

Two-Echelon Location-Routing under Uncertainty Considering Reliability

Ramin Behbamdadeh 

Ph. D. Student, Department of Operation Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

Maghsoud Amiri 

Professor, Department of Operation Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.
(Corresponding Author, Email: amiri@atu.ac.ir)

Mohammad Taghi Taghavifard 

Professor, Department of Operation Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

Amir Yousefli 

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Received: Jul. 08, 2024; Revised: Aug. 26, 2024; Accepted: Nov. 28, 2024; Published Online: Dec. 02, 2024.

Extended Abstract

Introduction and objectives: Urban development and the increase in extra-urban and intra-urban transportation have led to a sharp increase in the costs related to transportation, this increase in cost leads to an increase in the cost price of the final products and as a result to an increase in the price of the product. Also, the economic dimension is not the only consideration, and the increase in transportation leads to an increase in CO₂ emissions. This issue has led to the design of different models of transportation and vehicle routing, which can be referred to the problem of vehicle location-routing. The issue of locating facilities is a strategic decision because the cost of building and locating facilities is very high. On the other hand, routing decisions are based on location decisions and it is considered a mid-term and short-term decision. In this paper, by developing a mathematical model of vehicle location-routing under conditions of uncertainty and considering reliability, an attempt has been made to simultaneously optimize stability objective functions while maintaining minimum reliability. The sustainability objectives in this paper include minimizing the costs of the entire problem, minimizing the amount of CO₂ emissions, and maximizing employment opportunities based on integrated strategic and tactical decisions. The most important issue addressed in this article is decision making regarding the optimal routing of transportation, taking into account the time window and the reliability of locating the facilities based on their failure rate.

Methods: Due to the indeterminacy of the parameters of the mathematical model, various types of fuzzy and robust programming methods have been used in formulating the model. Therefore, 4 different models to control the uncertainty of demand parameters and transportation costs have been used and the results of the model have been compared. Also, two exact methods and meta-heuristic algorithm have been used to solve the multi-objective mathematical model. For the analysis of the mathematical model in small size as well as the sensitivity analysis of the model, the enhanced limit epsilon method has been used, and to solve the numerical examples in large sizes, the NSGA-II algorithm has been used. Also, in this article, an initial solution based on prioritization is used for meta-heuristic algorithm.

Results and discussion: The results of the analysis show that although the increase in the uncertainty rate has led to an increase in job opportunities, it has also increased the total costs and the amount of greenhouse gas emissions. Also, the studies show that the RPP-III method has obtained the highest model stability cost with the lowest standard deviation. In the reliability analysis, it was observed that the higher the facility failure rate, the higher the number of located production centers and distribution centers. This has led to an increase in total costs, an increase in CO₂ emissions, and an increase in the number of job opportunities. By analyzing 15 numerical examples, it was also observed that NSGA-II has a high efficiency in solving the mathematical model compared to the augmented constraint epsilon.

Conclusion: The results obtained in this research help managers in making strategic decisions such as facility location and tactical decisions such as vehicle routing so that they can make appropriate decisions in the market uncertainty. Due to the fact that in this model, different decisions and assumptions close to the real world are taken into account, the mathematical model can be used in broadcasting industries, especially pharmaceutical and electronic goods.

Keywords: Location-Routing; Two-Echelon Routing; Uncertainty; Robust Possibilistic; Meta-Heuristic Algorithm; Reliability.

How to Cite: Behbani
Facility Location P



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مسیریابی-مکان یابی دوسطحی در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

رامین بهیمزاده ^{id}

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

مقصود امیری ^{id}

استاد، گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
Email: amiri@atu.ac.ir (نویسنده مسئول)

محمدتقی تقوی فرد ^{id}

استاد، گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

امیر یوسفلی ^{id}

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲.

چکیده

مقدمه و اهداف: توسعه شهری و افزایش میزان حمل و نقل های برون شهری و درون شهری منجر به آن شده است تا هزینه های مرتبط با حمل و نقل به شدت افزایش یابد، این افزایش هزینه منجر به افزایش قیمت تمام شده محصولات نهایی و در نتیجه افزایش قیمت محصول می شود. همچنین تنها بعد اقتصادی مد نظر نبوده و افزایش حمل و نقل منجر به افزایش میزان انتشار گاز CO₂ می شود. این موضوع منجر به طراحی مدل های مختلف حمل و نقل و مسیریابی وسیله نقلیه شده است که می توان به مسئله مکان یابی-مسیریابی وسیله نقلیه اشاره کرد. مسئله مکان یابی تسهیلات یک تصمیم استراتژیکی است زیرا که هزینه احداث و مکان یابی تسهیلات بسیار بالا می باشد. از سوی دیگر تصمیمات مسیریابی مبتنی بر تصمیمات مکان یابی صورت می پذیرد و یک تصمیم میان مدت و کوتاه مدت به شمار می آید. در این مقاله با توسعه یک مدل ریاضی از مکان یابی-مسیریابی وسیله نقلیه در شرایط عدم قطعیت و در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، تلاش شده است تا بهینه سازی همزمان در توابع هدف پایداری با حفظ حداقل قابلیت اطمینان صورت پذیرد. اهداف پایداری در این مقاله شامل کمیته سازی هزینه های کل مسئله، کمیته سازی میزان انتشار CO₂ و پیشینه سازی فرصت های شغلی بر اساس تصمیمات یکپارچه استراتژیکی و تاکتیکی است. مهم ترین موضوع پرداخته شده در این مقاله تصمیم گیری در خصوص مسیریابی بهینه حمل و نقل با در نظر گرفتن پنجره زمانی و قابلیت اطمینان در مکان یابی تسهیلات بر اساس نرخ خرابی آن ها می باشد.

روش‌ها: به دلیل غیر قطعی بودن پارامترهای مدل ریاضی از انواع مختلف روش‌های برنامه ریزی فازی و استوار امکانی در فرموله کردن مدل استفاده شده است. از این رو ۴ مدل مختلف برای کنترل عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و هزینه‌های حمل و نقل استفاده و نتایج مدل با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین برای حل مدل ریاضی چند هدفه از دو روش دقیق و الگوریتم فرا ابتکاری استفاده شده است. برای تجزیه و تحلیل مدل ریاضی در سائز کوچک و همچنین تحلیل حساسیت مدل از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده و برای حل مثال‌های عددی در سائزهای بزرگتر از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. همچنین در این مقاله یک راه حل اولیه مبتنی بر اولویت‌بندی برای الگوریتم فرا ابتکاری استفاده شده است.

یافته‌ها: نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد افزایش نرخ عدم قطعیت اگر چه منجر به افزایش فرصت‌های شغلی شده است، هزینه‌های کل و میزان انتشار گازهای گلخانه را نیز افزایش داده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد روش RPP-III بالاترین هزینه استواری مدل را با کمترین انحراف معیار کسب کرده است. در تحلیل قابلیت اطمینان این موضوع مشاهده گردید که هر چه نرخ خرابی تسهیلات بالاتر باشد، تعداد مراکز تولید و مراکز توزیع مکان‌یابی شده افزایش می‌یابد. این موضوع منجر به افزایش هزینه‌های کل، افزایش میزان انتشار CO₂ و همچنین افزایش تعداد فرصت‌های شغلی شده است. با تجزیه و تحلیل ۱۵ مثال عددی نیز مشاهده گردید که NSGA-II از کارایی بالایی در حل مدل ریاضی نسبت به اپسیلون محدودیت تقویت شده برخوردار است.

نتیجه‌گیری: نتایج بدست آمده در این تحقیق به مدیران در راستای اتخاذ تصمیمات استراتژیکی نظیر مکان‌یابی تسهیلات و تاکتیکی نظیر مسیریابی وسیله نقلیه کمک شایانی می‌نماید تا بتوانند در شرایط عدم قطعیت بازار تصمیمات مناسبی را اخذ کنند. با توجه به اینکه در این مدل تصمیمات و مفروضات مختلف و نزدیک به دنیای واقعی لحاظ شده است، مدل ریاضی می‌تواند در صنایع پخش مخصوصا کالاهای دارویی و الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی-مسیریابی؛ مسیریابی دوسطحی؛ عدم قطعیت؛ استوار امکانی؛ الگوریتم فرا ابتکاری؛ قابلیت اطمینان.



۱. مقدمه

امروزه توسعه شهرنشینی، افزایش واحدهای مختلف تولیدی و جهانی شدن شرکتها منجر به آن شده است تا حمل و نقل به عنوان مسئله‌ای پیچیده تبدیل گردد. افزایش تقاضا به واسطه توسعه شهری منجر به افزایش میزان تردد انواع گزینه‌های حمل و نقل شده که مشکلاتی نظیر ترافیک، آلودگی‌های زیست محیطی، طولانی شدن زمان تردد و غیره را به بار آورده است [۴۳]. همچنین توسعه شهرنشینی، این افزایش هزینه منجر به افزایش قیمت تمام شده محصولات نهایی و در نتیجه افزایش قیمت محصول می‌شود. همچنین تنها بعد اقتصادی مد نظر نبوده و افزایش حمل و نقل منجر به افزایش میزان انتشار گاز CO₂ می‌شود. این مسئله نیز منجر به بیماری‌های ریوی و پوستی در بین عموم مردم می‌شود. این مسائل نیز در پی تعیین مسیر بهینه وسایل نقلیه و یا مراکز توزیع در سطح شهر است. تجهیز و کارآمد سیستم حمل و نقل می‌تواند مشکلات ناشی از ترافیک، آلودگی‌های زیست محیطی ایجاد شده نظیر (آلودگی هوا، آب، صوتی و ...) را در بخش‌های تولیدی، خدماتی و حمل و نقل انسان را حل نماید [۲۳]. این بخش به عنوان یکی از بخش‌های مهم در اقتصاد هر کشور مطرح می‌شود؛ زیرا می‌تواند منجر به کاهش قیمت تمام شده محصولات گردد. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از مسائل مورد بحث در تحقیق در عملیات، توزیع کالا، جابجایی افراد و حمل و نقل می‌باشد [۲۷].

جهانی شدن منجر به آن شده است تا واحدهای تولیدی از دپوهای مختلف جهت توزیع محصولات خود استفاده نمایند. زیرا وجود یک دپو جهت توزیع محصولات می‌تواند هزینه‌های حمل و نقل را به شدت افزایش داده و صرفه اقتصادی نداشته باشد [۵۷]. در نتیجه در این نوع مسائل چندین دپو مختلف وجود دارد که هر کدام مجموعه‌ای از مشتریان را به خود اختصاص می‌دهد. هدف این نوع مسائل تعیین مسیر مناسب حمل و نقل و ارائه خدمات به مشتریان تخصیص یافته به هر دپو متناسب با اهداف شرکت است [۱۸]. این یعنی وسیله نقلیه به چه ترتیبی و در چه زمانی به ارائه خدمات به مشتریان بپردازد و سپس به دپو باز گردد. با توسعه سیستم حمل و نقل در کشور و همچنین توسعه مدل‌های مسیریابی، امروزه ترکیبی از مسائل مسیریابی در نظر گرفته شده است که در آن مکان‌یابی - مسیریابی در سطوح بیشتری انجام می‌گیرد. در این مدل مکان‌یابی به منزله انتخاب چند مرکز تولید و توزیع از بین مراکز بالقوه می‌باشد. لذا تعیین تعداد و مکان مراکز به عنوان مکان‌یابی مطرح می‌شود. به عنوان مثال، توسعه مدل‌های ریاضی برای مسئله مسیریابی، منجر به آن شده است تا این نوع از مسائل در دو سطح مختلف در نظر گرفته شوند [۱۳]. در این نوع از مسائل که به مسائل مسیریابی دو سطحی نام نهاده شده است، هدف مسیریابی در سطح اول و دوم می‌باشد. این نوع از مسائل در سطح اول معمولاً از وسایل نقلیه با ظرفیت بالاتر استفاده نموده و برای مسیریابی در سطح دوم از وسایل نقلیه کوچکتر استفاده می‌شود. توسعه مدل ریاضی مکان‌یابی - مسیریابی به طور همزمان می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های کل، میزان اثرات مخرب زیست محیطی را نیز کاهش دهد [۱۴].

تفاوت در نوع تصمیمات مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسیله نقلیه به دلیل ماهیت استراتژیکی و تاکتیکی آنها، به گونه‌ای است که بایستی حتماً به صورت همزمان اتخاذ گردند. زیرا در صورتی که اگر هدف تنها مکان‌یابی تسهیلات باشد، امکان دارد مکان تسهیلات و نوع تسهیلات ایجاد شده به گونه‌ای باشد که در دراز مدت هزینه‌های حمل و نقل و دیگر موارد را افزایش دهد. از این رو بایستی این موارد در قالب یک مدل ریاضی و به صورت همزمان در نظر گرفته شود. لذا با در نظر گرفتن موارد فوق، بایستی مدل مناسبی جهت انتخاب مراکز تولید و توزیع ارائه گردد که به طور همزمان مسیر بهینه وسایل نقلیه جهت تحویل محصولات نیز در آن تعیین شده و در پی افزایش سطح رضایت مشتری با در نظر گرفتن تحویل کالا در یک پنجره زمانی از پیش تعیین شده، باشد. می‌توان به صراحت بیان کرد که مدل ریاضی پیشنهاد شده در این تحقیق، می‌تواند تمامی جنبه‌های پایداری شبکه از جمله اقتصادی (کاهش هزینه)، زیست محیطی (کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای) و اجتماعی (افزایش فرصت‌های شغلی) را در نظر بگیرد. همچنین در این تحقیق به بحث عدم قطعیت در مقدار تقاضا و هزینه‌های حمل و نقل نیز پرداخته خواهد شد و روش مناسبی جهت فرموله کردن این پارامترها پیشنهاد خواهد شد. تحویل محصولات با قابلیت اطمینان بالا در هر مجموعه‌ای از اولین اولویت‌های رقابتی می‌باشد، در نتیجه در مدل پیشنهادی حداقل قابلیت

اطمینان در شبکه نیز در نظر گرفته خواهد شد. در نهایت مناسب ترین روش حل چنین مسئله با پیچیدگی محاسباتی بالا یکی از ضرورت‌های هر مدل ریاضی است که در این تحقیق از روش‌های دقیق و الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت حل مسئله بهره گرفته خواهد شد. در اینگونه مسائل، تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی به صورت همزمان اتخاذ می‌گردد که در آن تصمیم استراتژیکی شامل مکان‌یابی مراکز تولید و توزیع می‌باشد. یعنی در این تصمیم هدف تعیین تعداد و مکان بهینه مراکز تولید و توزیع در راستای بهینه‌سازی توابع هدف مسئله است. از آنجایی که این تصمیمات معمولاً بلند مدت هستند، تاثیر بسزایی در مسئله دارند. تصمیمات نوع دوم تصمیمات تاکتیکی هستند. در این نوع تصمیمات که همزمان با تصمیمات استراتژیکی اتخاذ می‌شود، هدف تعیین مسیر بهینه وسایل نقلیه در سطح اول (مرکز تولید و مرکز توزیع) و سطح دوم (مرکز توزیع و مشتریان) است. در این نوع از تصمیمات، تعیین مسیر بهینه که در آن هر مشتری توسط یک وسیله نقلیه بازدید شده و در یک پنجره زمانی کالای خود را دریافت کند، بسیار مهم است. عدم اتخاذ مناسب تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی علاوه بر افزایش هزینه‌های شبکه، منجر به افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به واسطه افزایش طول مسیر شده و از جنبه‌های اجتماعی نیز منجر به شلوغی، ترافیک، سر و صدای بیشتر می‌گردد. هدف این مقاله توسعه یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی وسیله نقلیه در شرایط عدم قطعیت است که بتواند هزینه‌های کل را کاهش داده، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کم کرده و مسئولیت‌های اجتماعی را به واسطه ایجاد فرصت‌های شغلی افزایش دهد. برای این منظور روش بهینه‌سازی استوار امکانی جهت فرموله کردن پارامترهای تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل غیر قطعی و روش اپسیلون محدودیت تقویت شده به همراه الگوریتم NSGA-II برای حل مسئله استفاده شده است.

۲. مبانی و چارچوب نظری تحقیق

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با هدف بهینه‌سازی فرآیند توزیع کالا یا جابجایی مسافر نیز به عنوان یکی از مسائل طراحی چندهدفه شبکه حمل‌ونقل مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌های ارائه شده برای توزیع بهینه غذا و مواد آشامیدنی [۵۲]، روزنامه [۲۴]، محموله‌های پستی [۳۴]، جمع‌آوری زباله‌های صنعتی و تجاری [۳۵] و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل هوایی بار [۵۳] از جمله کاربردهای این مسئله برای بهینه‌سازی سیستم توزیع کالا هستند.

در دهه‌های اخیر با توجه به اهمیت و تاثیر قابل توجه این موضوع، مطالعات در زمینه حمل‌ونقل در کنار گسترش زیر ساختها تمایل بیشتری به مدیریت سیستم عرضه حمل‌ونقل و استفاده بهینه از زیرساخت‌ها نشان داده اند. سرمایه گذاری‌های انجام شده در بخش توسعه حمل‌ونقل عمومی و به کار بستن سیستم‌های اطلاع‌رسانی و حمل‌ونقل هوشمند شواهدی برای اثبات این گفته هستند [۵۸]. امروزه کاربرد مدل‌های مسیریابی وسیله نقلیه مورد استقبال شرکت‌های خدمات حمل‌ونقل همگانی و شبه همگانی از جمله مسیریابی سرویس مدارس [۵۶] و انتقال بیماران به بیمارستان‌ها به صورت [۲۲] قرار گرفته‌اند. در ادامه به بررسی برخی از مهمترین تحقیقات در این زمینه پرداخته شده است.

کراینیک و همکاران^۱ یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی را معرفی کردند که در آن کالاها از انبارهای به ماهواره‌های واسطه تحویل و از آنجا به مشتریان تحویل داده می‌شود [۹]. براندو^۲ یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه باز با در نظر گرفتن پنجره زمانی طراحی کرد و از الگوریتم جستجوی محلی تکرارپذیر برای حل آن بهره برد [۶]. پیچکا و همکاران^۳ یک مسئله مسیریابی مکان باز دو سطحی با هدف به حداقل رسانیدن هزینه را مورد بررسی قرار دادند. آنها سه برنامه خطی اعداد صحیح مختلط مبتنی بر جریان و یک الگوریتم ابتکاری ترکیبی برای حل این مسئله پیشنهاد کردند [۵۰]. یان و همکاران^۴ به اتخاذ تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی در مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی پرداختند. آنها مدلی جهت کاهش هزینه‌های مکان‌یابی انبارها و توزیع محصولات از طریق وسایل نقلیه مختلف در

¹ Crainic et al.

² Brandão

³ Pichka et al.

⁴ Yan et al.

سطوح اول و دوم ارائه کردند [۶۳]. لی و لی^۱ یک مسئله مسیریابی مکان‌یابی دو مرحله‌ای چند فازی را با مدل بارگیری و تحویل پیشنهاد کردند که شامل دو عامل فازی رفتار مشتری فازی در فرآیند مصرف و زمان فازی ترافیک در وسیله نقلیه توزیع لجستیک بود [۳۵].

کائو و همکاران^۲ یک مسئله مکان‌یابی- مسیریابی منابع زیست توده دو سطحی را بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن عرضه از پیش تعیین شده منابع زیست توده، یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط ارائه کردند تا بهترین مکان‌ها برای تأسیسات جمع‌آوری زیست توده و مسیرهای وسیله نقلیه مربوطه را تعیین کنند [۷]. فلاح تفتی و همکاران^۳ یک چارچوب مسیریابی مکان دو سطحی برای پول نقد در حمل‌ونقل پیشنهاد و یک شاخص ریسک پویا به منظور کاهش خطر سرقت در حمل‌ونقل نقدی در نظر گرفتند [۱۷]. سیف برقی و اسمعیلی^۴ یک فرمول برنامه‌نویسی دوسطحی برای مسئله مکان‌یابی- موجودی- مسیریابی در یک زنجیره تامین دو سطحی، شامل چندین انبار مرکزی و خرده‌فروشی با محصولات فاسد شدنی تحت تقاضای نامشخص، ارائه کردند [۵۴]. علامت ساز و همکاران^۵ یک مدل چندهدفه برای مسئله مسیریابی- مکان‌یابی سبز با نوآوری در نظر گرفتن رضایت رانندگان و پنجره زمانی با تقاضای نامشخص، ارائه کردند. آنها مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط را توسعه داده و از روش تولید سناریو برای حل آن استفاده کردند [۳]. لیو و جیانگ^۶ یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی با برداشت و تحویل همزمان را مدل‌سازی کردند. در این مسئله ابتدا تحویل بار از دیو به مشتریان با حمل بار از طریق ماهواره‌های میانی مدیریت می‌شود [۳۸]. لی و همکاران^۷ به بررسی مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با ظرفیت دو سطحی با محدودیت‌های گروه‌بندی و تحویل و برداشت همزمان پرداختند. آنها برای ارائه خدمات به مشتریان و کاهش هزینه‌های مدل از الگوریتم شاخه-قیمت و شاخه-برش استفاده کردند [۳۶]. مارکوس و همکاران^۸ مسئله مسیریابی دو سطحی شامل انبارها، ماهواره‌ها و مشتریان را در نظر گرفتند که در آن تحویل محصولات به مشتریان در یک پنجره زمانی از پیش تعریف شده بود [۳۹]. اسلاجیک و همکاران^۹ مسئله مسیریابی وسیله نقلیه دو سطحی با تقاضای تصادفی را مورد بررسی قرار دادند. آنها از یک الگوریتم کارآمد برای بهینه‌سازی مسیر در سطح اول و سطح دوم استفاده کردند [۵۵]. دو و همکاران^{۱۰} به طراحی یک شبکه تحویل مشترک با کارآمد انرژی برای شرکت‌های اکسپرس مختلف برای ارائه خدمات تحویل سریع به مشتریان پرداختند [۱۲]. خداشناس و همکاران^{۱۱} یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه چند انباری یکپارچه با بارگیری و تحویل همزمان را تحت هزینه‌های حمل، تحویل و انتقال غیرقابل پیش‌بینی مدل‌سازی و حل کردند. آنها از الگوریتم SCA برای بهینه‌سازی ابعاد بسته و از الگوریتم‌های NSGA-II و MOALO برای بهینه‌سازی همزمان سه تابع هدف استفاده کردند [۳۲].

زرنندی و همکاران^{۱۲} یک مسئله مسیریابی خودرو چند مسیره دو سطحی را برای زنجیره تامین زیست توده با در نظر گرفتن در دسترس نبودن مسیر و اختلال ظرفیت مورد بررسی قرار دادند. مدل پیشنهادی آنها مقدار ترجیحی هر نوع زیست توده در هر سایت بر اساس قیمت و فاصله پیدا می‌کند. تحلیل حساسیت برای تایید مطالعه موردی پیشنهادی انجام گرفت. نتایج نشان داد که هزینه کل حمل‌ونقل در مسائل تک مسیری به میزان ۶.۷۹ درصد بیشتر از مشکل چند مسیره است و در نظر گرفتن گزینه چند مسیری انعطاف‌پذیری مسئله را بهبود می‌بخشد [۶۵]. تمیز و همکاران^{۱۳} به بررسی استراتژی‌هایی برای کاهش انتشار کربن، کاهش هزینه‌های لجستیک، به حداقل رساندن زمان حمل‌ونقل و افزایش رضایت مشتری پرداختند و بدین منظور یک مدل برای مسئله مکان‌یابی- مسیریابی کم کربن ارائه کردند. برای مقابله با پیچیدگی این مسئله، یک نسخه بهبود یافته از NSGA-II و یک استراتژی خوشه‌بندی ازدحام برای افزایش تنوع در مدل مورد

¹ Li & Li

² Cao et al.

³ FallahTafti et al.

⁴ Seifbarghy & Esmacili

⁵ Alamatsaz et al.

⁶ Liu & Jiang

⁷ Li et al.

⁸ Marques et al.

⁹ Sluijk et al.

¹⁰ Du et al.

¹¹ Khodashenas et al.

¹² Zarandi et al.

¹³ Temiz et al.

استفاده قرار گرفت. نتایج توانایی مدل پیشنهادی را در هماهنگ‌سازی مؤثر اهداف مختلف نشان داد [۶۰]. اسلامی پور^۱ یک رویکرد فراابتکاری جدید برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی سه سطحی چند انباری ارائه کرد. وی با توجه به NP-hard بودن مسئله است از یک روش فراابتکاری برای حل مسائل با اندازه متوسط و بزرگ، با استفاده از یک الگوریتم سه مرحله‌ای پیشنهاد کرد که در مرحله اول، مکان اولیه و مسیریابی ایجاد شده، در مرحله دوم تصمیمات مکان و مسیریابی بهبود بخشیده شده و در مرحله آخر، الگوریتم‌ها به طور موثر به دنبال راه‌حل‌های بهتر می‌باشند [۱۵]. چن و همکاران^۲ مطالعه‌ای با موضوع مکان‌یابی-مسیریابی دو سطحی محصولات فاسد شدنی بر اساس حالت یکپارچه حمل و تحویل در فروشگاه که به بررسی نیازهای متنوع مشتریان می‌پردازد، ارائه کردند. آنها با هدف به حداقل رساندن هزینه کل، یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی دو سطحی ارائه کردند و یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی (ALNS) نیز برای حل مسئله فوق توسعه دادند. نتایج مقایسه الگوریتم پیشنهادی با نتایج نرم افزار CPLEX عملکرد رضایت بخشی را از نظر سرعت و دقت نشان داد [۸]. ذبیحیان بیشه و همکاران^۳ یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی زباله‌های خطرناک پایدار ارائه کردند. مدل پیشنهادی آنها سعی می‌کند کل هزینه‌های سیستم مدیریت پسماند، کل خطرات ناشی از تاسیسات و حمل‌ونقل، همراه با انتشار CO₂ را به حداقل برساند. یک مطالعه موردی واقعی نیز برای نشان دادن کاربرد مدل توسعه‌یافته انجام گرفت. نتایج مقایسه خروجی‌های مدل اصلی با مدل بدون احتساب پایداری نشان داد که تحت فقدان پایداری، هزینه‌های کل، حمل‌ونقل و خطر سایت همراه با انتشار CO₂ افزایش می‌یابد [۶۴]. لین و همکاران^۴ مسئله مکان‌یابی زباله‌های پزشکی با وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) را با هدف کاهش خطر عفونت و در عین حال ارائه راه‌حل‌های لجستیکی مقرون به صرفه و کارآمد مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای مقابله پیچیدگی این مسئله از یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ مبتنی بر تجزیه تکاملی (E-ALNS/D) استفاده کردند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی زمان خدمات، اتخاذ زیرساخت‌های شارژ سریع، و قرار دادن راهبردی تسهیلات دفع موقت در پاسخ به افزایش تقاضای پیش‌بینی نشده به طور قابل توجهی مصرف انرژی، کاهش خطر عفونت و کاهش هزینه شارژ را کاهش می‌دهد و انتخاب مکان‌های دفع محیطی به جای مرکزی، خطرات عفونت را به حداقل می‌رساند [۳۷].

بایگان و همکاران مکان‌یابی، مسیریابی و توزیع کالاهای امدادی در شرایط وقوع زلزله را با هدف بیشینه کردن احتمال عبور موفق از مسیرها، کمینه کردن هزینه‌های امدادی و کمینه‌سازی مازاد و کمبود پرسنل امدادی انتقالی به مناطق آسیب دیده را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک مدل ریاضی با رویکرد محدودیت اپسیلون توسعه دادند و از نرم افزار گمز برای حل آن استفاده کردند. در نظر گرفتن انواع مجروحین و بی‌خانمان‌ها و پرسنل امداد بصورت همزمان و مدل‌سازی ریاضی سه هدفه، چندکالایی، چند وسیله‌ای با ملاحظات عدم قطعیت بصورت سناریویی از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌باشند [۵]. افندی زاده و همکاران در مطالعه‌ای به منظور مکان‌یابی هاب و مسیریابی حامل‌های بار در مقیاس بین‌شهری و در سطح کشور ایران، یک مدل ریاضی ارائه کردند و با توجه به پیچیدگی مسئله از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل استفاده کردند. آنها با ادغام دو الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به حل مسئله پرداختند. نتایج نشان داد که ادغام دو الگوریتم PSO و GA نسبت به حالتی که تنها از یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مسئله استفاده شود پاسخ بهتری ارائه می‌دهد [۱]. زین الدین زاده و همکاران مدلی جدید برای شبکه پایدار توزیع داروی دام و طیور در شرایط غیرقطعی پیشنهاد کردند. توابع هدف در این تحقیق، ابعاد پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را بررسی می‌کند. آنها با توجه به وجود پارامتر غیرقطعی در مدل، از بهینه‌سازی استوار استفاده کردند. مدل سه هدفه توسط محدودیت اپسیلون با استفاده از CPLEX حل و همچنین با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در سه سایز اجرا گردید. دو الگوریتم NSGA-II و PBMOA در چهار معیار، با یکدیگر مقایسه گردیدند. همچنین نتایج مدل در شرایط قطعی و غیرقطعی مقایسه و بهتر بودن مقادیر تابع هدف در شرایط قطعی ثابت گردید [۶۶].

ناصری و غفاری فر از یک مدل چندهدفه چند دوره‌ای برای مسایل مکان‌یابی-مسیریابی وسایل نقلیه با رویکرد فازی انعطاف‌پذیر با هدف حداقل کردن هزینه‌ها، حداکثر کردن رضایت مشتری و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی آرایه کردند. آنها ابتدا با استفاده از روش

¹ Eslamipoor

² Chen et al.

³ Zabihian-Bisheh et al.

⁴ Lin et al.

وزنی مدل را به یک مدل تک هدفه تبدیل شده و سپس با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط حل کردند و از یک مثال عددی جهت نشان دادن عملکرد مدل استفاده کردند که با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد و نتایج حاصل از آن نشان داده شد [۴۶]. فیروزی و همکاران به مکان‌یابی مراکز توزیع فروشگاه آنلاین دیجی‌کالا پرداختند. آنها یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی چندهدفه با در نظر گرفتن اصل پایداری و محدودیت زمانی با روش‌های فراابتکاری توسعه دادند. براساس نتایج مدل پیشنهادی، اثر تقاضا بر سه هدف زمان، هزینه و مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی بررسی گردید و نشان داده شد که افزایش تقاضا می‌تواند خلل‌هایی را ایجاد کند که در نتیجه آن زمان تحویل افزایش یافته و لذا این امر می‌تواند در بلندمدت منجر به نارضایتی مشتری شود. افزایش میزان اشتغال نیز منجر به بهتر شدن مسائل زیست‌محیطی می‌شود اما اثری بر هزینه و زمان ندارد. همچنین هزینه حمل کالا اثری بر مسائل زیست‌محیطی و زمان ندارد اما منجر به افزایش هزینه می‌شود [۲۰]. مشرفی مسئله مکان‌یابی-مسیریابی وسیله نقلیه با ظرفیت سوخت مشخص بر اساس پنجره زمانی سخت و رضایت‌مندی مشتریان را مورد بررسی قرار داد. اهداف اصلی آنها برآورده ساختن نیازهای مشتریان از هریک از انبارها و طراحی یک مسیر بهینه برای وسیله نقلیه بود. بدین منظور ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی و بر اساس عدد صحیح مختلط ارائه گردید و سپس روش فراابتکاری بر اساس الگوریتم ژنتیک مرتب شده غیر مغلوب پیشنهاد گردید. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی مثالی ارائه گردید. نتایج آزمایش‌های محاسباتی، کارایی روش تحقیق موجود و نقاط قوت و ضعف آن را نشان می‌دهد [۴۵].

در جدول ۱ به مقایسه مرور ادبیات و بررسی شکاف تحقیقاتی پرداخته شده است.

جدول ۱. بررسی مهمترین مقالات مسیریابی وسیله نقلیه سلسله مراتبی

منبع	مکان‌یابی	پنجره زمانی	تحویل- برداشت	پارامتر غیر قطعی	روش کنترل غیر قطعی	روش حل
[۶۱]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۱۱]	-	-	*	-	-	ابتکاری
[۴]	-	*	-	-	-	فرا ابتکاری
[۲۸]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۲۶]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری-دقیق
[۱۶]	*	-	-	تقاضا	استوار	دقیق
[۴۷]	*	-	-	تقاضا-حمل و نقل	فازی	دقیق
[۳۹]	-	*	-	-	-	دقیق
[۴۹]	-	-	-	-	-	دقیق
[۲]	-	-	*	-	-	فرا ابتکاری-دقیق
[۵۹]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری-دقیق
[۲۵]	*	-	-	حمل و نقل، ظرفیت	استوار	فرا ابتکاری-دقیق
[۴۱]	*	-	-	تقاضا-حمل و نقل	احتمالی	دقیق
[۶۲]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۴۸]	*	-	-	-	-	دقیق
[۳۲]	*	-	-	تقاضا-حمل و نقل	استوار امکانی	فرا ابتکاری
[۶۵]	-	-	-	-	-	دقیق
[۶۰]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۱۵]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۸]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۶۴]	-	-	-	-	-	دقیق
[۳۷]	-	-	-	-	-	دقیق
[۵]	*	-	-	تقاضا	احتمالی	دقیق

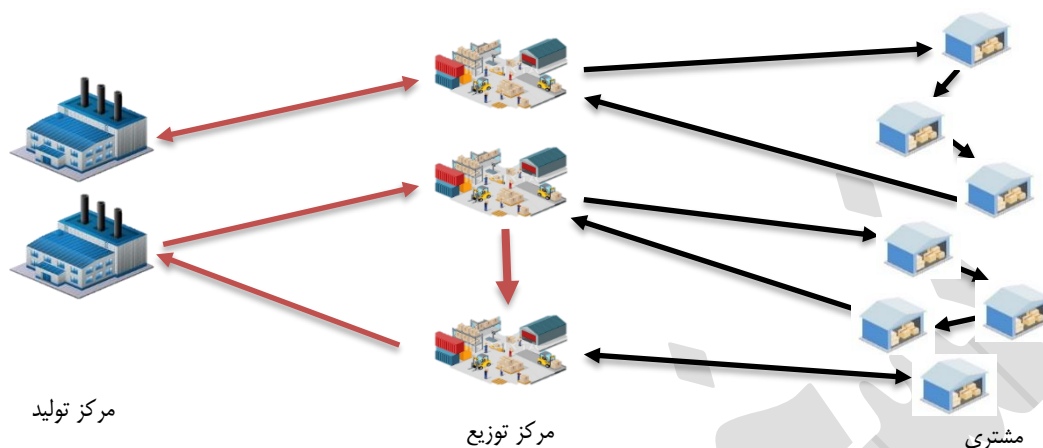
منبع	مکان یابی	پنجره زمانی	تحویل- برداشت	پارامتر غیر قطعی	روش کنترل غیر قطعی	روش حل
[۱]	*	-	-	-	-	فراابتکاری
[۶۶]	*	-	-	تقاضا	فازی	فراابتکاری-دقیق
[۴۶]	*	-	-	-	-	دقیق
[۲۰]	*	-	*	-	-	دقیق
[۴۵]	*	-	-	-	-	فراابتکاری
مقاله حاضر	*	*	-	تقاضا-حمل و نقل	استوار امکانی	فرا ابتکاری-دقیق

با مطالعه ادبیات موضوع و پیشینه تحقیقات می‌توان بیان کرد مدلی که از مسئله مکان‌یابی - مسیریابی دوسطحی که در آن به جنبه‌های پایداری شبکه پرداخته شود و نزدیک به دنیای واقعی و در راستای افزایش سطح رضایت مشتریان باشد، کمتر اشاره شده است (در نظر گرفتن همزمان قابلیت اطمینان در شبکه و پنجره‌های زمانی). از سوی دیگر بحث عدم قطعیت در مدل‌های ریاضی مکان‌یابی - مسیریابی دو سطحی و استفاده از روش‌های فرموله کردن نظیر استوار امکانی به ندرت در نظر گرفته شده است. از این رو می‌توان نوآوری‌های تحقیق را براساس مطالعات انجام شده به شرح زیر بیان کرد:

۱. در نظر گرفتن پایداری در مسئله مکان‌یابی - مسیریابی دو سطحی
۲. در نظر گرفتن حداقل قابلیت اطمینان در طراحی مدل
۳. استفاده از روش استوار امکانی در فرموله کردن مدل غیر قطعی
۴. توسعه مدل مکان‌یابی - مسیریابی دوسطحی با لحاظ کردن پنجره زمانی نرم
۵. طراحی یک راه حل کارا برای الگوریتم فرا ابتکاری به منظور دستیابی به جواب‌های کارای مطلوب

۳. روش‌شناسی پژوهش

مدل مفهومی مکان‌یابی - مسیریابی دوسطحی به صورت شکل ۱ می‌باشد. در این شکل، مشتریان تقاضای خود از محصولات مختلف را در پنجره‌های زمانی مختلف اعلام می‌دارند که مراکز توزیع بایستی نسبت به تامین آنها اقدام نمایند. در این بخش مکان‌یابی مراکز توزیع بسیار حائز اهمیت است و مراکز توزیع احداث / انتخاب شده می‌توانند تقاضای مشتریان را پاسخ دهند. هر مرکز توزیع بهترین مسیر انتقال را انتخاب می‌کند. همچنین در سطح دوم نیز تولید کنندگان، محصولات مورد نیاز هر یک از مراکز توزیع را در قالب یک مسئله مسیریابی برآورده می‌سازند. در این بخش نیز احداث / انتخاب مراکز تولید مهم بوده و تنها از مراکز می‌توان جهت تولید محصولات و ارسال محصولات به مراکز توزیع استفاده کرد که از قبل انتخاب شده باشند.



شکل ۱. مدل پیشنهادی مکان‌یابی- مسیریابی دو سطحی

در این مسئله تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل مشتریان به صورت غیر قطعی و اعداد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است. دلیل این امر نوسانی بودن تقاضای محصولات مختلف در جامعه می‌باشد. همچنین هزینه‌های حمل‌ونقل نیز به دلیل تغییرات در نرخ ارز و دیگر موارد، غیر قابل پیش بینی بوده و جزو پارامترهای غیر قطعی لحاظ می‌شود.

وسایل نقلیه در صورتی که در خارج از پنجره زمانی تعریف شده نسبت به تامین تقاضای مشتریان اقدام نمایند، هزینه جریمه آن به تابع هدف اضافه می‌گردد. از دیگر مواردی که در مدل ریاضی در نظر گرفته شده است بحث حداقل قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد. به واسطه در نظر گرفتن خرابی مراکز تولید و توزیع، امکان ارسال محصولات به مشتریان می‌تواند با مشکل مواجه گردد که در این تحقیق حداقل قابلیت اطمینان قابل قبول برای مدل ریاضی در نظر گرفته شده است.

مدل ریاضی در این بخش با در نظر گرفتن جنبه‌های پایداری بوده که از لحاظ جنبه‌های اقتصادی مدل ریاضی در صدد کمینه‌سازی هزینه کل می‌باشد، از جنبه زیست محیطی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و از جنبه اجتماعی در صدد بیشینه‌سازی مسئولیت‌های اجتماعی (ایجاد فرصت‌های شغلی با احداث مراکز تولید و توزیع بیشتر) می‌باشد.

با در نظر گرفتن موضوع تحقیق و جهت بهینه‌سازی همزمان سه تابع هدف: ۱- کمینه‌سازی هزینه کل ۲- کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، ۳- بیشینه‌سازی مسئولیت‌های اجتماعی، مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. مدل ریاضی در نظر گرفته شده چند محصولی و چند دوره‌ای می‌باشد.
۲. سطوح شبکه شامل مراکز تولید، مراکز توزیع و مشتریان است.
۳. حداقل قابلیت اطمینان قابل قبول به دلیل خرابی مراکز تولید و توزیع در نظر گرفته شده است.
۴. برای اقلامی که در طول یک دوره مصرف می‌شوند هزینه نگهداری تعلق نمی‌گیرد و تنها تنها برای اقلام باقیمانده در انتهای دوره هزینه نگهداری تعلق می‌گیرد.
۵. کلیه تقاضای مشتریان از محصولات مختلف باید تامین گردد و کمبود مجاز نیست.
۶. مقدار تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل به صورت غیر قطعی است.
۷. ظرفیت مراکز تولید و توزیع مشخص می‌باشد.
۸. ظرفیت وسایل نقلیه مشخص می‌باشد.
۹. نوع وسایل نقلیه در سطح اول و دوم با یکدیگر متفاوت است.

۱۰. تقاضای مشتریان بایستی در یک پنجره زمانی از پیش تعریف شده تحویل داده شود و تجاوز از پنجره زمانی مضمول هزینه جریمه می‌باشد.

۱۱. تعداد کل مراکز بالقوه تولید و توزیع مشخص می‌باشد، اما تعداد مراکز اصلی نامعلوم است.

۱۲. هر مشتری می‌تواند حداکثر به یک مرکز توزیع اختصاص یابد.

۱۳. هر مرکز توزیع می‌تواند حداکثر به یک مرکز تولید اختصاص یابد.

۱۴. هر وسیله نقلیه در هر سطح می‌تواند حداکثر به یک تور اختصاص یابد.

با توجه به مفروضات فوق، نمادهای به کار رفته در مدل‌سازی به شرح زیر می‌باشد:

مجموعه‌ها.

C	مجموعه مراکز تولید بالقوه
L	مجموعه مراکز توزیع بالقوه
I	مجموعه مشتریان
P	مجموعه محصولات
V	مجموعه وسایل نقلیه سطح اول
W	مجموعه وسایل نقلیه سطح دوم
T	مجموعه دوره زمانی

پارامترها.

f_j	هزینه ثابت انتخاب مرکز توزیع در مکان $j \in L$
g_c	هزینه ثابت انتخاب مرکز تولید در مکان $c \in C$
\tilde{d}_{ipt}	تقاضای مشتری $i \in I$ از محصول $p \in P$ در دوره $t \in T$
$\tilde{\omega}_v$	هزینه حمل‌ونقل به ازای هر کیلومتر توسط وسیله نقلیه $v \in V$
$\tilde{\phi}_w$	هزینه حمل‌ونقل به ازای هر کیلومتر توسط وسیله نقلیه $w \in W$
ev_v	دی اکسید کربن تولید شده به ازای هر کیلومتر توسط وسیله نقلیه $v \in V$
ew_w	دی اکسید کربن تولید شده به ازای هر کیلومتر توسط وسیله نقلیه $w \in W$
wo_c	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شد به ازای انتخاب مرکز تولید $c \in C$
wo'_l	تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شد به ازای انتخاب مرکز توزیع $l \in L$
λ_c	نرخ خرابی مرکز تولید $c \in C$
λ'_l	نرخ خرابی مرکز توزیع $l \in L$
$m\lambda$	حداقل قابلیت اطمینان شبکه مکان‌یابی - مسیریابی در سطح دوم
$m\lambda'$	حداقل قابلیت اطمینان شبکه مکان‌یابی - مسیریابی در سطح اول
h_{ipt}	هزینه نگهداری محصول $p \in P$ در مرکز توزیع $l \in L$ در دوره زمانی $t \in T$
pc_{cp}	هزینه تولید محصول $p \in P$ در مرکز تولید $c \in C$
dc_{lp}	هزینه توزیع محصول $p \in P$ در مرکز توزیع $l \in L$
c_v	ظرفیت وسیله نقلیه $v \in V$
c'_w	ظرفیت وسیله نقلیه $w \in W$
cd_{lp}	ظرفیت مرکز توزیع $l \in L$ از محصول $p \in P$
cp_{cp}	ظرفیت مرکز تولید $c \in C$ از محصول $p \in P$
$da_{mm'}$	فاصله بین گره $m \in \{I \cup L\}$ و گره $m' \in \{I \cup L\}$

فاصله بین گره $n \in \{L \cup C\}$ و گره $n' \in \{L \cup C\}$	$db_{nn'}$
میانگین سرعت وسیله نقلیه $v \in V$	s_v
پنجره زمانی تحویل محصولات به مشتری $i \in I$	$[a_i, b_i]$
هزینه جریمه تحویل دیر هنگام سفارش به مشتری $i \in I$	π_i
هزینه جریمه تحویل زود هنگام سفارش به مشتری $i \in I$	π'_i
عدد مثبت بسیار بزرگ	M

متغیرهای تصمیم‌گیری

اگر مرکز توزیع در مکان $l \in L$ انتخاب گردد، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	Z_l
اگر مرکز تولید در مکان $c \in C$ انتخاب گردد، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	O_c
اگر وسیله نقلیه $v \in V$ در دوره $t \in T$ مسیر بین گره $m \in \{I \cup L\}$ و گره $m' \in \{I \cup L\}$ را طی کند، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	$Y_{mm'vt}$
اگر وسیله نقلیه $w \in W$ در دوره $t \in T$ مسیر بین گره $n \in \{L \cup C\}$ و گره $n' \in \{L \cup C\}$ را طی کند، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	$X_{nn'wt}$
اگر مشتریان $i \in I$ به مرکز توزیع $l \in L$ با وسیله نقلیه $v \in V$ در دوره $t \in T$ تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	S_{iivt}
اگر مراکز توزیع $l \in L$ به مرکز تولید $c \in C$ با وسیله نقلیه $w \in W$ در دوره $t \in T$ تخصیص یابد، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.	R_{clwt}
مقدار محصول $p \in P$ ذخیره شده در مرکز توزیع $l \in L$ در انتهای دوره $t \in T$	Q_{lpt}
مقدار محصول $p \in P$ توزیع شده توسط مرکز توزیع $l \in L$ در دوره $t \in T$	W_{lpt}
مقدار محصول $p \in P$ تولید شده توسط مرکز تولید $c \in C$ در دوره $t \in T$	N_{cpt}
زمان رسیدن وسیله نقلیه $v \in V$ تخصیص یافته به مرکز توزیع $l \in L$ به مشتری $i \in I$ در دوره $t \in T$	D_{iivt}
مقدار تجاوز (دیرکرد) از پنجره زمانی مشتری $i \in I$ با وسیله نقلیه $v \in V$ در دوره $t \in T$	M_{iivt}
مقدار تجاوز (زودکرد) از پنجره زمانی مشتری $i \in I$ با وسیله نقلیه $v \in V$ در دوره $t \in T$	M'_{iivt}
تعداد یال‌های ایجاد شده توسط وسیله نقلیه $v \in V$ در دوره $t \in T$ هنگام حرکت از مشتری اول به مشتری $m \in I$	E_{mvt}
تعداد یال‌های ایجاد شده توسط وسیله نقلیه $w \in W$ در دوره $t \in T$ هنگام حرکت از مرکز توزیع اول به مرکز توزیع $n \in L$	U_{nwt}
مقدار محصول $p \in P$ توزیع شده از مرکز تولید $c \in C$ به مرکز توزیع $l \in L$ با وسیله نقلیه $w \in W$ در دوره $t \in T$	WR_{clptw}
مقدار محصول بارگیری شده $p \in P$ برای توزیع از مرکز تولید $c \in C$ بین گره $n \in \{L \cup C\}$ با وسیله نقلیه $w \in W$ در دوره $t \in T$	NX_{ncpwt}

پس از ارائه نمادها، مدل ریاضی مکان‌یابی - مسیریابی دوسطحی در شرایط عدم قطعیت به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
 \text{Min Cost} = & \sum_{l \in L} f_l Z_l + \sum_{c \in C} g_c O_c + \sum_{m \in \{I \cup L\}} \sum_{m' \in \{I \cup L\}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \tilde{\omega}_v d_{mm'} Y_{mm'vt} + \quad (1) \\
 & \sum_{n \in \{C \cup L\}} \sum_{n' \in \{C \cup L\}} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} \tilde{\varphi}_w db_{nn'} X_{nn'wt} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_{lpt} Q_{lpt} \\
 & + \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} p c_{cp} N_{cpt} +
 \end{aligned}$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} dc_{lp} W_{lpt} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \pi_i M_{ivt} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \pi'_i M'_{ivt} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Min Emmission} = & \sum_{m \in \{IUL\}} \sum_{m' \in \{IUL\}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} ev_v da_{mm'} Y_{mm'vt} \\ & + \sum_{n \in \{CUL\}} \sum_{n' \in \{CUL\}} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} ew_w db_{nn'} X_{nn'wt} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Max Potential Jobs} = \sum_{l \in L} wo'_l Z_l + \sum_{c \in C} wo_c O_c \quad (3)$$

s. t:

$$\sum_{v \in V} \sum_{m' \in \{IUL\}} Y_{im'vt} = 1, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{m \in \{IUL\}} Y_{mjvt} = \sum_{m' \in \{IUL\}} Y_{jm'vt}, \quad \forall j \in \{IUL\}, v \in V, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} Y_{livt} \leq 1, \quad \forall v \in V, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} S_{livt} \leq 1, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (7)$$

$$-S_{livt} + \sum_{m \in \{IUL\}} (Y_{lmvt} + Y_{mivt}) \leq 1, \quad \forall i \in I, l \in L, v \in V, t \in T \quad (8)$$

$$E_{ivt} - E_{jvt} + |I| Y_{ijvt} \leq |I| - 1, \quad \forall i, j \in I, v \in V, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{n \in \{LUC\}} X_{lnwt} = Z_l, \quad \forall l \in L, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{n \in \{LUC\}} X_{njwt} = \sum_{n' \in \{LUC\}} X_{jn'wt}, \quad \forall j \in \{LUC\}, w \in W, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{c \in C} X_{clwt} \leq 1, \quad \forall w \in W, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{w \in W} R_{clwt} \leq 1, \quad \forall l \in L, t \in T \quad (13)$$

$$-R_{clwt} + \sum_{j \in \{LUC\}} (X_{cjwt} + X_{jlwt}) \leq 1, \quad \forall l \in L, c \in C, w \in W, t \in T \quad (14)$$

$$U_{iwt} - U_{jwt} + |L| X_{ijwt} \leq |L| - 1, \quad \forall i, j \in L, w \in W, t \in T \quad (15)$$

$$W_{lpt} = \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \tilde{d}_{ipt} S_{livt}, \quad \forall l \in L, p \in P, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in \{IUL\}} \sum_{p \in P} \tilde{d}_{ipt} Y_{mivt} \leq c_v, \quad \forall v \in V, t \in T \quad (17)$$

$$W_{lpt} \leq cd_{lp} Z_l, \quad \forall l \in L, p \in P, t \in T \quad (18)$$

$$N_{cpt} = \sum_{l \in L} \sum_{w \in W} (WR_{clpwt} + Q_{lpt} - Q_{lp,t-1}), \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{n \in \{CUL\}} \sum_{p \in P} NX_{ncpwt} \leq c'_w, \quad \forall w \in W, t \in T \quad (20)$$

$$N_{cpt} \leq cp_{cp} O_c, \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T \quad (21)$$

$$D_{livt} \geq \frac{da_{li}}{s_v} - M(1 - Y_{livt}), \quad \forall l \in L, i \in I, v \in V, t \in T \quad (22)$$

$$D_{livt} \geq D_{lkvt} + \frac{da_{ki}}{s_v} - M(2 - Y_{kivt} - S_{lkvt}), \quad \forall l \in L, i, k \in I, v \in V, t \in T \quad (23)$$

$$M_{ivt} = \max\{0, D_{livt} - b_i S_{livt}\}, \quad \forall l \in L, i \in I, v \in V, t \in T \quad (24)$$

$$M'_{ivt} = \max\{0, a_i S_{livt} - D_{livt}\}, \quad \forall l \in L, i \in I, v \in V, t \in T \quad (25)$$

$$\sum_{l \in L} e^{-\lambda'_l} Z_l \geq m \lambda' \quad (26)$$

$$\sum_{c \in C} e^{-\lambda_c} O_c \geq m \lambda \quad (27)$$

$$WR_{clpwt} \leq M \cdot R_{clwt}, \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, w \in W, l \in L \quad (28)$$

$$WR_{clpwt} \leq W_{lpt}, \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, w \in W, l \in L \quad (29)$$

$$WR_{clpwt} \leq W_{lpt} - M \cdot (1 - R_{clwt}), \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T, w \in W, l \in L \quad (30)$$

$$NX_{ncpwt} \leq M \cdot X_{ncwt}, \quad \forall n \in \{C \cup L\}, c \in C, p \in P, t \in T, w \in W \quad (31)$$

$$NX_{ncpwt} \leq N_{cpt}, \quad \forall n \in \{C \cup L\}, c \in C, p \in P, t \in T, w \in W \quad (32)$$

$$NX_{ncpwt} \leq N_{cpt} - M \cdot (1 - X_{ncwt}), \quad \forall n \in \{C \cup L\}, c \in C, p \in P, t \in T, w \in W \quad (33)$$

$$Z_l, O_c, Y_{mm'vt}, X_{nn'wt}, S_{livt}, R_{clwt} \in \{0, 1\} \quad (34)$$

$$Q_{lpt}, W_{lpt}, N_{cpt}, D_{livt}, M_{ivt}, M'_{ivt}, E_{mvt}, U_{nwt}, WR_{clpwt}, NX_{ncpwt} \geq 0 \quad (35)$$

رابطه (۱) تابع هدف اول مسئله را نشان می‌دهد و شامل کمینه‌سازی هزینه‌های کل مکان‌یابی، حمل‌ونقل، نگهداری موجودی، تولید، توزیع و هزینه جریمه دیرکرد و زودکرد در تحویل سفارش است. رابطه (۲) تابع هدف دوم مسئله را نشان می‌دهد و شامل کمینه‌سازی میزان انتشار CO_2 ناشی از تردد وسایل نقلیه است. رابطه (۳) تابع هدف سوم مسئله را نشان می‌دهد و شامل بیشینه‌سازی مسئولیت‌های اجتماعی به سبب ایجاد فرصت‌های شغلی متعدد است. رابطه (۴) نشان می‌دهد که هر مشتری تنها به یک وسیله نقلیه در هر دوره تخصیص خواهد یافت. رابطه (۵) نشان می‌دهد که وسیله نقلیه پس از بازدید هر مشتری آن را باید ترک کند. رابطه (۶) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه حداکثر به یک تور در سطح اول می‌تواند تخصیص پیدا کند. رابطه (۷) نشان می‌دهد که هر مشتری حداکثر به یک مرکز توزیع تخصیص پیدا می‌کند. رابطه (۸) نشان می‌دهد که وسیله نقلیه پس از بازدید مشتریان به همان مرکز توزیع باز می‌گردد. رابطه (۹) معادله مربوط به حذف زیر تور در سطح اول می‌باشد [۳۰]. رابطه (۱۰) تضمین می‌کند تنها مراکز توزیع انتخاب شده می‌تواند به مرکز تولید و وسیله نقلیه تخصیص یابد. رابطه (۱۱) تضمین می‌کند هر وسیله نقلیه پس از بازدید مرکز توزیع آن را ترک کند. رابطه (۱۲) نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه حداکثر به یک تور در سطح دوم تخصیص پیدا می‌کند. رابطه (۱۳) نشان می‌دهد که هر مرکز توزیع حداکثر به یک مرکز تولید می‌تواند تخصیص پیدا کند. رابطه (۱۴) نشان می‌دهد که وسیله نقلیه پس از بازدید مراکز توزیع به همان مرکز تولید باز می‌گردد. رابطه (۱۵) معادله مربوط به حذف زیر تور در سطح دوم می‌باشد [۳۰]. رابطه (۱۶) مقدار کل محصولات توزیع شده توسط هر مرکز توزیع را نشان می‌دهد. رابطه (۱۷) محدودیت اعمال ظرفیت وسیله نقلیه در سطح اول را نشان می‌دهد. رابطه (۱۸) تضمین می‌کند تنها از مراکز توزیع انتخاب شده می‌توان جهت توزیع محصولات استفاده نمود. رابطه (۱۹) مقدار کل تولید محصولات را توسط مرکز تولید با توجه به موجودی مرکز توزیع نشان می‌دهد. رابطه (۲۰) تضمین می‌کند بیش از ظرفیت وسیله نقلیه نمی‌توان از آن استفاده نمود. رابطه (۲۱) مکان‌یابی مراکز تولید را نشان می‌دهد. روابط (۲۲) و (۲۳) زمان رسیدن وسیله نقلیه به هر مشتری را بر اساس میانگین سرعت وسیله نقلیه نشان می‌دهد. روابط (۲۴) و (۲۵) به ترتیب مقدار زمان دیرکرد و زودکرد را با توجه به پنجره زمانی در تحویل سفارش نشان می‌دهد. روابط

(۲۶) و (۲۷) حداقل قابلیت اطمینان برقراری شبکه را برای سطح اولی و سطح دوم تضمین می‌کند [۲۲]. روابط (۲۸) تا (۳۳) مرتبط با خطی‌سازی مدل می‌باشد. روابط (۳۴) و (۳۵) نوع متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

کنترل پارامترهای غیر قطعی مدل

با توجه به ذات پویا و نوسانی پارامترهای هزینه‌های حمل‌ونقل و مقدار تقاضای که تعیین آن‌ها مافوق برنامه‌ریزی است و همچنین در دسترس نبودن و حتی غیرقابل حصول بودن داده‌های تاریخی موردنیاز در مرحله طراحی، این پارامترها عمدتاً با تکیه بر نظرات و تجارب ذهنی کارشناسان تخمین زده می‌شود؛ بنابراین، پارامترهای مبهم فوق به‌عنوان داده غیرقطعی در قالب اعداد فازی دوزنقه‌ای فرموله شده است. لذا، برای مقابله با محدودیت‌های غیرقطعی (محتمل) که داده‌های غیرقطعی در طرف چپ یا راست تساوی خوددارند، معمولاً از روش برنامه‌ریزی محدود غیرقطعی استفاده می‌شود. در صورت استفاده از این روش، به‌منظور کنترل سطح اطمینان برقراری این محدودیت‌های غیرقطعی، مفهوم تصمیم‌گیری می‌تواند سطح اطمینان حداقل را به‌عنوان یک حاشیه امن مناسب برای برقراری هر یک از این محدودیت‌ها به دست آورد. برای انجام این کار، از روش استاندارد فازی بدبینانه استفاده شده است. رابطه (۳۶) مدل اختصار مسئله را نشان می‌دهد:

[۵۱]:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= fY + \bar{c}X \\ \text{s. t. :} \\ aX &= \bar{d} \\ bX &\leq sY \\ Y &\in \{0,1\}, \quad X \geq 0 \end{aligned} \quad (36)$$

که در آن بردارهای f, \bar{c}, \bar{d} و s به ترتیب نشان‌دهنده هزینه ثابت احداث، هزینه متغیر (حمل‌ونقل)، مقدار تقاضا و عرضه می‌باشد. همچنین a و b ماتریس ضرایب بوده و در نهایت X و Y به ترتیب متغیرهای پیوسته و صفر و یک می‌باشند. حال فرض می‌شود که بردارهای \bar{d}, \bar{c} در مدل فوق به‌صورت پارامترهای غیرقطعی ارائه شده است. با توجه به شکل عمومی برنامه‌ریزی محدود غیرقطعی، مقدار انتظاری تابع هدف و فازی بدبینانه به ترتیب برای مقابله با تابع هدف و محدودیت غیرقطعی اخذ گردد. حال با توجه به فرم اختصاری، مدل پایه‌ای فازی بدبینانه ($BPCCP^1$) به‌صورت رابطه (۳۷) است:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= E[Z] = fY + E[\bar{c}]X \\ \text{s. t. :} \\ NEC\{aX = \bar{d}\} &\geq \alpha \\ bX &\leq sY \\ Y &\in \{0,1\}, \quad X \geq 0 \end{aligned} \quad (37)$$

که در آن α حداقل درجه اطمینان برقراری محدودیت غیرقطعی را با رویکرد تصمیم‌گیری (بدبینانه) کنترل می‌کنند. با توجه به توزیع احتمال دوزنقه‌ای برای پارامترهای مبهم، شکل کلی رابطه (۳۸) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= fY + \left(\frac{C^1 + C^2 + C^3 + C^4}{4} \right) X \\ \text{s. t. :} \\ aX &= (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4 \end{aligned} \quad (38)$$

¹ Basic possibilistic chance constrained programming

$$bX \leq sY$$

$$Y \in \{0,1\}, \quad X \geq 0$$

برنامه‌ریزی استوار امکانی. در مدل‌های غیرقطعی، حداقل سطح اطمینان برای برقراری محدودیت غیرقطعی باید با لحاظ ترجیحات تصمیم‌گیری تعیین شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل ارائه‌شده تابع هدف نسبت به انحراف از مقدار مورد انتظار خود حساس نیست که بدین معنی است که دستیابی به راه‌حل‌های استوار در مدل پایه تضمین نمی‌شود. در چنین مواردی، ممکن است ریسک بالایی در بسیاری از موارد واقعی به تصمیم‌گیری تحمیل شود، به‌خصوص در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک که استوارسازی راه‌حل تا حد زیادی حیاتی است. از این‌رو، برای مقابله با این وضعیت ناکارآمد، رویکرد برنامه‌ریزی غیرقطعی استوار امکانی برای مسئله، استفاده می‌شود. این رویکرد از مزایای قابل توجه هر دو برنامه‌ریزی استوار و برنامه‌ریزی فازی بهره می‌برد که به‌وضوح آن را از دیگر رویکردهای برنامه‌ریزی عدم قطعیت متفاوت می‌سازد. در این مقاله از سه روش مختلف استوار امکانی استفاده شده است که در ادامه به فرموله کردن آنها پرداخته شده است:

برنامه‌ریزی استوار امکانی^۱ (مدل RPP-I). برنامه‌ریزی استوار امکانی مدل RPP-I بر اساس مدل BPCCP، تشریح داده شده است [۵۱]، [۴۴]:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= E[Z] + \xi(Z_{(\max)} - Z_{(\min)}) + \eta[d^4 - (1 - \alpha)d^3 - \alpha d^4] \\ \text{s. t. :} \\ \alpha X &= (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4 \\ bX &\leq sY \\ Y &\in \{0,1\}, \quad X \geq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

که در آن M یک عدد نامنفی بسیار بزرگ و $Z_{(\max)}$ و $Z_{(\min)}$ و $E[Z]$ می‌تواند به شرح زیر بیان شود:

$$\begin{aligned} Z_{(\max)} &= fY + c^4 X \\ Z_{(\min)} &= fY + c^1 X \\ E[Z] &= fY + \left[\left(\frac{c^1 + c^2 + c^3 + c^4}{4} \right) \right] X \end{aligned} \quad (40)$$

در تابع هدف اول رابطه (۳۹) عبارت اول به مقدار مورد انتظار تابع هدف اول با استفاده از مقادیر متوسط پارامترهای غیرقطعی مدل اشاره دارد. عبارت دوم به هزینه جریمه برای انحراف بیش از مقدار مورد انتظار تابع هدف اول (استواری بهینگی) اشاره می‌کند. جمله سوم نیز هزینه کل جریمه انحراف از تقاضا (پارامتر غیرقطعی) را نشان می‌دهد. از این‌رو، پارامتر ξ ضریب وزنی تابع هدف، η هزینه جریمه عدم برآورد تقاضا می‌باشند. پارامتر α به‌عنوان حداقل درجه اطمینان در مقدار سطوح فازی اعداد را نشان می‌دهد که بایستی عددی مابین $0.5 \leq \alpha \leq 1$ باشد.

برنامه‌ریزی استوار امکانی (مدل RPP-II). یکی دیگر از انواع برنامه‌ریزی استوار امکانی که در آن تصمیم‌گیرنده به انحرافات بیش از حد و کمتر از حد مقدار بهینه مورد انتظار حساس نیست. برای مثال ممکن است به انحرافات هزینه‌های کل تحت مقدار بهینه مورد انتظار اهمیتی ندهد، بلکه مطلوب است که تصمیم‌گیرنده در مقایسه با بهینه مورد انتظار، به هزینه کل کمتری دست یابد. در این حالت می‌توان مدل RPP-II را معرفی کرد. در ادامه برنامه‌ریزی استوار امکانی مدل RPP-II بر اساس مدل BPCCP، تشریح داده شده است [۵۱]، [۴۴]:

¹ Robust possibilistic programming

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z &= E[Z] + \xi(Z_{(\max)} - E[Z]) + \eta[d^4 - (1 - \alpha)d^3 - \alpha d^4] \\
 \text{s. t. :} \\
 aX &= (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4 \\
 bX &\leq sY \\
 Y &\in \{0,1\}, \quad X \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{41}$$

برنامه‌ریزی استوار امکانی (مدل RPP-III). یکی دیگر از انواع برنامه‌ریزی استوار امکانی که در آن تصمیم گیرنده تنها به انحرافات بیش از حد از مقدار بهینه اهمیت می‌دهد، دیگر نیازی به محاسبه مقدار مورد انتظار و حداقل مقدار مورد انتظار نیست. در ادامه برنامه‌ریزی استوار امکانی مدل RPP-III بر اساس مدل BPCCP، تشریح داده شده است [51، 44]:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z &= E[Z] + \xi Z_{(\max)} + \eta[d^4 - (1 - \alpha)d^3 - \alpha d^4] \\
 \text{s. t. :} \\
 aX &= (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4 \\
 bX &\leq sY \\
 Y &\in \{0,1\}, \quad X \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

در این مقاله از دو روش اپسیلون محدودیت تقویت شده و الگوریتم NSGA-II برای حل مدل سه هدفه استفاده شده است. در این بخش به معرفی روش‌های حل و راه حل اولیه طراحی شده پرداخته شده است.

روش اپسیلون محدودیت تقویت شده. روش محدودیت اپسیلون تقویت شده به منظور غلبه بر ضعف‌های موجود در روش محدودیت اپسیلون، برای محاسبه مقادیر جدول نتایج نهایی، برای هر تابع هدف از روش لکسیکوگراف استفاده کرده و محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی را با قرار دادن متغیرهای کمکی به تساوی تبدیل می‌کند. در بهینه‌سازی با روش لکسیکوگراف توابع هدف توسط تصمیم‌گیرنده بر اساس اهمیت، رتبه‌بندی می‌شود. در این روش ابتدا تابع هدف با اولویت بالا به صورت تک هدفه بهینه می‌شود. شکل ۲ شبه کد اپسیلون محدودیت تقویت شده را نشان می‌دهد [40]:

<p><i>Initial Parameters w, p</i> <i>For I = 1: number of objective function, do</i> <i>Calculate the best objective value (f_i[*])</i> <i>Calculate the worst objective value (f_i⁻)</i> <i>End</i> <i>Evaluation the f₁ + δ ($\frac{s_2}{r_2} + \frac{s_3}{r_3}$) f_i - s_i = ε_i</i> <i>Return the efficient solution</i></p>
--

شکل ۲. شبه کد اپسیلون محدودیت تقویت شده

در رابطه فوق $r_i, i = 2, 3$ دامنه توابع هدف، $\epsilon_i, i = 2, 3$ جواب‌های به دست آمده از هر تکرار و δ یک عدد کوچک مثبت است. از طریق این روش می‌توان جواب‌های کارای مختلفی را به دست آورد.

الگوریتم NSGA-II. الگوریتم NSGA-II یکی از سریع‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که نسبت به سایر روش‌ها از پیچیدگی عملیاتی کمتری برخوردار می‌باشد و با استفاده از اصل عدم غلبه کردن و محاسبه فاصله ازدحام نقاط بهینه پارتو را به دست می‌آورد. در NSGA-II، به طور هم‌زمان حفظ نخبه‌گرایی و پراکندگی مدنظر قرار گرفته است. انتخاب جمعیت جدید در هر گام این روش بر اصل غلبگی استوار

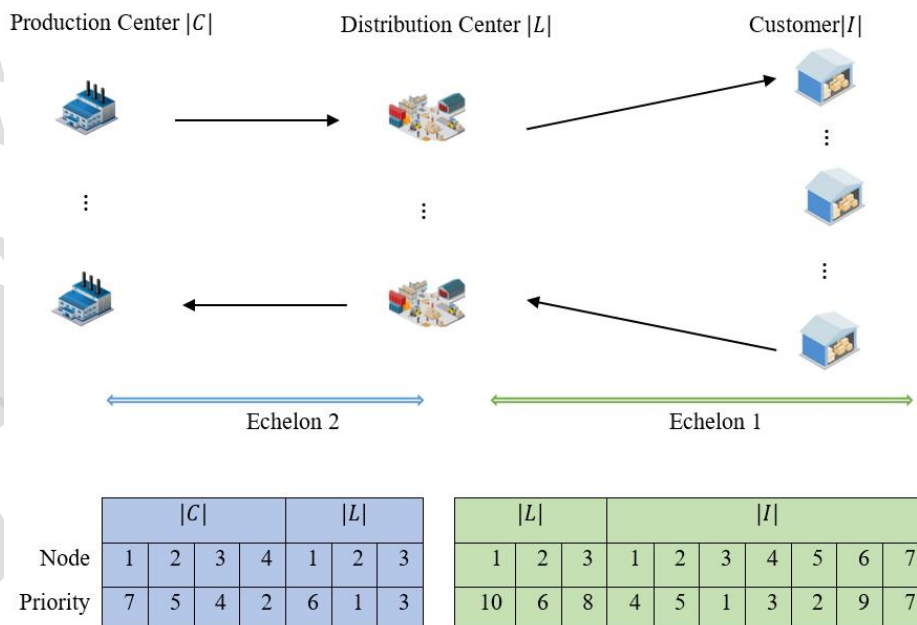
بوده و با استفاده از نخبه‌گرایی و رتبه‌بندی جمعیت در هر گام حل، بهترین جواب‌های نا مغلوب را برگزیده و به گام بعد می‌رود. شبه کد الگوریتم NSGA-II در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۰].

```

Tuning the NSGA-II initial parameters (Max it, Pc, Pm, N pop)
Initialize the population
Generate random population;
Evaluate Objectives Values
Assign Rank (level) based on Pareto - sort;
Generate Child Population based mutation and crossover operator
For i = 1 to Max it do
    For each Parent and Child in Population do
        Assign Rank (level) based on Pareto - sort;
        Generate sets of nondominated solutions;
        Determine Crowding distance;
        Loop (inside) by adding solutions to next generation starting from the first
        front until N' individuals;
    End
    Select points on the lower front with high crowding distance;
    Create next generation based of mutation and crossover operator
End
    
```

شکل ۳. شبه کد NSGA-II

طراحی راه حل اولیه. مدل طراحی شده در این مقاله شامل دو سطح می‌باشد که در هر دو سطح به مکان‌یابی و مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت دار پرداخته می‌شود. در ادبیات موضوع NP-Hard بودن مسائل مکان‌یابی-مسیریابی اثبات شده است. برای ارائه نمایش اولیه مسئله از یک مسئله فرضی مطابق با شکل ۴ برای یک محصول و یک دوره زمانی استفاده شده است.



شکل ۴. نمایش راه حل اولیه

راه حل اولیه مسئله یک جایگشت از اعداد طبیعی به ابعاد $(|I| + 2|L| + |C|) * |T|$ می‌باشد. برای رمزگشایی راه حل اولیه هر بخش به ترتیب بایستی گام‌های زیر را طی کرد:

سطح اول. در سطح ۱، هدف اصلی مکان‌یابی مراکز توزیع و همچنین مسیریابی وسیله نقلیه جهت توزیع محصولات است. برای رمزگشایی راه حل اولیه این بخش گام‌های زیر انجام می‌پذیرد:

۱. بالاترین اولویت از بین نقاط تقاضا انتخاب می‌گردد.
۲. نقطه تقاضای انتخاب شده به بالاترین اولویت از بین مراکز توزیع تخصیص می‌یابد.
۳. تا زمانی که مجموع مقدار تقاضای نقاط انتخاب شده کمتر از ظرفیت وسیله نقلیه و ظرفیت مرکز توزیع انتخاب شده باشد، بالاترین اولویت بعدی از بین نقاط تقاضا به مرکز توزیع، تخصیص می‌یابد.
۴. مقدار ظرفیت وسیله نقلیه و ظرفیت مراکز توزیع به روز رسانی می‌شود.
۵. اگر ظرفیت وسیله نقلیه کمتر از مجموع تقاضای نقاط انتخاب شده باشد، وسیله نقلیه دیگر به آن مسیر تخصیص می‌یابد.
۶. اگر ظرفیت مرکز توزیع کمتر از مجموع تقاضای نقاط انتخاب شده باشد، مرکز توزیع با بالاترین اولویت بعدی انتخاب می‌گردد.
۷. گام‌های ۲ تا ۶ تا زمانی که اولویت نقاط تقاضا به ۰ کاهش نیافته باشد، تکرار می‌شود.
۸. مراکز توزیع انتخاب شده به عنوان مراکز توزیع اصلی شناخته می‌شود.
۹. هزینه، مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای و فرصت‌های شغلی ایجاد شده در سطح اول محاسبه می‌گردد.

سطح دوم. در سطح ۲، هدف اصلی مکان‌یابی مراکز تولید و همچنین مسیریابی وسیله نقلیه جهت توزیع محصولات است. برای رمزگشایی راه حل اولیه این بخش گام‌های زیر انجام می‌پذیرد:

۱. مجموع توزیع محصولات برای هر مرکز توزیع به عنوان تقاضای آن مرکز محاسبه می‌گردد.
۲. اولویت مراکز توزیعی که انتخاب نشده باشد به صفر کاهش می‌یابد.
۳. بالاترین اولویت از بین مراکز توزیع انتخاب می‌گردد.
۴. مرکز توزیع انتخاب شده به بالاترین اولویت از بین مراکز تولید تخصیص می‌یابد.
۵. تا زمانی که مجموع مقدار تقاضای مراکز توزیع انتخاب شده کمتر از ظرفیت وسیله نقلیه و ظرفیت مرکز تولید انتخاب شده باشد، بالاترین اولویت بعدی از بین مراکز توزیع به مرکز تولید، تخصیص می‌یابد.
۶. مقدار ظرفیت وسیله نقلیه و ظرفیت مراکز تولید به روز رسانی می‌شود.
۷. اگر ظرفیت وسیله نقلیه کمتر از مجموع تقاضای مراکز توزیع انتخاب شده باشد، وسیله نقلیه دیگر به آن مسیر تخصیص می‌یابد.
۸. اگر ظرفیت مرکز تولید کمتر از مجموع تقاضای مراکز توزیع انتخاب شده باشد، مرکز تولید با بالاترین اولویت بعدی انتخاب می‌گردد.
۹. گام‌های ۴ تا ۵ تا زمانی که اولویت مراکز توزیع به ۰ کاهش نیافته باشد، تکرار می‌شود.
۱۰. مراکز تولید انتخاب شده به عنوان مراکز تولید اصلی شناخته می‌شود.
۱۱. هزینه، مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای و فرصت‌های شغلی ایجاد شده در سطح دوم محاسبه می‌گردد.

در هر مرحله از رمزگشایی، در صورتی که محدودیت خاصی نقض شود (فضای ناموجه جستجو گردد)، از تابع جریمه استفاده می‌شود. به این صورت که یک هزینه بسیار بالا به تابع هدف اول افزوده می‌شود و الگوریتم در تکرارهای متوالی در تلاش است تا از این جریمه دوری کند.

نکته قابل توجه در این راه حل اولیه آن است که با توجه به ماهیت پیوسته الگوریتم‌های فرا ابتکاری، راه حل اولیه نیز باید به صورت پیوسته و تصادفی بر اساس عدد تصادفی باشد. اما راه حل اولیه طراحی شده در این مقاله بر اساس جایگشتی از اعداد طبیعی در هر سطح است. از این رو بر اساس مکانیسم زیر، داده‌های تصادفی پیوسته به داده‌های گسسته تبدیل می‌گردد.

سطح ۲		سطح ۱												
عدد تصادفی	۰.۰۹	۰.۰۶	۰.۱۲	۰.۳۱	۰.۱۷	۰.۵۶	۰.۵۱	۰.۲۱	۰.۳۱	۰.۰۹	۰.۳۶	۰.۱۰	۰.۰۹	۰.۰۹
اولویت	۱	۷	۲	۴	۶	۵	۳	۹	۲	۶	۷	۵	۸	۱

شکل ۵. مکانیسم تبدیل اعداد پیوسته به اعداد گسسته در راه حل تعریف شده

در شکل ۵ برای هر سطح کوچکترین عدد تصادفی در فضای پیوسته به عدد ۱ در فضای گسسته تبدیل میشود. سپس کوچکترین عدد بعدی تصادفی به عدد ۲ و ... تبدیل میشود. این فرایند تا زمانی که کلیه اعداد تصادفی پیوسته به گسسته تبدیل نشده باشد، ادامه پیدا می‌کند. در این فرایند، هر عدد گسسته برای هر سطح تنها یک بار تخصیص می‌یابد. از جمله مهمترین عملگرهای به کار رفته در الگوریتم NSGA-II، عملگر ترکیب و جهش می‌باشد. در عملگر جهش تک نقطه ای، بر اساس پارامتر Pm که مقدار آن در تنظیم پارامتر بدست می‌آید؛ یک ژن انتخاب و به جای آن یک عدد تصادفی جدید جایگزین می‌گردد. در این صورت، راه حل جدید ایجاد میشود. شکل ۶ مکانیسم انجام عملگر جهش تک نقطه‌ای را برای یک کروموزوم نشان می‌دهد.

	والد						فرزند					
عدد تصادفی	۰.۰۵	۰.۳۴	۰.۸۲	۰.۰۸	۰.۴۲	۰.۲۶	۰.۰۵	۰.۳۴	۰.۸۲	۰.۴۷	۰.۴۲	۰.۲۶
اولویت	۱	۴	۶	۲	۵	۳	۱	۳	۶	۵	۴	۲

شکل ۶. مکانیسم عملگر جهش تک نقطه ای

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌گردد که مقدار ژن چهارم از عدد ۰.۰۸ به عدد ۰.۴۷ جهش پیدا کرده است و این مسئله منجر به ایجاد راه حل جدید شده است.

در عملگر ترکیب دو نقطه‌ای بر اساس پارامتر PC که مقدار آن در تنظیم پارامتر مشخص شده است، دو نقطه از کروموزوم مشخص و مجموعه ژن‌های بین دو نقطه در والد ۱ و ۲ جابجا می‌شود. این عمل منجر به ایجاد دو فرزند ۱ و ۲ جدید در مسئله می‌گردد. شکل ۷ نحوه انجام عملگر ترکیب دو نقطه‌ای را برای یک کروموزوم فرضی نشان می‌دهد.

	والد ۱						والد ۲					
عدد تصادفی	۰.۰۵	۰.۳۴	۰.۸۲	۰.۰۸	۰.۴۲	۰.۲۶	۰.۳۷	۰.۲۲	۰.۱۳	۰.۷۶	۰.۱۵	۰.۰۹
اولویت	۱	۴	۶	۲	۵	۳	۵	۴	۲	۶	۳	۱

	فرزند ۱						فرزند ۲					
عدد تصادفی	۰.۰۵	۰.۲۲	۰.۱۳	۰.۷۶	۰.۴۲	۰.۲۶	۰.۳۷	۰.۳۴	۰.۸۲	۰.۰۸	۰.۱۵	۰.۰۹
اولویت	۱	۳	۲	۶	۵	۴	۵	۴	۶	۱	۳	۲

شکل ۷. مکانیسم عملگر ترکیب تک نقطه ای

شاخص‌های مقایسه جواب کارا

هر یک از روش‌های ذکر شده در حل مسئله منجر به تولید راه‌حل‌های کارایی مختلفی می‌گردد. در جدول ۲ به معرفی شاخص‌های پر استفاده در ادبیات موضوع پرداخته شده است.

جدول ۲. شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری

معادله	تعریف	اختصار
	تعداد جواب‌های نا مغلوب در مجموعه پارتو به دست آمده برای هر مسئله را نشان می‌دهد و هر مقدار تعداد این نقاط بیشتر باشد بدین معنی است که الگوریتم کارایی بیشتری دارد [۱۹].	(NPF ¹)
$MSI = \sqrt{\sum_{k=1}^K (\max_{k=1} f_k^{max} - f_k^{min})^2}$	این معیار نشان می‌دهد که چه میزان از جواب‌های یک مجموعه پارتو در فضای جواب توزیع شده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود. بزرگ‌تر بودن مقدار این معیار، نشان‌دهنده تنوع مناسب جواب‌های مجموعه پارتو است [۲۹].	(MSI ²)
$SMI = \frac{\sum_{i=1}^{K-1} \bar{d} - d_i }{(K-1)\bar{d}}$ $d_i = \min_{j=1, \dots, n, j \neq i} \left(\sum_{k=1}^K f_k^i - f_k^j \right), \quad \forall i = 1, \dots, n$	نشان‌دهنده میزان قرار گرفتن جواب‌ها به‌طور یکنواخت در کنار هم بوده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود. در این رابطه مقدار d_i را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد. الگوریتمی که میزان این معیار کمتر باشد، مطلوب‌تر خواهد بود [۲۱].	(SMI ³)
$MID = \frac{\sum_{k=1}^K \sqrt{(f_k^1 - f_k^{min})^2 + \dots + (f_k^i - f_k^{min})^2}}{K}$	این معیار که برای اندازه‌گیری میزان نزدیکی به سطح بهینه پارتو واقعی، به کار می‌رود که از رابطه زیر محاسبه می‌شود. الگوریتمی که کمترین مقدار این شاخص را داشته باشد، کارایی بالاتری دارد. در این رابطه n ، تعداد جواب‌ها در مجموعه بهینه پارتو است [۲۱].	(MID ⁴)
	الگوریتمی که زمان محاسبات کمتری داشته باشد، مطلوب‌تر خواهد بود.	(CPT ⁵)

تنظیم پارامترها در الگوریتم NSGA-II. روش تاگوچی یکی از روش‌های استفاده شده در ادبیات موضوع جهت تنظیم پارامترهای اولیه الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد. این امر جهت افزایش کارایی الگوریتم‌ها در جستجوی فضای حل مسئله در دستیابی به بهترین راه حل‌های کارا است. در این روش برای هر پارامتر اولیه، سه سطح پیشنهادی توسط تصمیم گیرنده در نظر گرفته می‌شود. سپس آزمایشات تاگوچی با تغییر در ترکیب پارامترها، انجام یافته و مقدار حداقل درصد اختلاف نسبی بر اساس روابط زیر بدست می‌آید. بهترین سطح بدست آمده برای هر الگوریتم و همچنین مقدار پارامتر بهینه تنظیم شده در شکل ۸ نشان داده شده است.

$$RPD_i = \frac{Y_i - Y^*}{Y^*} \quad | \quad Y_i = \frac{NPF_i + MSI_i - SMI_i - MID_i - CPT_i}{5} \quad (43)$$

Y_i میانگین شاخص‌های بدست آمده از اجرای هر آزمایش و Y^* بهترین مقدار آزمایش در بین تمامی آزمایشات است.

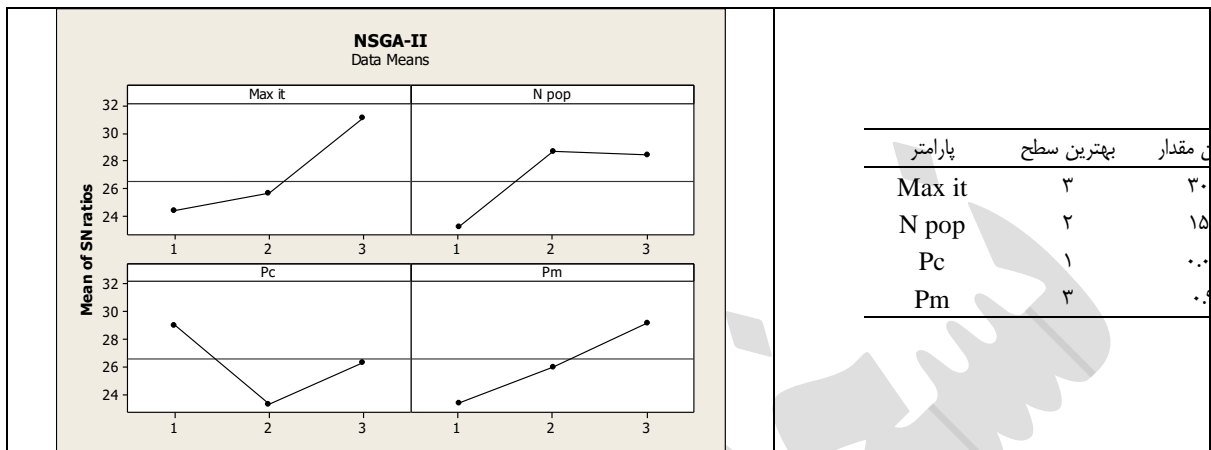
¹ Number of Pareto Front

² Maximum Spread Index

³ Space Metric Index

⁴ Minimum Ideal Distance

⁵ CPU-Time



شکل ۱. نمودار متوسط نسبت SN در تنظیم پارامتر NSGA-II

پارامتر	بهترین سطح	مقدار
Max it	۳	۳۰
N pop	۲	۱۵
Pc	۱	۰.۰
Pm	۳	۰.۰

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش به تجزیه و تحلیل مدل ریاضی تحت مثال عددی تصادفی پرداخته شده است. برای حل مدل سه هدفه تحت شرایط عدم قطعیت، از روش اپسیون محدودیت تقویت شده و NSGA-II استفاده شده است. در این فصل ابتدا به تولید و شبیه‌سازی داده‌های فازی برای پارامترهای غیر قطعی پرداخته شده و در ادامه تجزیه و تحلیل یک مثال عددی در سائز کوچک انجام شده است.

تولید و شبیه‌سازی داده‌های فازی. در مدل ارائه شده، تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل به صورت غیر قطعی و تابع فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است. قبل از تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی، از روش پیشنهادی ارائه شده توسط محتشمی^۱ برای تولید و شبیه‌سازی داده‌های فازی استفاده شده است [۴۲]. روش پیشنهادی این امکان را فراهم می‌کند تا هر نوع از داده‌های فازی با هر نوع تابع عضویت را بتوان در نظر گرفت. برای اعداد فازی تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل، حد پایین و بالا به ترتیب برابر $\tilde{\varphi}_w = [2, 12]$ و $\tilde{\omega}_v = [1, 8]$ و $\tilde{d}_{ipt} = [25, 5]$ می‌باشد. با در نظر گرفتن ۱۰ طبقه، فواصل پارامترهای غیر قطعی و درجه عضویت نقاط حدی مطابق جدول ۳ بدست آمده است.

جدول ۳. طبقه بندی فواصل و درجه عضویت نقاط حدی پارامترهای غیر قطعی مسئله

کلاس	طبقه بندی فواصل			درجه عضویت نقاط حدی		
	\tilde{d}_{ipt}	$\tilde{\omega}_v$	$\tilde{\varphi}_w$	\tilde{d}_{ipt}	$\tilde{\omega}_v$	$\tilde{\varphi}_w$
۱	[۵, ۷]	[۱.۰, ۱.۷]	[۲, ۳]	[۰.۰۰, ۰.۲۷]	[۰.۰۰, ۰.۳۵]	[۰.۰۰, ۰.۲۹]
۲	[۷, ۹]	[۱.۷, ۲.۴]	[۳, ۴]	[۰.۲۷, ۰.۵۳]	[۰.۳۵, ۰.۷۰]	[۰.۲۹, ۰.۵۷]
۳	[۹, ۱۱]	[۲.۴, ۳.۱]	[۴, ۵]	[۰.۵۳, ۰.۸۰]	[۰.۷۰, ۱.۰۰]	[۰.۵۷, ۰.۸۶]
۴	[۱۱, ۱۳]	[۳.۱, ۳.۸]	[۵, ۶]	[۰.۸۰, ۱.۰۰]	[۱.۰۰, ۱.۰۰]	[۰.۸۶, ۱.۰۰]
۵	[۱۳, ۱۵]	[۳.۸, ۴.۵]	[۶, ۷]	[۱.۰۰, ۱.۰۰]	[۱.۰۰, ۱.۰۰]	[۱.۰۰, ۱.۰۰]
۶	[۱۵, ۱۷]	[۴.۵, ۵.۲]	[۷, ۸]	[۱.۰۰, ۱.۰۰]	[۱.۰۰, ۰.۹۳]	[۱.۰۰, ۱.۰۰]
۷	[۱۷, ۱۹]	[۵.۲, ۵.۹]	[۸, ۹]	[۱.۰۰, ۰.۸۰]	[۰.۹۳, ۰.۷۰]	[۱.۰۰, ۰.۸۶]
۸	[۱۹, ۲۱]	[۵.۹, ۶.۶]	[۹, ۱۰]	[۰.۸۰, ۰.۵۳]	[۰.۷۰, ۰.۴۷]	[۰.۸۶, ۰.۵۷]
۹	[۲۱, ۲۳]	[۶.۶, ۷.۳]	[۱۰, ۱۱]	[۰.۵۳, ۰.۲۷]	[۰.۴۷, ۰.۲۳]	[۰.۵۷, ۰.۲۹]
۱۰	[۲۳, ۲۵]	[۷.۳, ۸.۰]	[۱۱, ۱۲]	[۰.۲۷, ۰.۰۰]	[۰.۲۳, ۰.۰۰]	[۰.۲۹, ۰.۰۰]

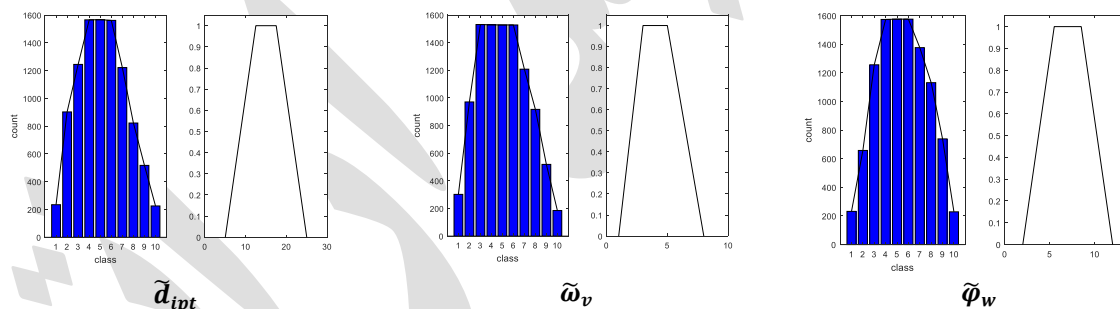
^۱ Mohtashami

با استفاده از روابط شبیه‌سازی داده‌های فازی، مقادیر نرمال شده و تجمعی نقاط حدی پارامترهای غیر قطعی مسئله نیز در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. مقادیر نرمال شده و تجمعی نقاط حدی پارامترهای غیر قطعی مسئله

$\tilde{\varphi}_w$			$\tilde{\omega}_v$			\tilde{a}_{ipt}			کلاس
δ_i	ψ_i	η_i	δ_i	ψ_i	η_i	δ_i	ψ_i	η_i	
۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۱۴	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۱۷	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۱۳	۱
۰.۰۹	۰.۰۷	۰.۴۳	۰.۱۱	۰.۰۸	۰.۵۲	۰.۰۹	۰.۰۶	۰.۴۰	۲
۰.۲۰	۰.۱۱	۰.۷۱	۰.۲۴	۰.۱۳	۰.۸۵	۰.۱۹	۰.۱۱	۰.۶۷	۳
۰.۳۴	۰.۱۴	۰.۹۳	۰.۴۰	۰.۱۶	۱.۰۰	۰.۳۴	۰.۱۵	۰.۹۰	۴
۰.۵۰	۰.۱۶	۱.۰۰	۰.۵۶	۰.۱۶	۱.۰۰	۰.۵۰	۰.۱۶	۱.۰۰	۵
۰.۶۶	۰.۱۶	۱.۰۰	۰.۷۱	۰.۱۵	۰.۹۷	۰.۶۶	۰.۱۶	۱.۰۰	۶
۰.۸۰	۰.۱۴	۰.۹۳	۰.۸۴	۰.۱۳	۰.۸۲	۰.۸۱	۰.۱۵	۰.۹۰	۷
۰.۹۱	۰.۱۱	۰.۷۱	۰.۹۳	۰.۰۹	۰.۵۸	۰.۹۱	۰.۱۱	۰.۶۷	۸
۰.۹۸	۰.۰۷	۰.۴۳	۰.۹۸	۰.۰۵	۰.۳۵	۰.۹۸	۰.۰۶	۰.۴۰	۹
۱.۰۰	۰.۰۲	۰.۱۴	۱.۰۰	۰.۰۲	۰.۱۲	۱.۰۰	۰.۰۲	۰.۱۳	۱۰

با تکرار شبیه‌سازی اعداد فازی مرتبط با تقاضا و هزینه‌های حمل، نمودار میله‌ای اعداد تولید شده در هر طبقه برای اعداد فازی و نمودار منحنی تابع عضویت اعداد فازی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. نمودار میله‌ای و منحنی تابع عضویت پارامترهای غیر قطعی

پس از شبیه‌سازی داده‌های فازی، داده‌های تولید شده فازی برای مثال عددی سایز کوچک به صورت جدول ۵ بوده است.

جدول ۵. مقدار داده‌های فازی تولید شده برای هزینه‌های حمل‌ونقل (دلار)

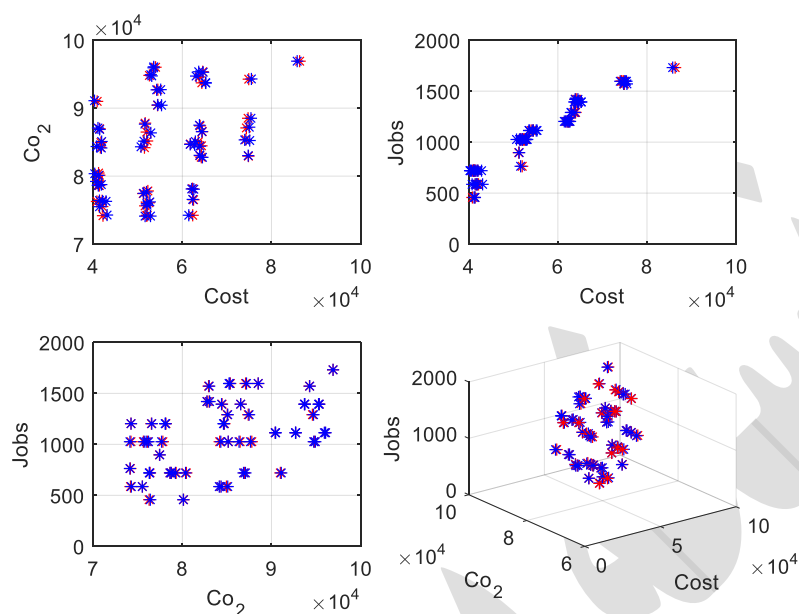
ω^4		ω^3		ω^2		ω^1			
۷.۰۰۰		۴.۷۰۰		۲.۶۰۲		۱.۱۷۲		$v = 1$	
۷.۹۹۶		۵.۷۱۳		۲.۵۸۴		۱.۸۴۳		$v = 2$	
۷.۱۵۷		۴.۱۳۴		۲.۴۴۸		۱.۵۵۰		$v = 3$	
φ^4		φ^3		φ^2		φ^1			
۱۰.۷۳۰		۹.۰۰۷		۵.۹۰۹		۳.۹۸۲		$w = 1$	
۱۰.۲۶۳		۸.۳۰۶		۴.۴۷۹		۳.۵۲۵		$w = 2$	
۱۰.۳۰۰		۸.۰۷۹		۴.۷۵۰		۲.۲۶۱		$w = 3$	
d^4		d^3		d^2		d^1		p	i
$t = 2$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 1$		
۲۳.۶۶۷	۲۰.۵۹۸	۱۵.۸۷۱	۱۵.۷۵۶	۱۴.۶۶۷	۱۰.۶۵۳	۵.۸۷۸	۵.۳۶۴	۱	۱
۲۲.۸۸۱	۲۰.۲۷۷	۱۶.۵۸۵	۱۶.۶۵۳	۱۳.۹۱۷	۱۱.۹۰۰	۸.۷۵۱	۷.۶۲۸	۲	۱
۲۰.۰۳۰	۲۰.۲۵۷	۱۹.۸۲۰	۱۶.۶۱۰	۱۰.۶۲۷	۱۱.۵۰۰	۵.۱۷۱	۵.۹۸۱	۱	۲
۲۲.۵۹۹	۲۲.۰۰۶	۱۶.۸۵۰	۱۹.۹۶۸	۱۰.۳۴۶	۱۳.۷۴۴	۸.۱۰۶	۷.۹۲۶	۲	۲
۲۱.۱۲۹	۲۳.۱۴۴	۱۸.۸۶۰	۱۶.۸۶۴	۱۰.۰۲۵	۱۱.۰۱۰	۶.۷۹۴	۶.۹۴۷	۱	۳
۲۱.۳۸۰	۲۱.۹۸۱	۱۹.۵۶۵	۱۶.۹۸۳	۱۲.۴۹۹	۱۱.۳۴۸	۶.۲۳۲	۶.۲۱۵	۲	۳
۲۱.۲۴۲	۲۱.۲۳۴	۱۸.۵۴۸	۱۸.۳۴۸	۱۲.۲۶۴	۱۱.۲۴۵	۷.۱۲۵	۷.۲۴۸	۱	۴
۲۲.۴۲۵	۲۲.۲۴۴	۱۹.۶۴۸	۱۸.۱۵۶	۱۲.۱۶۵	۱۲.۱۲۳	۷.۲۳۵	۶.۱۵۶	۲	۴

سایر پارامترهای مدل ریاضی نیز بر اساس تابع توزیع یکنواخت به صورت جدول ۶ نشان داده شده است. داده‌های مسئله به نحوی مقدار دهی شده است تا فضای موجه برای دستیابی به جواب‌های کارا وجود داشته باشد.

جدول ۶. مقدار پارامترهای مدل ریاضی بر اساس تابع توزیع یکنواخت

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\sim U [۵۰, ۹۰]$ kg	cd_{lp}	$\sim U [۱۰۰۰۰, ۱۲۰۰۰]$ \$	f_j, g_c
$\sim U [۱۲۰, ۲۰۰]$ kg	cp_{cp}	$\sim U [۵۰, ۱۴۰]$ gr	ev_v
$\sim U [۵۰, ۱۰۰]$ km	$da_{mm'}$	$\sim U [۸۰, ۱۸۰]$ gr	ew_w
$\sim U [۵۰, ۱۰۰]$ km	$db_{nn'}$	$\sim U [۱۰۰, ۵۰۰]$	wo_c
$\sim U [۳۵, ۴۵]$ km/h	s_v	$\sim U [۸۰, ۶۰۰]$	wo'_i
$[۰.۵, ۰.۴]$ h	$[a_i, b_i]$	$\sim U [۰.۳, ۰.۷]$	λ_c, λ'_i
$\sim U [۱, ۲]$ \$	π_i, π'_i	۰.۶	$m\lambda$
۱۰۰۰۰	M	۰.۸	$m\lambda'$
۱۰	ξ	$\sim U [۲, ۴]$ \$	$h_{lpt}, pc_{cp}, dc_{lp}$
۵	η	$\sim U [۹۰, ۱۲۰]$ kg	c_v
		$\sim U [۱۰۰, ۲۰۰]$ kg	c'_w

تحلیل مثال عددی سائز کوچک. پس از تولید و شبیه‌سازی داده‌های فازی، در ادامه به تجزیه و تحلیل یک مثال عددی شامل ۵ تولید کننده، ۵ توزیع کننده و ۴ مشتری پرداخته شده است. این مسئله در دو دوره زمانی و دو محصول مختلف در نظر گرفته شده و شامل ۳ نوع وسیله نقلیه ناهمگن در سطح اول و دوم شبکه می‌باشد. برای حل مدل سه هدفه، از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده و NSGA-II استفاده شده است که جبهه پارتو بدست آمده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

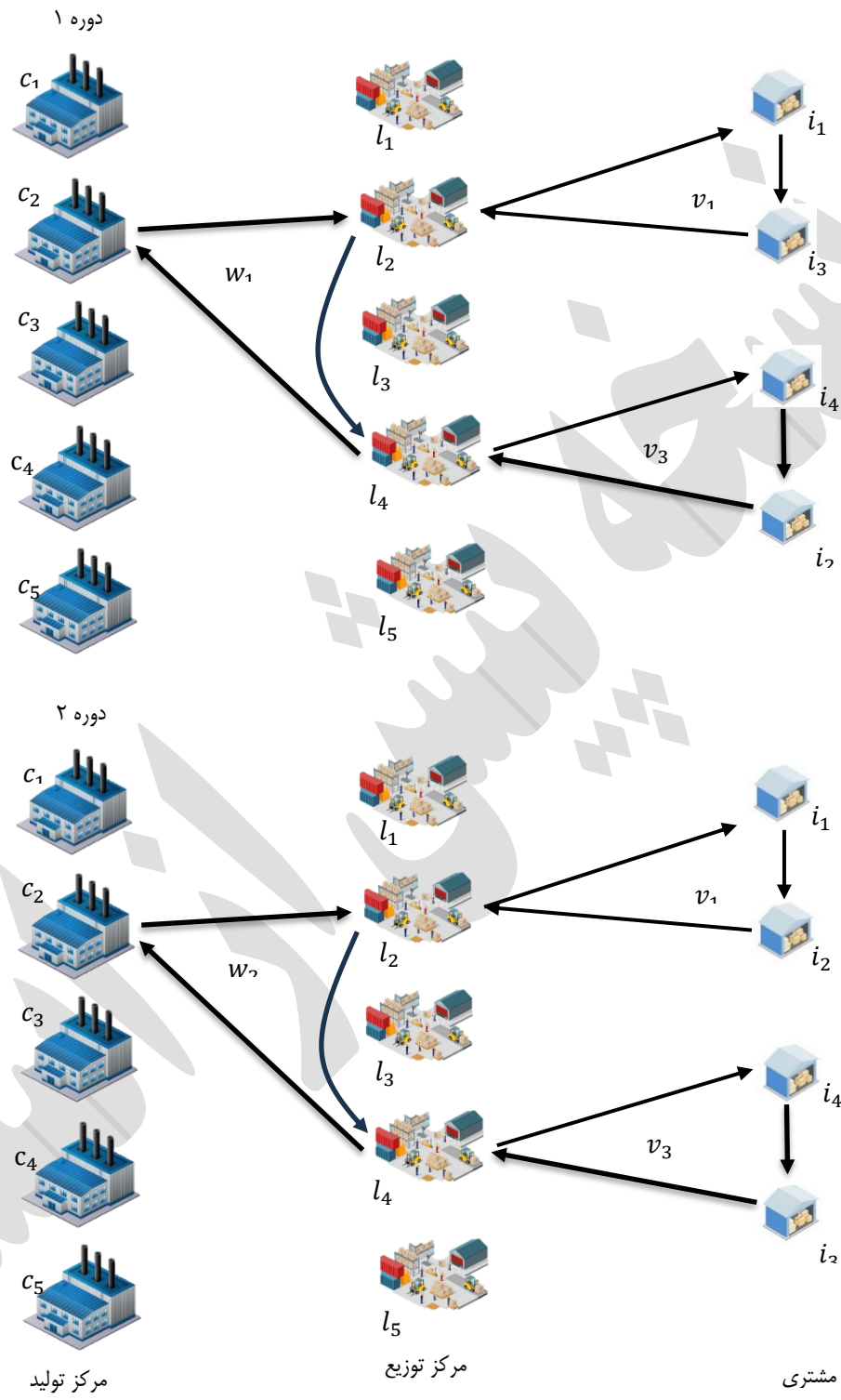


شکل ۱۰. جبهه پارتو بدست آمده بین کل توابع هدف مسئله

نتایج نشان می‌دهد که کمترین هزینه طراحی شبکه ۴۰۸۱۷.۰۷ دلار می‌باشد که در این حالت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برابر با ۷۶۲۷۱.۰۳ گرم و تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده برابر با ۴۵۷ نفر بوده است. همچنین کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای زمانی رخ داده که تعداد مراکز بیشتری و نزدیکتر به مشتری احداث شده باشد. این مقدار برای تابع هدف دوم برابر با ۷۴۱۶۹.۷۶ گرم بوده است. هزینه‌های طراحی شبکه در این حالت برابر با ۵۱۹۹۷.۸۴ دلار و تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده برابر با ۷۶۳ نفر است. در صورتی که بعد اجتماعی مسئله در نظر گرفته شود، حداکثر تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده برابر با ۱۷۳۱ نفر خواهد بود. در این حالت هزینه‌های کل مکان‌یابی، مسیریابی، تخصیص و نگهداری برابر با ۸۶۳۲۲.۹۲ دلار و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برابر با ۹۶۹۰۸.۰۹ گرم است. بر اساس دامنه توابع هدف بدست آمده (بهترین و بدترین مقدار)، ۴۶ جواب کارا برای اپسیلون محدودیت تقویت شده و ۵۹ جواب کارا برای NSGA-II بدست آمده است. در بررسی دیگر شاخص‌ها، مقدار MSI برای NSGA-II برابر ۵۱۹۳۴.۴۷ و SM برابر ۰.۸۹ و برای اپسیلون محدودیت تقویت شده به ترتیب برابر ۵۱۲۶۴.۱۲ و ۰.۵۲ حاصل شده است. در بررسی زمان حل نیز NSGA-II مثال عددی سایز کوچک را در مدت زمان ۲۵.۱۷ ثانیه حل نموده است. این شاخص‌ها نشان از کارایی بالای NSGA-II نسبت به اپسیلون محدودیت تقویت شده دارد.

همچنین تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد فرصت‌های شغلی، تعداد مراکز احداث شده افزایش یافته و این مسئله منجر به افزایش هزینه‌های کل شده است. از سوی دیگر با ثابت بودن تعداد مراکز احداث شده، هرچه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد، هزینه‌های کل مسیریابی، تخصیص و نگهداری افزایش یافته است.

برای بررسی اعتبار مدل ریاضی، به عنوان نمونه خروجی‌های اولین جواب کارا مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۱ مکان‌یابی، مسیریابی و تخصیص را در مثال عددی سایز کوچک برای اولین جواب کارا نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. مکان‌یابی، مسیریابی و تخصیص در اولین جواب کارای مثال عددی

نتایج شکل ۱۱ نشان می‌دهد که از بین پنج مرکز تولید بالقوه، مرکز تولید شماره ۲ انتخاب و از بین پنج مرکز توزیع بالقوه، مراکز توزیع شماره ۲ و ۴ انتخاب شده است. حمل و نقل محصولات بین مرکز تولید ۲ و مراکز توزیع ۲ و ۴ با وسیله نقلیه شماره ۱ و ۲ در دوره‌های اول و دوم صورت گرفته است. همچنین نحوه توزیع و وسیله نقلیه تخصیص یافته برای توزیع محصولات به مشتریان در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. در جدول ۷ مقدار محصولات توزیع شده توسط هر مرکز توزیع و تولید در دوره‌های زمانی مختلف از محصولات مختلف نشان داده شده است.

جدول ۷. مقدار محصولات توزیع شده و تولید شده در اولین جواب کارا

دوره ۲	دوره ۱	محصول	
۳۹.۶۹۹	۳۸.۱۸۱	محصول ۱	مرکز توزیع ۲
۳۹.۴۵۷	۳۷.۹۴۷	محصول ۲	مرکز توزیع ۲
۳۹.۸۸۹	۳۸.۲۲۴	محصول ۱	مرکز توزیع ۴
۴۰.۰۰۹	۴۱.۱۸۷	محصول ۲	مرکز توزیع ۴
۷۹.۵۸۸	۷۶.۴۰۵	محصول ۱	مرکز تولید ۲
۷۹.۴۶۶	۷۹.۱۳۴	محصول ۲	مرکز تولید ۲

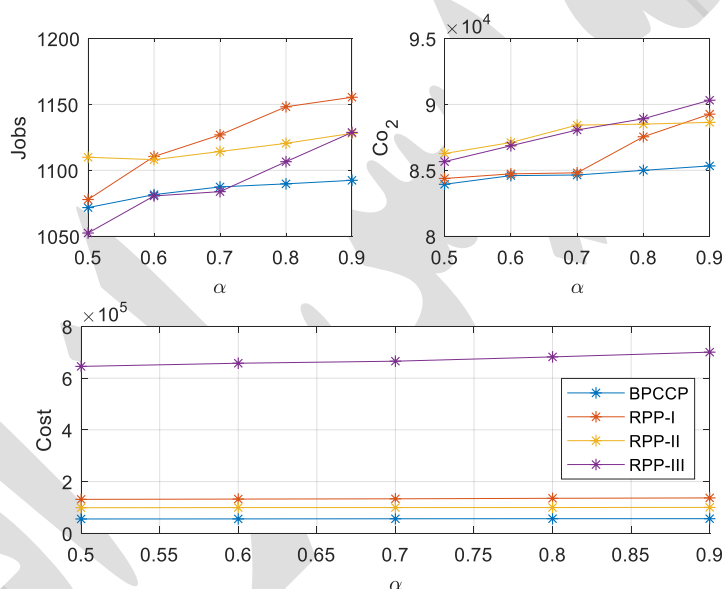
با توجه به نتایج جدول فوق، هیچ گونه محصولی در این جواب کارا در مرکز توزیع انبار نشده است. لذا هزینه‌های نگهداری در این جواب کارا برابر با ۰ بوده است. پس از بررسی اولین جواب کارا، به تحلیل حساسیت مدل ریاضی تحت مدل RPP-II، RPP-I، BPCCP و RPP-III پرداخته شده است. از این رو با فرض ثابت بودن مقادیر $\xi = 10$ و $\eta = 5$ ؛ مقدار نرخ عدم قطعیت بین ۰.۵ و ۰.۹ تغییر و میانگین نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸. عملکرد مدل ریاضی تحت روش‌های مختلف برنامه ریزی

زمان حل	میانگین فرصت شغلی	میانگین انتشار CO2	میانگین هزینه کل	α
مدل BPCCP				
۴۲۵.۴۵	۱۰۷۱.۷۲	۸۳۹۳۹.۸۹	۵۵۶۲۹.۷۴	۰.۵
۴۱۰.۲۳	۱۰۸۱.۵۶	۸۴۵۹۷.۴۶	۵۵۸۸۴.۲۸	۰.۶
۴۱۹.۱۴	۱۰۸۷.۴۰	۸۴۶۴۴.۷۱	۵۶۴۰۳.۵۵	۰.۷
۴۳۴.۹۲	۱۰۸۹.۷۲	۸۴۹۹۸.۷۳	۵۶۷۰۸.۷۲	۰.۸
۴۳۷.۷۶	۱۰۹۲.۴۰	۸۵۳۳۴.۱۸	۵۶۷۵۰.۴۳	۰.۹
مدل RPP-I				
۳۷۶.۴۸	۱۰۷۷.۸۳	۸۴۳۸۱.۵۵	۱۳۱۴۶۳.۴۸	۰.۵
۳۵۹.۳۵	۱۱۱۰.۴۹	۸۴۷۳۱.۰۲	۱۳۲۵۴۱.۲۸	۰.۶
۶۸۴.۷۵	۱۱۲۶.۸۹	۸۴۸۰۸.۹۶	۱۳۳۵۶۱.۶۵	۰.۷
۳۲۲.۶۶	۱۱۴۸.۲۰	۸۷۵۴۶.۳۸	۱۳۵۵۴۸.۹۴	۰.۸
۳۴۷.۴۰	۱۱۵۵.۴۴	۸۹۲۶۰.۹۳	۱۳۷۰۴۲.۲۳	۰.۹
مدل RPP-II				
۴۲۱.۳۱	۱۱۰۹.۸۹	۸۶۲۷۴.۲۵	۹۹۰۷۵.۰۰	۰.۵
۴۱۵.۸۴	۱۱۰۸.۰۹	۸۷۱۰۸.۳۴	۹۹۶۷۷.۲۹	۰.۶
۴۱۹.۶۷	۱۱۱۴.۲۸	۸۸۴۳۲.۰۱	۹۹۷۱۷.۵۶	۰.۷
۴۲۲.۳۷	۱۱۲۰.۴۸	۸۸۵۰۱.۹۵	۹۹۸۷۲.۴۳	۰.۸
۴۱۶.۲۰	۱۱۲۸.۱۰	۸۸۶۳۶.۳۵	۱۰۰۳۵۲.۵۰	۰.۹
مدل RPP-III				
۳۶۷.۴۹	۱۰۵۲.۴۲	۸۵۶۶۲.۲۲	۶۴۵۴۳۰.۸۶	۰.۵

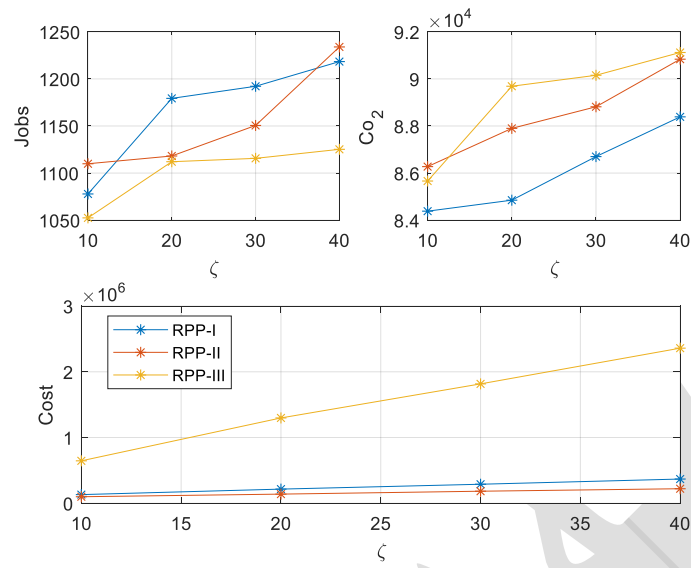
زمان حل	میانگین فرصت شغلی	میانگین انتشار CO ₂	میانگین هزینه کل	
۳۷۱.۶۷	۱۰۸۰.۵۷	۸۶۸۳.۲۶	۶۵۷۶۳۹.۴۰	۰.۶
۳۹۷.۵۴	۱۰۸۳.۸۳	۸۸۰۵۸.۶۱	۶۶۵۵۰۰.۵۱	۰.۷
۳۸۴.۵۵	۱۱۰۴.۵۴	۸۸۹۱۶.۱۶	۶۸۲۱۱۸.۲۷	۰.۸
۳۶۶.۰۰	۱۱۲۸.۷۵	۹۰۳۱۷.۴۱	۷۰۰۴۷۲.۱۴	۰.۹

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ عدم قطعیت در مدل، مقدار تقاضا افزایش یافته و در نتیجه در هر ۴ حالت مورد بررسی هزینه‌های کل افزایش یافته است. با افزایش مقدار حمل‌ونقل در شبکه و افزایش مقدار تقاضا، تعداد بیشتری از تسهیلات ایجاد شده و در نتیجه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین فرصت‌های شغلی افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد در مدل‌های RPP هزینه‌های کل به دلیل تضمین برای برآورده‌سازی تقاضا در شبکه بیشتر از حالت BPCCP است. از سوی دیگر با بررسی مدل‌های RPP مشاهده می‌گردد که هزینه‌های کل در مدل RPP-III بیشتر از RPP-I و RPP-II نیز بیشتر از RPP-II است. تغییرات نرخ عدم قطعیت بر روی میانگین‌های جواب کارا در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

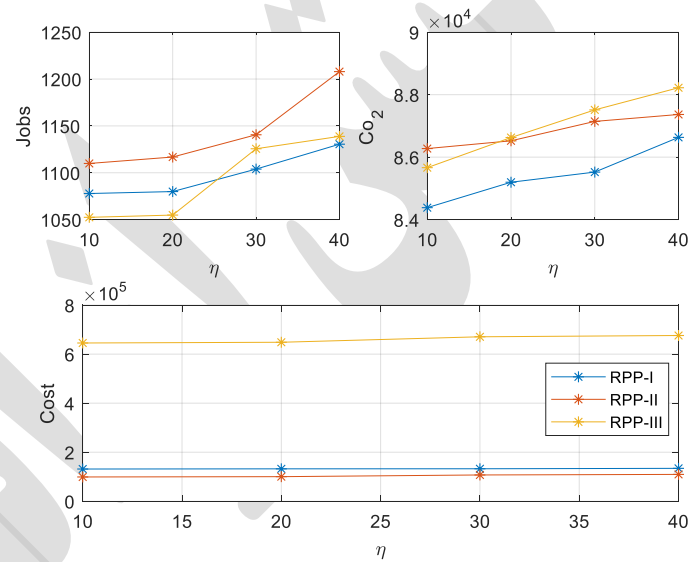


شکل ۱۲. تغییرات نرخ عدم قطعیت بر روی میانگین‌های جواب کارا

از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر استواری مدل، پارامتر ξ ضریب وزنی تابع هدف و η هزینه جریمه عدم برآورد تقاضا می‌باشد، در شکل ۱۳ و ۱۴ تحلیل حساسیت بر روی این دو پارامتر انجام شده است. تحلیل صورت گرفته نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ضریب وزنی تابع هدف استواری و همچنین هزینه جریمه عدم برآورده‌سازی تقاضا، هزینه‌های کل به صورت نمایی افزایش یافته و مدل تضمین می‌کند تا تمامی تقاضای مشتریان را برآورده سازد.



شکل ۱۳. تغییرات ضریب وزنی تابع هدف استواری بر روی میانگین‌های جواب کارا



شکل ۱۴. تغییرات هزینه جریمه بر روی میانگین‌های جواب کارا

با توجه به در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در مدل طراحی شده در سطح اول و دوم، در جدول ۹ به بررسی تغییرات مقادیر توابع هدف مسئله به ازای تغییرات نرخ خرابی تسهیلات در مدل BPCCP پرداخته شده است.

جدول ۹. تغییرات مقادیر توابع هدف مسئله در نرخ‌های مختلف خرابی تسهیلات

میانگین فرصت شغلی	میانگین انتشار CO ₂	میانگین هزینه کل	نرخ خرابی مراکز توزیع	میانگین فرصت شغلی	میانگین انتشار CO ₂	میانگین هزینه کل	نرخ خرابی مراکز تولید
۱۰۷۱.۷۲	۸۳۹۳۹.۸۹	۵۵۶۲۹.۷۴	۰	۱۰۷۱.۷۲	۸۳۹۳۹.۸۹	۵۵۶۲۹.۷۴	۰
۱۰۷۱.۷۲	۸۳۹۳۹.۸۹	۵۵۶۲۹.۷۴	+۱۰٪	۱۰۷۱.۷۲	۸۳۹۳۹.۸۹	۵۵۶۲۹.۷۴	+۱۰٪
۱۲۱۴.۶۵	۸۶۱۴۸.۴۶	۶۷۱۵۸.۳۴	+۲۰٪	۱۲۱۴.۶۵	۸۶۱۴۸.۴۶	۶۷۱۵۸.۳۴	+۲۰٪
۱۲۱۷.۸۵	۸۶۲۴۸.۹۳	۶۸۲۲۴.۱۸	+۳۰٪	۱۲۱۴.۶۵	۸۶۱۴۸.۴۶	۶۷۱۵۸.۳۴	+۳۰٪
۱۲۱۸.۳۰	۸۶۷۴۵.۴۶	۶۸۷۴۶.۲۴	+۴۰٪	۱۲۱۸.۱۳	۸۷۱۶۵.۷۰	۴۸۶۲۴.۲۵	+۴۰٪

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ خرابی، قابلیت اطمینان مرکز احداث شده کاهش یافته و برای رفع محدودیت حداقل قابلیت اطمینان هر سطح از مسئله مکان‌بایی-مسیریابی، تعداد مکان‌های احداث شده افزایش یافته و یا با هزینه بالاتر احداث می‌شود. به طوری که تغییر در مکان بهینه تسهیلات منجر به افزایش انتشار CO₂ و همچنین تعداد فرصت‌های شغلی شده است.

برای ارزیابی قابلیت راه حل‌های بدست آمده توسط مدل‌های مختلف پیشنهادی، ۱۰ داده تصادفی به طور یکنواخت تولید و با ثابت نگه داشتن مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری؛ انحرافات از مقدار بهینه محاسبه و میانگین و انحراف معیار کلی نتایج بدست می‌آید. برای این کار از رابطه (۴۴) استفاده می‌شود [۵۲]:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} Z &= f_{\text{real}} Y^* + c_{\text{real}} X^* + \delta R^d \\
 \text{s. t.} & \\
 aX^* + R^d &\geq d_{\text{real}} \\
 bX^* &\leq sY^* \\
 R^d &\geq 0
 \end{aligned} \tag{44}$$

با ثابت نگه داشتن مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری و تولید داده‌های تصادفی در بازه ارائه شده، میانگین انحرافات از مقدار بهینه بدست آمده و در نتیجه مقدار کل هزینه‌های متحمل بر شبکه در مدل‌های مختلف در جدول ۱۰ نشان داده شده است. در این جدول داده‌های قطعی در حقیقت میانگین داده‌های تصادفی می‌باشد.

جدول ۱۰. عملکرد مدل‌های ارائه شده در قابلیت اطمینان نتایج

RPP-III	RPP-II	RPP-I	BPCCP	دقیق	تکرار
۶۵۵۰۴.۸۷	۶۳۴۹۱.۳۹	۶۷۲۹۵.۴۴	۶۶۳۴۴.۲۲		۱
۶۹۴۶۰.۱۷	۶۹۴۳۶.۳۱	۶۶۹۶۹.۲۹	۶۵۵۱۰.۶۷		۲
۶۶۴۹۴.۳۰	۶۸۸۵۰.۵۵	۶۳۷۳۶.۴۶	۶۴۶۷۳.۱۶		۳
۶۵۳۴۰.۷۴	۶۵۴۱۸.۱۱	۶۷۰۳۶.۴۳	۶۵۱۷۶.۵۹		۴
۶۷۷۴۳.۷۶	۶۷۰۱۷.۱۰	۶۲۶۴۷.۷۳	۶۳۱۴۷.۳۵	۶۱۵۰۵.۲۱	۵
۶۴۴۸۱.۰۷	۶۴۲۵۱.۶۵	۶۵۱۳۷.۴۲	۶۵۸۴۸.۱۰		۶
۶۵۳۱۴.۲۸	۶۹۵۳۱.۶۵	۶۹۸۰۱.۹۶	۶۲۵۷۳.۳۶		۷
۶۶۸۴۷.۲۴	۶۶۰۸۹.۷۵	۶۴۷۳۸.۰۳	۶۲۴۳۸.۶۲		۸
۶۷۲۶۴.۳۹	۶۴۲۱۴.۸۱	۶۵۰۱۴.۲۵	۵۷۵۰۳.۳۳		۹
۶۷۰۰۴.۰۸	۶۵۰۹۹.۸۲	۶۹۳۰۱.۵۶	۶۳۵۶۴.۴۳		۱۰
۶۶۵۴۵.۴۹	۶۶۰۷۵.۳۱	۶۶۱۶۷.۶۸	۶۳۶۷۷.۹۸	۶۱۵۰۵.۲۱	میانگین
۱۳۸۰.۷۲	۱۸۹۰.۹۸	۲۲۰۰.۷۹	۲۴۴۱.۱۰	-	انحراف معیار

نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد که مقدار هزینه‌های کل در مدل PRR_III بالاتر از دیگر مدل‌ها بوده در حالی که انحراف معیار این روش کمتر از دیگر مدل‌ها است.

جهت بررسی کارایی روش‌های کنترل عدم قطعیت بیشتر، در این بخش مقایسات مختلف بین کلیه روش‌های کنترل عدم قطعیت نظیر BPCCP، RPP-I، RPP-II، RPP-II و یک شیوه جدید پرداخته شده است. در این شیوه، بدون ثابت نگه داشتن مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله و کنترل پارامتر غیر قطعی، داده‌های مسئله ۱۰ بار به صورت تصادفی تولید شده و مدل ریاضی با روش اسپیلون محدودیت حل شده است. بر این اساس و با فرض نرخ عدم قطعیت ۰.۵ برای روش‌های کنترل عدم قطعیت، مقدار تابع هدف بدست آمده در هر تکرار و میانگین و انحراف معیار روش پیشنهادی در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱. بررسی مقایسه جواب‌های بدست آمده از روش پیشنهادی با روش‌های کنترل عدم قطعیت

مدل	میانگین هزینه کل	میانگین انتشار CO ₂	میانگین فرصت شغلی
BPCCP	۵۵۶۲۹.۷۴	۸۳۹۳۹.۸۹	۱۰۷۱.۷۲
RPP-I	۱۳۱۴۶۳.۴۸	۸۴۳۸۱.۵۵	۱۰۷۷.۸۳
RPP-II	۹۹۰۷۵.۰۰	۸۶۲۷۴.۲۵	۱۱۰۹.۸۹
RPP-III	۶۴۵۴۳۰.۶۸	۸۵۶۶۲.۲۲	۱۰۵۲.۴۲
پیشنهادی (تصادفی)	۵۳۹۶۶.۱۹	۷۹۶۰۲.۲۶	۱۰۴۵.۳۴

نتایج جدول ۱۱ نشان می‌دهد که با ایجاد داده‌های تصادفی در مدل ریاضی و حل مسئله، میانگین هزینه‌های کل مسئله به مدل BPCCP نزدیک می‌باشد. گرچه انحراف معیار آن نسبت به روش‌های کنترلی بسیار بالاتر است. از سوی دیگر به دلیل تصادفی بودن و غیر قابل کنترل بودن داده‌های تصادفی مشاهده می‌گردد که مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین فرصت‌های شغلی ایجاد شده نیز کمتر از روش BPCCP می‌باشد.

میانگین مقدار توابع هدف بدست آمده در هر تکرار (۱۰ مثال عددی) بر اساس روش پیشنهادی تصادفی به شرح جدول ۱۲ می‌باشد.

جدول ۱۲. میانگین جواب‌های کارایی هر مثال عددی با روش پیشنهادی تصادفی

مثال عددی	میانگین هزینه کل	میانگین انتشار CO ₂	میانگین فرصت شغلی
۱	۴۴۳۰۸.۴۲	۷۶۴۷۵.۵۸	۱۰۳۷.۲۱
۲	۵۳۱۳۲.۲۳	۸۶۲۹۴.۴۱	۱۰۱۶.۴۷
۳	۵۳۵۸۴.۶۴	۷۶۲۵۶.۶۷	۱۰۷۶.۵۵
۴	۵۵۲۸۴.۶۰	۷۷۷۶۵.۳۸	۱۰۶۴.۹۴
۵	۵۳۱۱۴.۴۸	۸۲۷۱۷.۵۱	۱۱۰۵.۵۸
۶	۵۲۶۵۱.۴۱	۷۹۱۷۲.۰۵	۱۰۶۸.۶۹
۷	۵۵۴۵۷.۸۴	۷۹۰۶۸.۴۰	۱۰۲۴.۰۹
۸	۵۷۲۲۵.۸۰	۷۸۲۶۱.۶۷	۱۰۳۲.۲۳
۹	۶۲۱۷۰.۲۶	۷۸۳۸۱.۲۳	۱۰۲۱.۱۲
۱۰	۵۲۰۱۲.۲۶	۸۱۴۸۱.۷۴	۱۰۲۴.۴۵
میانگین	۵۳۹۶۶.۱۹	۷۹۶۰۲.۲۶	۱۰۴۵.۳۴
انحراف معیار	۴۳۷۷.۹۰	۲۹۰۴.۷۷	۲۶.۷۳

تحلیل مثال‌های عددی در سائز بزرگتر. پس از بررسی یک مثال عددی در سائز کوچک، به حل ۱۵ مثال عددی در سائزهای مختلف با NSGA-II و روش اپسیلون محدودیت پرداخته شده است. جدول ۱۳ اندازه مسائل نمونه در سائزهای بزرگتر و جدول ۱۴ شاخص‌های جواب کارا را در هر مثال عددی برای دو روش حل نشان می‌دهد.

جدول ۱۳. اندازه مسائل نمونه در سائزهای بزرگتر

$ T $	$ W $	$ V $	$ P $	$ I $	$ L $	$ C $	مسئله نمونه
۳	۴	۴	۳	۴	۴	۴	۱
۳	۴	۴	۳	۵	۵	۵	۲
۳	۵	۵	۳	۵	۵	۷	۳
۴	۶	۶	۴	۶	۶	۹	۴
۴	۶	۶	۴	۶	۶	۱۲	۵
۴	۷	۷	۴	۸	۸	۱۵	۶
۴	۸	۸	۵	۱۰	۱۰	۱۸	۷
۵	۱۰	۱۰	۵	۱۲	۱۲	۲۱	۸
۵	۱۰	۱۰	۵	۱۲	۱۲	۲۵	۹
۶	۱۲	۱۲	۶	۱۵	۱۵	۳۰	۱۰
۶	۱۲	۱۲	۶۰	۲۰	۲۰	۳۵	۱۱
۶	۱۵	۱۵	۶	۲۲	۲۲	۴۰	۱۲
۶	۱۵	۱۵	۷	۲۸	۲۸	۴۵	۱۳
۸	۱۸	۱۸	۷	۳۵	۳۵	۵۵	۱۴
۸	۱۸	۱۸	۸	۴۰	۴۰	۶۵	۱۵

جدول ۱۴. شاخص‌های مقایسه در مثال‌های عددی مختلف

اپسیلون محدودیت تقویت شده					NSGA-II					مسئله نمونه
CPT	MID	SM	MSI	NPF	CPT	MID	SM	MSI	NPF	
۵۷۸.۴۸	۴۲۸۴.۳۹	۰.۳۳	۶۶۲۷۳.۵۷	۴۸	۳۵.۳۹	۴۵۱۳.۷۱	۰.۶۹	۷۱۹۸۸.۷۰	۴۸	۱
۸۱۶.۶۶	۴۲۹۸.۹۱	۰.۴۳	۷۱۱۷۷.۳۸	۵۰	۴۷.۰۸	۴۹۱۶.۴۵	۰.۴۶	۶۱۹۰۳.۴۰	۴۴	۲
۱۲۷۵.۰۴	۴۲۷۸.۱۶	۰.۵۴	۶۹۸۹۴.۳۱	۶۲	۵۱.۴۴	۴۷۴۸.۶۳	۰.۷۷	۶۲۹۹۴.۲۷	۴۲	۳
-	-	-	-	-	۶۸.۹۹	۴۹۹۰.۱۲	۰.۴۶	۶۱۷۹۴.۴۰	۵۰	۴
-	-	-	-	-	۸۳.۷۴	۴۷۵۷.۱۳	۰.۷۵	۶۲۶۸۳.۲۶	۵۰	۵
-	-	-	-	-	۱۰۲.۳۹	۴۳۰۵.۳۸	۰.۴۳	۶۱۲۵۹.۳۴	۵۸	۶
-	-	-	-	-	۱۲۲.۵۴	۴۱۸۸.۴۴	۰.۵۱	۶۹۱۲۱.۵۵	۶۲	۷
-	-	-	-	-	۱۵۰.۰۲	۴۷۲۲.۹۹	۰.۴۶	۶۵۰۸۵.۷۳	۴۲	۸
-	-	-	-	-	۱۷۵.۶۹	۴۶۸۴.۵۸	۰.۶۲	۷۳۵۱۰.۵۳	۴۰	۹
-	-	-	-	-	۲۰۵.۱۳	۴۲۲۸.۰۱	۰.۷۷	۶۸۱۱۹.۹۵	۵۸	۱۰
-	-	-	-	-	۲۴۰.۱۶	۴۸۰۴.۸۷	۰.۵۹	۷۰۹۱۳.۳۱	۴۸	۱۱
-	-	-	-	-	۲۷۸.۲۱	۴۶۴۴.۰۲	۰.۷۳	۶۲۸۱۴.۹۲	۵۲	۱۲
-	-	-	-	-	۳۴۴.۷۲	۴۹۵۷.۶۲	۰.۶۹	۷۴۸۱۱.۹۸	۶۱	۱۳
-	-	-	-	-	۴۲۳.۲۲	۴۷۴۸.۰۵	۰.۷۰	۷۱۸۰۳.۷۵	۵۲	۱۴
-	-	-	-	-	۵۰۶.۱۱	۴۶۵۴.۷۳	۰.۵۸	۶۷۱۱۰.۴۲	۴۴	۱۵

با حل مثال‌های عددی مختلف مشاهده می‌گردد که اپسیلون محدودیت تقویت شده قادر به حل مثال‌های عددی شماره ۴ به بعد نمی‌باشد. این موضوع به دلیل افزایش تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد. در صورتی که NSGA-II در مدت زمان کوتاه تر از اپسیلون محدودیت تقویت شده به تعداد بیشتری از جواب‌های کارا با گستردگی بیشتر رسیده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که NSGA-II تنها در شاخص SM کارایی پایین تری داشته، اما به نسبت دیگر شاخص‌ها عملکرد مطلوب تری به جای گذاشته است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله به مدل‌سازی و حل یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی در شرایط عدم قطعیت با توجه به پایداری و قابلیت اطمینان پرداخته شد. اهمیت موضوع حمل‌ونقل و توزیع محصولات منجر به آن گردید تا مدلی دوسطحی از مسئله مسیریابی وسیله نقلیه در نظر گرفته شود که در آن تصمیمات مکان‌یابی مراکز توزیع و تولید، مسیریابی وسیله نقلیه و موجودی به طور همزمان اتخاذ می‌گردید. برای دستیابی به تصمیمات بهینه این مدل سه تابع هدف پایداری تحت عنوان کمینه‌سازی هزینه‌های کل، کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و بیشینه‌سازی فرصت‌های شغلی ایجاد شده در نظر گرفته شد. همچنین خرابی مراکز تولید و توزیع و عدم قطعیت در تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل نیز به عنوان ویژگی‌های اصلی مدل ریاضی به مسئله اضافه گردید. نتایج تجزیه و تحلیل مثال‌های عددی مختلف نشان داد که با افزایش تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده، هزینه‌های کل افزایش می‌یابد. همچنین با تلاش برای کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه‌های کل همچنان افزایش می‌یابد.

بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که با افزایش نرخ عدم قطعیت، مقدار تقاضای مشتریان افزایش یافته و این مسئله منجر به افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز شده است. افزایش مقدار تقاضا در مدل ریاضی، منجر به افزایش تعداد مراکز تولید و توزیع نیز می‌گردد که فرصت‌های شغلی زیادی را ایجاد می‌کند. برای استوارسازی مدل از سه روش مختلف نیز استفاده گردید. در مدل‌های RPP هزینه‌های کل به دلیل تضمین برای برآورده‌سازی تقاضا در شبکه بیشتر از حالت BPCCP است. از سوی دیگر با بررسی مدل‌های RPP مشاهده می‌گردد که هزینه‌های کل در مدل RPP-III بیشتر از RPP-I و RPP-II نیز بیشتر است. هرچند هزینه‌های کل در مدل RPP-III بالاتر بوده است اما انحراف معیار در این روش کمتر از روش‌های RPP-I و RPP-II گزارش شده است. با بررسی رویکردهای حل مختلف از جمله اپسیلون محدودیت تقویت شده و NSGA-II نیز مشاهده گردید که NSGA-II از قدرت بالایی در تولید جواب‌های کارا با بیشترین گسترش و کمترین زمان حل برخوردار است. در حالی که این روش نتایج مطلوبی در شاخص فاصله متریک کسب نکرده است. از این رو به عنوان تحقیقات آتی استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی جدید جهت افزایش کارایی روش‌های حل پیشنهاد می‌گردد. همچنین در نظر گرفتن سیستم صف در توزیع محصولات به مشتریان و در نظر گرفتن محصولات فسادپذیر نیز می‌تواند از دیگر پیشنهادها برای تحقیقات آتی باشد. در این مقاله مدل ریاضی بدون در نظر گرفتن تحویل و برداشت همزمان مدل‌سازی شده است که می‌توان این مفروض را هم به عنوان تحقیقات آتی در نظر گرفت.

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

منابع

1. Afandzadeh, S., Ahmadinejad, M., Abdoli, S., & Bigdeli, H. (2024). Solving the Hub Location-Routing Problem for National Postal Network with an Integrative Approach. *Journal of Transportation Research*, 21(2), 1-18. (In Persian)
2. Akbay, M. A., Kalayci, C. B., & Blum, C. (2023, March). Application of Adapt-CMSA to the Two-Echelon Electric Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Deliveries. In *Evolutionary Computation in Combinatorial*

- Optimization: 23rd European Conference, EvoCOP 2023, Held as Part of EvoStar 2023, Brno, Czech Republic, April 12–14, 2023, Proceedings (pp. 16-33). Cham: Springer Nature Switzerland.
3. Alamatsaz, K., Ahmadi, A., & Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2022). A multiobjective model for the green capacitated location-routing problem considering drivers' satisfaction and time1. window with uncertain demand. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4), 5052-5071.
 4. Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C., & Crainic, T. G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and 'grey zone' customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, 289(3), 940-958.
 5. Bayegan, B., Mehrabian, A., Yousefi Nejad Attari, M., & Jafar Doosti dylami, M. (2024). The Mathematical Model for Location-Routing Problem of Relief Logistics Considering the Types of People Under Conditions of Uncertainty. *Scientific Journal of Supply Chain Management*, 26(1), 55-66. (In Persian).
 6. Brandão, J. (2018). Iterated local search algorithm with ejection chains for the open vehicle routing problem with time windows. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 146-159.
 7. Cao, J. X., Wang, X., & Gao, J. (2021). A two-echelon location-routing problem for biomass logistics systems. *Biosystems Engineering*, 202, 106-118.
 8. Chen, X., Jiu, Y., & Hu, D. (2024). Two-Echelon Location-Routing Problem of Perishable Products Based on the Integrated Mode of In-Store Pick-Up and Delivery. *Transportation Research Record*, 03611981231218008.
 9. Crainic, T. G., Perboli, G., Mancini, S., & Tadei, R. (2010). Two-echelon vehicle routing problem: a satellite location analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 5944-5955.
 10. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
 11. Do C. Martins, L., Hirsch, P., & Juan, A. A. (2021). Agile optimization of a two-echelon vehicle routing problem with pickup and delivery. *International Transactions in Operational Research*, 28(1), 201-221.
 12. Du, J., Wang, X., Ma, B., & Zhou, F. (2023). Two-echelon joint delivery capacitated vehicle routing problem considering carbon emissions of online shopping. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 16(3-4), 372-398.
 13. Dumez, D., Tilk, C., Irnich, S., Lehuédé, F., Olkis, K., & Péton, O. (2023). A matheuristic for a 2-echelon vehicle routing problem with capacitated satellites and reverse flows. *European Journal of Operational Research*, 305(1), 64-84.
 14. Eslaminia, A., & Azimi, P. (2020). Solving the Electric Vehicle Routing Problem Considering the Vehicle Volume Limitation Using a Simulated Annealing Algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(4), 165-188. doi: 10.52547/jimp.9.4.165
 15. Eslamipoor, R. (2024). A new heuristic approach for a multi-depot three-level location-routing-inventory problem. *International Journal of Management Concepts and Philosophy*, 17(3), 322-339.
 16. Faiz, T. I., & Vogiatzis, C. (2022). A Robust Optimization Framework for Two-Echelon Vehicle and UAV Routing for Post-Disaster Humanitarian Logistics Operations. arXiv preprint arXiv:2207.11879.
 17. Fallahtafti, A., Ardjmand, E., Young Ii, W. A., & Weckman, G. R. (2021). A multi-objective two-echelon location-routing problem for cash logistics: A metaheuristic approach. *Applied Soft Computing*, 111, 107685.
 18. Farahbakhsh, A., & Behnamian, J. (2020). Solving the CVRP with Reduction to Knapsack Problem and Greedy Clustering Heuristic Method. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(4), 89-106.
 19. Ferdowsi, A., Valikhan-Anaraki, M., Mousavi, S. F., Farzin, S., & Mirjalili, S. (2021). Developing a model for multi-objective optimization of open channels and labyrinth weirs: Theory and application in Isfahan Irrigation Networks. *Flow Measurement and Instrumentation*, 80, 101971.
 20. Firouzi, H., Rezaeian, J., Rashidi Komijan, A., & Movahedi, M. M. (2023). Sustainable Supply Chain Location-Routing of Online Stores. *Journal of Strategic Management in Industrial Systems*, 63(18), 98-120. (In Persian).
 21. Ghahremani-Nahr, J., Ghaderi, A., & Kian, R. (2023). A food bank network design examining food nutritional value and freshness: A multi objective robust fuzzy model. *Expert Systems with Applications*, 215, 119272.
 22. Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., Rahmaty, M., Zeraati Foukolaei, P., & Sherejsharifi, A. (2023). Development of a Novel Fuzzy Hierarchical Location-Routing Optimization Model Considering Reliability. *Logistics*, 7(3), 64.
 23. Ghorbani, S., & Afshar-Nadjafi, B. (2021). Modeling and Solving the Cross-Docking Centers Location and Vehicle Scheduling Problem in a Multi-Product Supply Chain with Discrete Pick-up and Delivery. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(2), 41-66. doi: 10.52547/jimp.11.2.41
 24. Golden, B. L., Assad, A. A., & Wasil, E. A. (2002). Routing vehicles in the real world: applications in the solid waste, beverage, food, dairy, and newspaper industries. In *The vehicle routing problem* (pp. 245-286). Society for Industrial and Applied Mathematics.
 25. Hajghani, M., Forghani, M. A., Heidari, A., Khalilzadeh, M., & Kebriyaii, O. (2023). A two-echelon location routing problem considering sustainability and hybrid open and closed routes under uncertainty. *Heliyon*, 9(3), 214-221.

26. Heidari, A., Imani, D. M., Khalilzadeh, M., & Sarbazvatan, M. (2023). Green two-echelon closed and open location-routing problem: application of NSGA-II and MOGWO metaheuristic approaches. *Environment, Development and Sustainability*, 25(9), 9163-9199.
27. Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J. F., & Crainic, T. G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. *Computers & operations research*, 39(12), 3215-3228.
28. Huang, H., Yang, S., Li, X., & Hao, Z. (2021). An Embedded Hamiltonian Graph-Guided Heuristic Algorithm for Two-Echelon Vehicle Routing Problem. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(7), 5695-5707.
29. Javid, Y. (2021). A bi-objective mathematical model to determine risk-based inspection programs. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 893-904.
30. Jayarathna, D. G. N. D., Lanel, G. H. J., & Juman, Z. A. M. S. (2021). Survey on ten years of multi-depot vehicle routing problems: mathematical models, solution methods and real-life applications. *Sustainable Development Research*, 3(1), 36-54.
31. Kergosien, Y., Lente, C., Piton, D., & Billaut, J. C. (2011). A tabu search heuristic for the dynamic transportation of patients between care units. *European Journal of Operational Research*, 214(2), 442-452.
32. Khodashenas, M., Najafi, S. E., Kazemipoor, H., & Sobhani, M. (2023). Providing an integrated multi-depot vehicle routing problem model with simultaneous pickup and delivery and package layout under uncertainty with fuzzy-robust box optimization method. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 6(2), 372-403.
33. Kim, B. I., Kim, S., & Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 33(12), 3624-3642.
34. Li, F., Golden, B., & Wasil, E. (2007). The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results. *Computers & operations research*, 34(10), 2918-2930.
35. Li, H., & Li, S. (2020). Two-echelon location routing problem with multi-fuzzy and pick-delivery model and algorithm. In *Cyber Security Intelligence and Analytics* (pp. 600-610). Springer International Publishing.
36. Li, J., Xu, M., & Sun, P. (2022). Two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints and simultaneous pickup and delivery. *Transportation Research Part B: Methodological*, 162, 261-291.
37. Lin, K., Musa, S. N., Lee, H. Y., & Yap, H. J. (2024). Sustainable location-routing problem for medical waste management using electric vehicles. *Sustainable Cities and Society*, 105598.
38. Liu, R., & Jiang, S. (2022). A variable neighborhood search algorithm with constraint relaxation for the two-echelon vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup demands. *Soft Computing*, 26(17), 8879-8896.
39. Marques, G., Sadykov, R., Dupas, R., & Deschamps, J. C. (2022). A branch-cut-and-price approach for the single-trip and multi-trip two-echelon vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, 56(6), 1598-1617.
40. Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9652-9669.
41. Mohamed, I. B., Klibi, W., Sadykov, R., Şen, H., & Vanderbeck, F. (2023). The two-echelon stochastic multi-period capacitated location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 306(2), 645-667.
42. Mohtashami, A. (2014). A novel meta-heuristic based method for deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgments. *Applied Soft Computing*, 23, 530-545.
43. Moonsri, K., Sethanan, K., Worasan, K., & Nitisiri, K. (2021). A hybrid and self-adaptive differential evolution algorithm for the multi-depot vehicle routing problem in egg distribution. *Applied Sciences*, 12(1), 35.
44. Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & Chemical Engineering*, 82, 115-128.
45. Moshrefi, M. (2023). Location Problem-Routing a vehicle with a specified fuel capacity based on a tough time window and customer satisfaction. *Engineering Management and Soft Computing*, 9(1), 19-35. (In Persian).
46. Nasser S H, Ghaffari-far F. (2023). A Multi-Objective Mathematical Model for Vehicle Location-Routing Problem with Flexible Fuzzy Constraints. *Journal of Operational Research and Its Applications*, 20 (2), 149-169. (In Persian).
47. Nozari, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Gharemani-Nahr, J. (2022). A neutrosophic fuzzy programming method to solve a multi-depot vehicle routing model under uncertainty during the covid-19 pandemic. *International Journal of Engineering*, 35(2), 360-371.
48. Ouhader, H., & El Kyal, M. (2023). Collaborative location routing problem for sustainable supply chain design with profit sharing. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(39), 90099-90120.
49. Perwira Redi, A. A. N., Sekaringtyas, N. N., Astiana, H. B., Liperda, R. I., Asih, A. M. S., & Sopha, B. M. (2023). Two Echelon Vehicle Routing Problem for Disaster Mapping Process Using Cooperated Vehicles Assignment. In *Smart and Sustainable Supply Chain and Logistics—Challenges, Methods and Best Practices: Volume 2* (pp. 233-242). Cham: Springer International Publishing.

50. Pichka, K., Bajgiran, A. H., Petering, M. E., Jang, J., & Yue, X. (2018). The two echelon open location routing problem: Mathematical model and hybrid heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 121, 97-112.
51. Pishvaei, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 206, 1-20.
52. Privé, J., Renaud, J., Boctor, F., & Laporte, G. (2006). Solving a vehicle-routing problem arising in soft-drink distribution. *Journal of the Operational Research Society*, 57(9), 1045-1052.
53. Raff, S. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers & Operations Research*, 10(2), 63-211.
54. Seifbarghy, M., & Esmaili, M. (2023). Revised solution technique for a bi-level location-inventory-routing problem under uncertainty of demand and perishability of products. *Applied Soft Computing*, 133, 109899.
55. Sluijk, N., Florio, A. M., Kinable, J., Dellaert, N., & Van Woensel, T. (2023). A chance-constrained two-echelon vehicle routing problem with stochastic demands. *Transportation Science*, 57(1), 252-272.
56. Spada, M., Bierlaire, M., & Liebling, T. M. (2005). Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem. *Transportation Science*, 39(4), 477-490.
57. Stodola, P. (2020). Hybrid ant colony optimization algorithm applied to the multi-depot vehicle routing problem. *Natural Computing*, 19(2), 463-475.
58. Sundaram, S., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M., Antoniou, C., & Balakrishna, R. (2011). Simulation-based dynamic traffic assignment for short-term planning applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1), 450-462.
59. Sutrisno, H., & Yang, C. L. (2023). A two-echelon location routing problem with mobile satellites for last-mile delivery: mathematical formulation and clustering-based heuristic method. *Annals of Operations Research*, 323(1-2), 203-228.
60. Temiz, S., Kazanç, H. C., Soysal, M., & Çimen, M. (2024). A probabilistic bi-objective model for a humanitarian location-routing problem under uncertain demand and road closure. *International Transactions in Operational Research*.
61. Wang, Y., Li, Q., Guan, X., Xu, M., Liu, Y., & Wang, H. (2021). Two-echelon collaborative multi-depot multi-period vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 167, 114201.
62. Wang, Y., Wang, X., Wei, Y., Sun, Y., Fan, J., & Wang, H. (2023). Two-echelon multi-depot multi-period location-routing problem with pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 109385.
63. Yan, X., Huang, H., Hao, Z., & Wang, J. (2019). A graph-based fuzzy evolutionary algorithm for solving two-echelon vehicle routing problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 24(1), 129-141.
64. Zabihian-Bisheh, A., Vandchali, H. R., Kayvanfar, V., & Werner, F. (2024). A sustainable multi-objective model for the hazardous waste location-routing problem: A real case study. *Sustainable Operations and Computers*, 5, 1-14.
65. Zarandi, R. Z., Motlaq-Kashani, A. S., & Sheikhalishahi, M. (2024). A two-echelon sustainable multi-route location routing problem for biomass supply chain network design considering disruption. *Computers & Chemical Engineering*, 187, 108744.
66. Zeinodin Zadeh, S., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvaei, M. S. (2023). Modelling a routing-location-inventory problem in the sustainable poultry and livestock medicine supply chain under uncertainty, considering discount. *Research in Production and Operations Management*, 14(1), 39-64. (In Persian).