaei M, FARHANG MB, PISHVAEE M, BOZORGI AA. A BI-OBJECTIVE FACILITY LOCATION MODEL FOR A GREEN CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN. 2015.

[17] Amin SH, Baki F. A facility location model for global closed-loop supply chain network design. Applied Mathematical Modelling. 2017;41:316-30. https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030

[18] Srinivasan S, Khan SH. Multi-stage manufacturing/re-manufacturing facility location and allocation model under uncertain demand and return. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;94(5):2847-60. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1066-7

[19] Khorasani ST, Almasifard M. The development of a green supply chain dual-objective facility by considering different levels of uncertainty. Journal of Industrial Engineering International. 2018;14(3):593-602. https://doi.org/10.1007/s40092-017-0245-3

[20] Yadegari E, Alem-Tabriz A, Zandieh M. A memetic algorithm with a novel neighborhood search and modified solution representation for closed-loop supply chain network design. Computers & Industrial Engineering. 2019;128:418-36. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.054

[21] Strong D, Kay M, Conner B, Wakefield T, Manogharan G. Hybrid manufacturing-Locating AM hubs using a two-stage facility location approach. Additive Manufacturing. 2019;25:469-76. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.027

[22] Sarker BR, Wu B, Paudel KP. Modeling and optimization of a supply chain of renewable biomass and biogas: Processing plant location. Applied Energy. 2019;239:343-55. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.216

[23] Saadati M, Hosseininezhad SJ. Designing a hub location model in a bagasse-based bioethanol supply chain network in Iran (case study: Iran sugar industry). Biomass and Bioenergy. 2019;122:238-56. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.013

[24] Delfani F, Samanipour H, Beiki H, Yumashev AV, Akhmetshin EM. A robust fuzzy optimisation for a multi-objective pharmaceutical supply chain network design problem considering reliability and delivery time. International journal of systems science: operations & logistics. 2022;9(2):155-79. https://doi.org/10.1080/23302674.2020.1862936

[25] Abbasi S, Daneshmand-Mehr M, Ghane Kanafi A. Green closed-loop supply chain network design during the coronavirus (COVID-19) pandemic: a case study in the Iranian automotive industry. Environmental Modeling & Assessment. 2023;28(1):69-103. https://doi.org/10.1007/s10666-022-09863-0

[26] Kumar A, Kumar K. An uncertain sustainable supply chain network design for regulating greenhouse gas emission and supply chain cost. Cleaner Logistics and Supply Chain. 2024;10:100142. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100142

[27] Goli A, Babaee Tirkolaee E, Golmohammadi A-M, Atan Z, Weber G-W, Ali SS. A robust optimization model to design an IoT-based sustainable supply chain network with flexibility: A. Goli et al. Central European Journal of Operations Research. 2025;33(3):1025-46. https://doi.org/10.1007/s10100-023-00870-4

[28] Saeidifar SM, Mahdavi I, Tajdin A, Javadian N. Modeling a sustainable and resilient supply chain in the automotive industry. Journal of quality engineering and management. 2025;14(4):379-406.

[29] Mohammadghasemi J, Najafi SE, Fallah M, Nabatchian MR. Presenting a robust optimization model for the design of the green loop supply chain network in the power plant by taking into account the disruption in the supply chain. Journal of decisions and operations research. 2023;8(4):1032-49.

[30] Razavinejad A, Najafi SE, Khalaj M, Pour HK. Agility of the drug supply chain considering economic and social aspects: Use of Internet of things and big data analysis. International Journal of Economic Sciences. 2026;15(1):54-84. https://doi.org/10.31181/ijes1512026214

[31] Mozaffari, Daneshvar, Jafari K. Multi-objective optimization of sustainable reverse supply chain of municipal solid waste considering uncertainty: Robust optimization approach. Supply Chain Management. 2025; 88(27): 1-34.

[32] Saeedi M, Fathollahzadeh K, Zokaee M, Jolai F, Aghsami A. Bi-objective optimization model for biomass supply chains towards net-zero goals: Integrating queuing systems and solar panel technologies. Environment, Development and Sustainability. 2026:1-48. https://doi.org/10.1007/s10668-025-07247-4

[33] Sojoudi P, Paydar MM, Nayeri S. Designing a circular dual channel fish supply chain network considering sustainability: A case study. Computers & Industrial Engineering. 2025;203:111017. https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111017