



Two-Echelon Location-Routing under Uncertainty Considering Reliability

Ramin Behbamzadeh* 

Maghsoud Amiri** 

Mohammad Taghi Taghavifard*** 

Amir Yousefli**** 

Extended Abstract

Introduction and objectives: Urban development and the increase in intercity and intracity transportation have led to a significant rise in transportation costs. This rise in cost increases the final product price and consequently the product's market price. Additionally, the economic aspect is not the only concern; increased transportation results in higher CO₂ emissions. These issues have driven the design of various transportation and vehicle routing models, including the vehicle location-routing problem. Facility location is a strategic decision due to the high costs associated with constructing and locating facilities. On the other hand, routing decisions depend on location decisions and are considered mid-term and short-term decisions. In this study, a mathematical model for vehicle location-routing under uncertainty conditions and considering reliability is developed to simultaneously optimize sustainability objective functions while maintaining minimum reliability levels. The sustainability objectives in this study include minimizing total costs, minimizing CO₂ emissions, and maximizing job opportunities based on integrated strategic and tactical decisions. The primary focus of this paper is decision-making for optimal transportation routing, considering time windows and the reliability of facility location based on their failure rates.

Methods: Given the uncertainty of the mathematical model parameters, various fuzzy and robust possibilistic programming methods were employed to formulate the model. Four different models were used to manage the uncertainty of demand parameters and transportation costs, and the results were compared. Additionally, two methods—an exact solution approach and a meta-heuristic algorithm—were employed to solve the multi-objective mathematical model. The enhanced epsilon constraint method was used to analyze small-scale mathematical models and conduct sensitivity analyses, while the NSGA-II algorithm was applied to solve larger-scale numerical examples. Furthermore, an initial solution based on prioritization was utilized for the meta-heuristic algorithm.

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

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

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

Corresponding Author: amiri@atu.ac.ir

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

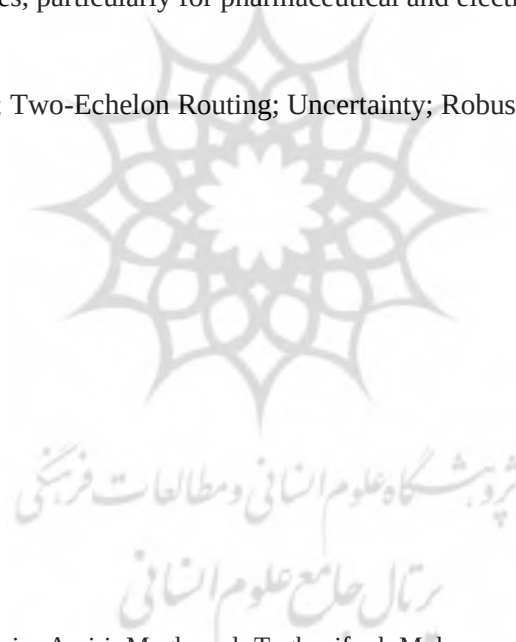
**** Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran



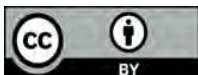
Results and discussion: The results indicate that although an increase in uncertainty rates leads to more job opportunities, it also raises total costs and greenhouse gas emissions. Additionally, the analysis reveals that the RPP-III method achieves the highest model robustness cost with the lowest standard deviation. In the reliability analysis, it was observed that higher facility failure rates result in an increased number of located production and distribution centers. This, in turn, leads to higher total costs, increased CO₂ emissions, and more job opportunities. By analyzing 15 numerical examples, it was also found that NSGA-II is highly efficient in solving the mathematical model compared to the enhanced epsilon constraint method.

Conclusion: The findings of this research assist managers in making strategic decisions such as facility location and tactical decisions such as vehicle routing in the context of market uncertainty. Given that the model incorporates various realistic decisions and assumptions, the mathematical model can be effectively applied in distribution industries, particularly for pharmaceutical and electronic goods.

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



How to Cite: Behbamdadeh, Ramin; Amiri, Maghsoud; Taghavifard, Mohammad Taghi; Yousefli, Amir (2024). Two-Echelon Location-Routing under Uncertainty Considering Reliability. *Ind. Manag. Persp.*, 14(4), 165-200 (In Persian).



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

رامین به‌به‌زاده^{ID*}

مقصود امیری^{ID**}

محمد تقی تقوی‌فرد^{ID***}

امیر یوسفلی^{ID****}

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: توسعه شهری و افزایش میزان حمل‌ونقل‌های برون شهری و درون شهری منجر به آن شده است تا هزینه‌های مرتبط با حمل‌ونقل به شدت افزایش یابد، 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 حمل‌ونقل منجر به افزایش میزان انتشار گاز CO₂ می‌شود. این موضوع منجر به طراحی مدل‌های مختلف حمل‌ونقل و مسیریابی وسیله نقلیه شده است که می‌توان به مسئله مکان‌یابی-مسیریابی وسیله نقلیه اشاره کرد. مسئله مکان‌یابی تسهیلات یک تصمیم استراتژیکی است، زیرا هزینه احداث و مکان‌یابی تسهیلات بسیار بالا می‌باشد. از سوی دیگر، تصمیمات مسیریابی مبتنی بر تصمیمات مکان‌یابی صورت می‌پذیرد و یک تصمیم میان‌مدت و کوتاه‌مدت به شمار می‌آید. در این مقاله، با توسعه یک مدل ریاضی از مکان‌یابی-مسیریابی وسیله نقلیه در شرایط عدم قطعیت و در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، تلاش شده است تا بهینه‌سازی همزمان در توابع هدف پایداری با حفظ حداقل قابلیت اطمینان صورت پذیرد. اهداف پایداری در این مقاله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های کل مسئله، کمینه‌سازی میزان انتشار CO₂ و بیشینه‌سازی فرصت‌های شغلی بر اساس تصمیمات یکپارچه استراتژیکی و تاکتیکی است. مهم‌ترین موضوع پرداخته شده در این مقاله، تصمیم‌گیری در خصوص مسیریابی بهینه حمل‌ونقل با در نظر گرفتن پنجره زمانی و قابلیت اطمینان در مکان‌یابی تسهیلات بر اساس نرخ خرابی آن‌ها می‌باشد.

روش‌ها: به دلیل غیر قطعی بودن پارامترهای مدل ریاضی، از انواع مختلف روش‌های برنامه‌ریزی 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 حمل‌ونقل استفاده و نتایج مدل با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین برای حل مدل ریاضی چند هدفه از دو روش دقیق و الگوریتم فراابتکاری 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.

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

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

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

نویسنده مسئول: amiri@atu.ac.ir

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

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

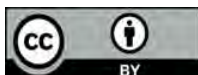
نوع مقاله: پژوهشی

یافته‌ها: نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد افزایش نرخ عدم قطعیت، اگرچه 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 CO_2 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، مخصوصاً کالاهای دارویی و الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرد.

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

استناددهی: بهیم‌زاده، رامین؛ امیری، مقصود؛ تقوی‌فرد، محمدتقی؛ یوسفی، امیر (۱۴۰۳). مسیریابی-مکان‌یابی دوسطحی در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۴)، ۱۶۵-۲۰۰.



۱. مقدمه

امروزه توسعه شهرنشینی، افزایش واحدهای مختلف تولیدی و جهانی شدن شرکت‌ها منجر به آن شده است تا حمل‌ونقل به عنوان مسئله‌ای پیچیده تبدیل گردد. افزایش تقاضا به واسطه توسعه شهری منجر به افزایش میزان تردد انواع گزینه‌های حمل‌ونقل شده که مشکلاتی نظیر ترافیک، آلودگی‌های زیست محیطی، طولانی شدن زمان تردد و غیره را به بار آورده است [۴۱]. با توسعه شهرنشینی و افزایش هزینه‌ها، قیمت تمام شده محصولات نهایی افزایش می‌یابد. این موضوع نیز منجر به افزایش قیمت محصول می‌شود. همچنین تنها بعد اقتصادی مد نظر نبوده و افزایش حمل‌ونقل 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 تحت تاثیر تعیین مسیر بهینه وسایل نقلیه و یا مراکز توزیع در سطح شهر است. تجهیز کارآمد سیستم حمل‌ونقل می‌تواند مشکلات ناشی از ترافیک، آلودگی‌های زیست محیطی ایجاد شده نظیر آلودگی هوا، آب، صوتی و ... را در بخش‌های تولیدی، خدماتی و حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل را به شدت افزایش داده و صرفه اقتصادی نداشته باشد [۵۵]. در نتیجه در این نوع مسائل، چندین دپو مختلف وجود دارد که هر کدام مجموعه‌ای از مشتریان را به خود اختصاص می‌دهد. هدف از این نوع مسائل تعیین مسیر بهینه حمل‌ونقل و ارائه خدمات به مشتریان تخصیص یافته به هر دپو، مطابق با اهداف شرکت است [۱۸]. این مسئله شامل تعیین ترتیب و زمان‌بندی خدمات‌دهی وسیله نقلیه به مشتریان و بازگشت آن به دپو می‌باشد. با توسعه سیستم حمل‌ونقل 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 وسایل نقلیه، به دلیل ماهیت استراتژیک و تاکتیکی آن‌ها، به گونه‌ای است که باید حتماً به صورت هم‌زمان اتخاذ شوند. زیرا در صورتی که تنها مکان‌یابی تسهیلات هدف باشد، ممکن است مکان و نوع تسهیلات ایجاد شده به نحوی باشد که در بلندمدت، هزینه‌های حمل‌ونقل و سایر هزینه‌ها را افزایش دهد. از این رو، لازم است این موارد در قالب یک مدل ریاضی و به صورت هم‌زمان مدنظر قرار گیرند. بر این اساس، باید مدلی مناسب ارائه شود که انتخاب مراکز تولید و توزیع را در کنار تعیین مسیر بهینه وسایل نقلیه برای تحویل محصولات، به طور هم‌زمان در نظر گیرد. این مدل باید با هدف افزایش سطح رضایت مشتری و تحویل کالا در پنجره‌های زمانی از پیش تعیین شده طراحی شود. به‌صراحت می‌توان گفت مدل ریاضی پیشنهاد شده در این تحقیق، قادر است تمامی جنبه‌های پایداری شبکه از جمله جنبه اقتصادی (کاهش هزینه)، زیست‌محیطی (کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای) و اجتماعی (افزایش فرصت‌های شغلی) را در نظر بگیرد. علاوه بر این، این تحقیق به بررسی عدم قطعیت در مقدار تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل پرداخته و روشی مناسب برای مدل‌سازی این پارامترها ارائه خواهد کرد.

تحویل محصولات با قابلیت اطمینان بالا، یکی از اولویت‌های اصلی رقابتی است؛ بنابراین، در مدل پیشنهادی، حداقل سطح قابلیت اطمینان در شبکه نیز لحاظ خواهد شد. در نهایت، به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالای این مسئله، استفاده از روش‌های دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل ضروری است. در این تحقیق، مناسب‌ترین روش‌های حل برای این مسئله به کار گرفته خواهد شد.

در اینگونه مسائل، تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی به صورت همزمان اتخاذ می‌گردد که در آن تصمیم استراتژیک 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، تأثیر بسزایی در مسئله دارند. تصمیمات نوع دوم تصمیمات تاکتیکی هستند. در این نوع تصمیمات که همزمان با تصمیمات استراتژیک 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 [۵۰]، روزنامه [۲۴]، محموله‌های پستی [۳۲]، جمع‌آوری زباله‌های صنعتی و تجاری [۳۳] و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل هوایی بار [۵۱] از جمله کاربردهای این مسئله برای بهینه‌سازی سیستم توزیع کالا هستند.

در دهه‌های اخیر با توجه به اهمیت و تأثیر قابل توجه این موضوع، مطالعات در زمینه حمل‌ونقل در کنار گسترش زیرساخت‌ها تمایل بیشتری به مدیریت سیستم عرضه حمل‌ونقل و استفاده بهینه از زیرساخت‌ها نشان داده‌اند. سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در بخش توسعه حمل‌ونقل عمومی و به کار بستن سیستم‌های اطلاع‌رسانی و حمل‌ونقل هوشمند شواهدی برای اثبات این گفته هستند [۵۶]. امروزه کاربرد مدل‌های مسیریابی وسیله نقلیه مورد استقبال شرکت‌های خدمات حمل‌ونقل همگانی و شبه همگانی از جمله مسیریابی سرویس مدارس و انتقال بیماران به بیمارستان‌ها قرار گرفته‌اند [۵۴، ۲۲]. در ادامه به بررسی برخی از مهمترین تحقیقات در این زمینه پرداخته شده است.

کراینیک و همکاران^۱ (۲۰۱۰) 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 (۲۰۱۸) 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 (۲۰۱۸) 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 [۴۸]. یان و همکاران^۴ (۲۰۱۹) 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 سطوح اول و دوم ارائه کردند [۶۱]. لی و لی^۵ (۲۰۲۰) یک مسئله مسیریابی مکان‌یابی دو مرحله‌ای چند فاز را با مدل بارگیری و تحویل پیشنهاد کردند که شامل دو عامل فاز رفتار مشتری فاز در فرآیند مصرف و زمان فاز ترافیک در وسیله نقلیه توزیع لجستیک بود [۳۳].

1. Crainic et al.
2. Brandão
3. Pichka et al.
4. Yan et al.
5. Li & Li

کائو و همکاران^۱ (۲۰۲۱) 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^۲ (۲۰۲۱) 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^۳ (۲۰۲۳) یک فرمول برنامه‌نویسی دوسطحی برای مسئله مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی در یک زنجیره تامین دو سطحی، شامل چندین انبار مرکزی و خرده‌فروشی با محصولات فاسدشدنی تحت تقاضای نامشخص، ارائه کردند [۵۲]. علامت‌ساز و همکاران^۴ (۲۰۲۲) 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^۵ (۲۰۲۲) 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 [۳۶]. لی و همکاران^۶ (۲۰۲۲) 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 [۳۴]. مارکوس و همکاران^۷ (۲۰۲۲) 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 [۳۷]. اسلاچیک و همکاران^۸ (۲۰۲۳) 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 [۵۳]. دو و همکاران^۹ (۲۰۲۳) به طراحی یک شبکه تحویل مشترک با کارآمد انرژی برای شرکت‌های اکسپرس مختلف برای ارائه خدمات تحویل سریع به مشتریان پرداختند [۱۲]. خدانشناس و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۳) 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 [۳۱].

زرنندی و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۴) 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 ۶۰۷۹ درصد بیشتر از مشکل چند مسیره است و در نظر گرفتن گزینه چند مسیری انعطاف‌پذیری مسئله را بهبود می‌بخشد [۶۳]. تمیز و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۴) 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 استفاده قرار گرفت. نتایج، توانایی مدل پیشنهادی را در هماهنگ‌سازی مؤثر اهداف مختلف نشان داد [۵۸]. اسلامی‌پور^{۱۳} (۲۰۲۴) یک رویکرد فراابتکاری جدید برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی سه سطحی چند انباری ارائه کرد. وی با توجه به NP-

1. Cao et al.
2. Fallahrafti et al.
3. Seifbarghy & Esmaeili
4. Alamatsaz et al.
5. Liu & Jiang
6. Li et al.
7. Marques et al.
8. Sluijk et al.
9. Du et al.
10. Khodashenas et al.
11. Zarandi et al.
12. Temiz et al.
13. Eslamipoor

hard بودن مسئله 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^۱ (۲۰۲۴) 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^۲ (۲۰۲۴) 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 [۶۲]. لین و همکاران^۳ (۲۰۲۴) 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 [۳۵].

بایگان و همکاران (۲۰۲۴) 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 افسیلون 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 (۲۰۲۴) 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 (۲۰۲۳) 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 افسیلون با استفاده از CPLEX حل و همچنین با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در سه سائز اجرا گردید. دو الگوریتم NSGA-II و PBMOSA 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 [۶۴].

ناصری و غفاری فر (۲۰۲۳) 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 وزنی مدل را به یک مدل تک هدفه تبدیل شده و سپس با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط حل کردند و از یک

1. Chen et al.

2. Zabihiyan-Bisheh et al.

3. Lin et al.

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 [۴۴]. 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 (۲۰۲۳) 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 [۴۳]. 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
[۵۹]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۱۱]	-	-	*	-	-	ابتکاری
[۴]	-	*	-	-	-	فرا ابتکاری
[۲۸]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۲۶]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری-دقیق
[۱۶]	*	-	-	تقاضا	استوار	دقیق
[۴۵]	*	-	-	تقاضا-حمل و نقل	فازی	دقیق
[۳۷]	-	*	-	-	-	دقیق
[۴۷]	-	-	-	-	-	دقیق
[۲]	-	-	*	-	-	فرا ابتکاری-دقیق
[۵۷]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری-دقیق
[۲۵]	*	-	-	حمل و نقل، ظرفیت	استوار	فرا ابتکاری-دقیق
[۳۹]	*	-	-	تقاضا-حمل و نقل	احتمالی	دقیق
[۶۰]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۴۶]	*	-	-	-	-	دقیق
[۳۲]	*	-	-	تقاضا-حمل و نقل	استوار امکانی	فرا ابتکاری
[۶۳]	-	-	-	-	-	دقیق
[۵۸]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۱۵]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۸]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۶۲]	-	-	-	-	-	دقیق
[۳۵]	-	-	-	-	-	دقیق
[۵]	*	-	-	تقاضا	احتمالی	دقیق
[۱]	*	-	-	-	-	فرا ابتکاری
[۶۴]	*	-	-	تقاضا	فازی	فرا ابتکاری-دقیق
[۴۴]	*	-	-	-	-	دقیق

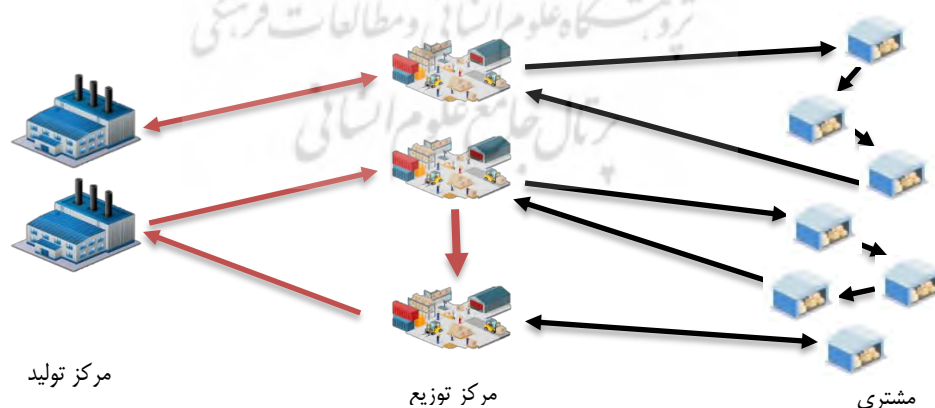
منبع	مکان‌یابی	پنجره زمانی	تحويل-برداشت	پارامتر غیر قطعی	روشن کنترل غیرقطعی	روش حل
[۲۰]	*	-	*	-	-	دقیق
[۴۳]	*	-	-	-	-	فراابتکاری
مقاله حاضر	*	*	-	تقاضا-حمل و نقل	استوار امکانی	فرا ابتکاری-دقیق

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 دوسطحی 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 دوسطحی
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 مراکزی می‌توان جهت تولید محصولات و ارسال محصولات به مراکز توزیع استفاده کرد که از قبل انتخاب شده باشند.



شکل ۱. مدل پیشنهادی مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی

در این مسئله، تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل مشتریان به صورت غیر قطعی و اعداد فازی مثلی 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 پیش‌بینی 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 مشمول 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

مجموعه دوره زمانی

 T

پارامترها.

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

$$\begin{aligned} \text{Min Cost} = & \sum_{l \in L} f_l Z_l + \sum_{c \in C} g_c O_c + \sum_{m \in \{I \cup L\}} \sum_{m' \in \{I \cup L\}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \bar{\omega}_v da_{mm'} Y_{mm'vt} + \\ & \sum_{n \in \{C \cup L\}} \sum_{n' \in \{C \cup L\}} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} \tilde{\phi}_w db_{nn'} X_{nn'wt} + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_{lpt} Q_{lpt} \\ & + \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} p c_{cp} N_{cpt} + \end{aligned} \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} d c_{lp} W_{lpt} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \pi_i M_{ivt} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \pi'_i M'_{ivt} \\ \text{Min Emmission} = & \sum_{m \in \{I \cup L\}} \sum_{m' \in \{I \cup L\}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} e v_v da_{mm'} Y_{mm'vt} \\ & + \sum_{n \in \{C \cup L\}} \sum_{n' \in \{C \cup L\}} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} e w_w db_{nn'} X_{nn'wt} \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\text{Max Potential Jobs} = \sum_{l \in L} w o'_l Z_l + \sum_{c \in C} w o_c O_c \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t:} \\ \sum_{v \in V} \sum_{m' \in \{I \cup L\}} Y_{im'vt} = 1, \quad \forall i \in I, t \in T \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\sum_{m \in \{I \cup L\}} Y_{mjvt} = \sum_{m' \in \{I \cup L\}} Y_{jm'vt}, \quad \forall j \in \{I \cup L\}, v \in V, t \in T \quad (۵)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} Y_{livt} \leq 1, \quad \forall v \in V, t \in T \quad (۶)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{v \in V} S_{livt} \leq 1, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (۷)$$

$$-S_{livt} + \sum_{m \in \{I \cup L\}} (Y_{lmvt} + Y_{mivt}) \leq 1, \quad \forall i \in I, l \in L, v \in V, t \in T \quad (۸)$$

$$E_{ivt} - E_{jvt} + |I| Y_{ijvt} \leq |I| - 1, \quad \forall i, j \in I, v \in V, t \in T \quad (۹)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{n \in \{L \cup C\}} X_{lnwt} = Z_l, \quad \forall l \in L, t \in T \quad (۱۰)$$

$$\sum_{n \in \{L \cup C\}} X_{njwt} = \sum_{n' \in \{L \cup C\}} X_{jn'wt}, \quad \forall j \in \{L \cup C\}, w \in W, t \in T \quad (۱۱)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 بدینانه استفاده شده است. رابطه (۳۶) مدل اختصار مسئله را نشان می‌دهد [۴۹]:

$$\text{Min } Z = fY + \tilde{c}X$$

s. t.:

$$aX = \tilde{d}$$

$$bX \leq sY$$

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

(۳۶)

که در آن بردارهای $f, \tilde{c}, \tilde{d}$ و s به ترتیب نشان‌دهنده هزینه ثابت احداث، هزینه متغیر (حمل‌ونقل)، مقدار تقاضا و عرضه می‌باشد. همچنین a و b ماتریس ضرایب بوده و درنهایت X و Y به ترتیب متغیرهای پیوسته و صفر و یک می‌باشند. حال فرض می‌شود که بردارهای $\tilde{d}, \tilde{c}$ در مدل فوق به‌صورت پارامترهای غیرقطعی ارائه شده است. با توجه به شکل عمومی برنامه‌ریزی محدود غیرقطعی، مقدار انتظاری تابع هدف و فازی بدینانه به ترتیب برای مقابله با تابع هدف و محدودیت غیرقطعی اخذ گردد. حال با توجه به فرم اختصاری، مدل پایه‌ای فازی بدینانه (BPCCP¹) به‌صورت رابطه (۳۷) است:

$$\text{Min } Z = E[Z] = fY + E[\tilde{c}]X$$

s. t.:

$$NEC\{aX = \tilde{d}\} \geq \alpha$$

$$bX \leq sY$$

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

(۳۷)

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

$$\text{Min } Z = fY + \left(\frac{C^1 + C^2 + C^3 + C^4}{4} \right) X$$

s. t.:

$$aX = (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4$$

$$bX \leq sY$$

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

(۳۸)

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 این رو، 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 [۴۹، ۴۲]:

$$\text{Min } Z = E[Z] + \xi(Z_{(\max)} - Z_{(\min)}) + \eta[d^4 - (1 - \alpha)d^3 - \alpha d^4]$$

s. t.:

$$aX = (1 - \alpha)d^3 + \alpha d^4$$

$$bX \leq sY$$

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

(۳۹)

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

$$Z_{(\max)} = fY + c^4X$$

$$Z_{(\min)} = fY + c^1X$$

$$E[Z] = fY + \left[\left(\frac{c^1 + c^2 + c^3 + c^4}{4} \right) \right] X$$

(۴۰)

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 [۴۲، ۴۹]:

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

برنامه‌ریزی استوار امکانی (مدل RPP-III). یکی دیگر از انواع برنامه‌ریزی استوار امکانی که در آن تصمیم‌گیرنده 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 [۴۲، ۴۹]:

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

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 تقویت‌شده 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 [۳۸]:

Initial Parameters w, p
For $l = 1$: number of objective function, do
Calculate the best objective value (f_i^)*
Calculate the worst objective value (f_i^-)
End
Evaluation the $f_1 + \delta \left(\frac{s_2}{r_2} + \frac{s_3}{r_3} \right) | f_i - s_i = \varepsilon_i$
Return the efficient solution

شکل ۲. شبه کد اپسیلون محدودیت تقویت شده

در رابطه فوق $r_i, i = 2, 3$ دامنه توابع هدف، $\varepsilon_i, i = 2, 3$ 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، به‌طور 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].

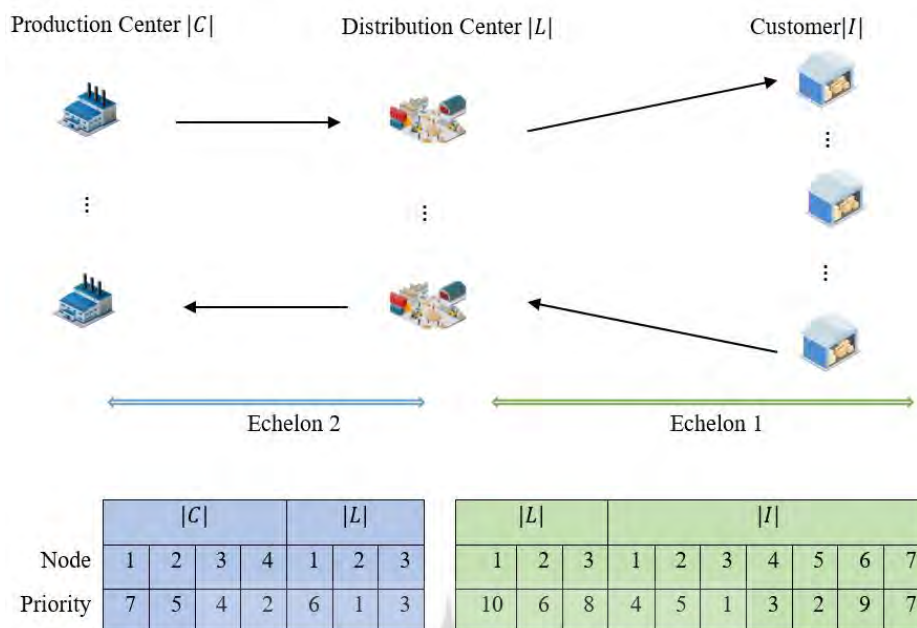
```

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 $(|C| + 2|L| + |I|) * |T|$ می‌باشد. برای رم‌گذاری 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 رمزگذاری 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 رمزگذاری 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	۰.۰۵	۰.۳۴	۰.۸۲	۰.۴۲	۰.۲۶	۰.۰۸	۰.۴۲	۰.۰۵	۰.۳۴	۰.۸۲	۰.۴۲	۰.۲۶	۰.۰۸	۰.۴۲	۰.۰۵
اولویت	۱	۷	۲	۴	۶	۵	۳	۹	۲	۶	۷	۵	۸	۱	۴

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.

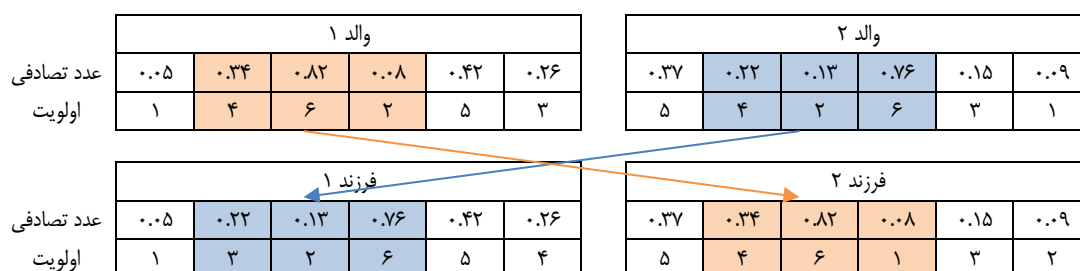
از جمله مهمترین عملگرهای به کار رفته در الگوریتم NSGA-II، عملگر ترکیب و جهش می‌باشد. در عملگر جهش تک نقطه‌ای، بر اساس پارامتر P_m که مقدار آن در تنظیم پارامتر بدست می‌آید؛ یک ژن انتخاب و به جای آن یک عدد تصادفی جدید جایگزین می‌گردد. در این صورت، راه حل جدید ایجاد می‌شود. شکل ۶ مکانیسم انجام عملگر جهش 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 نقطه‌ای

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 کروموزم 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.



شکل ۷. مکانیسم عملگر ترکیب دو نقطه‌ای

شاخص‌های مقایسه جواب کارا

هر یک از روش‌های ذکر شده در حل مسئله منجر به تولید راه حل‌های 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)
$MSI = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(\max_{k=1} f_k^{max} - f_k^{min} \right)^2}$	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	(MID ⁴)

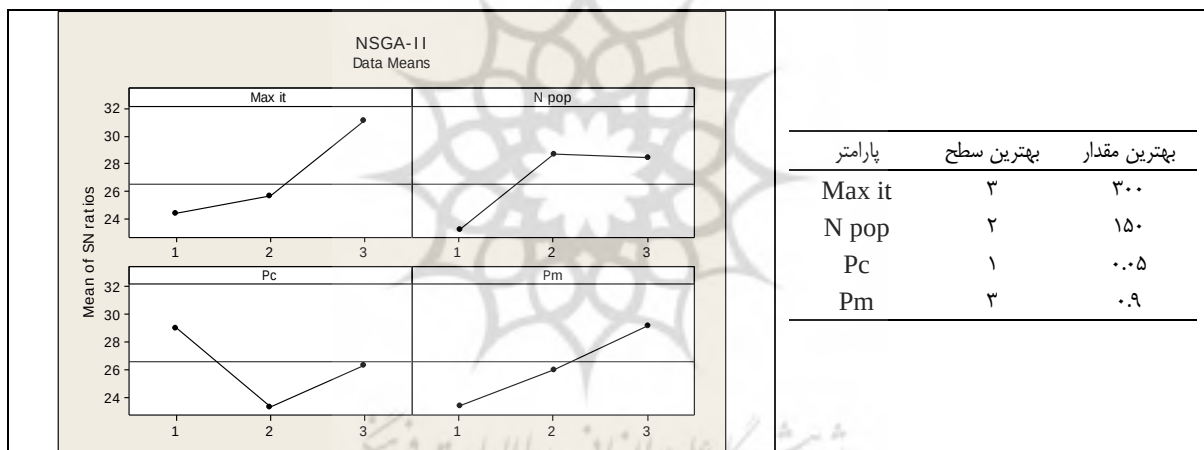
1. Number of Pareto Front
2. Maximum Spread Index
3. Space Metric Index
4. Minimum Ideal Distance

اختصار	تعریف	معادله
	باشد، کارایی بالاتری دارد. در این رابطه $\bar{L}$ ، تعداد جواب‌ها در مجموعه بهینه پارتو است [۲۱].	
(CPT ¹)	الگوریتمی که زمان محاسبات کمتری داشته باشد، مطلوب‌تر خواهد بود.	

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.



شکل ۸. نمودار متوسط نسبت SN در تنظیم پارامتر NSGA-II

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 اِپسیون 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^۲ برای تولید و شبیه‌سازی داده‌های فازی استفاده شده است [۴۰]. روش پیشنهادی این امکان را فراهم می‌کند تا هر نوع از داده‌های فازی با هر نوع تابع عضویت را بتوان در

1. CPU-Time
2. Mohtashami

نظر گرفت. برای اعداد فازی تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل، حد پایین و بالا به ترتیب برابر $\tilde{\varphi}_w = [2, 12]$ ، $\tilde{\omega}_v = [1, 8]$ و $\tilde{d}_{ipt} = [25, 5]$ می‌باشد. با در نظر گرفتن ۱۰ طبقه، فواصل پارامترهای غیرقطعی 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

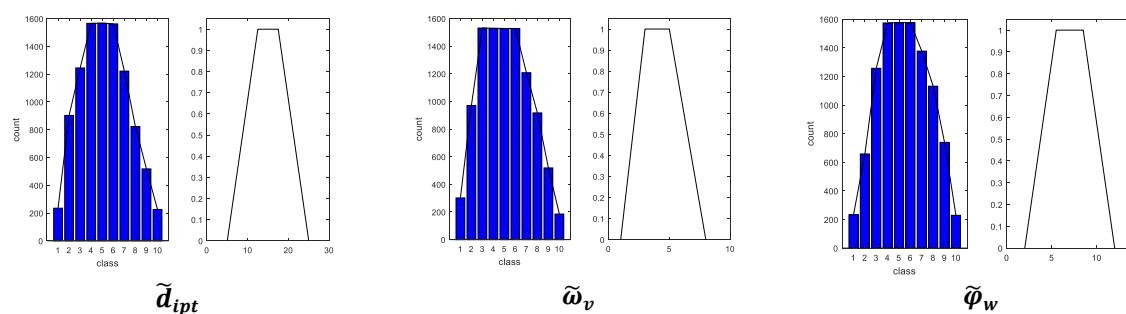
کلاس	طبقه بندی فواصل			درجه عضویت نقاط حدی		
	$\tilde{d}_{ipt}$	$\tilde{\omega}_v$	$\tilde{\varphi}_w$	$\tilde{d}_{ipt}$	$\tilde{\omega}_v$	$\tilde{\varphi}_w$
۱	[۵، ۷]	[۱.۰، ۱.۷]	[۲، ۳]	[۰.۰۰، ۰.۲۷]	[۰.۰۰، ۰.۳۵]	[۰.۰۰، ۰.۲۹]
۲	[۷، ۹]	[۱.۷، ۲.۴]	[۳، ۴]	[۰.۲۷، ۰.۵۳]	[۰.۳۵، ۰.۷۰]	[۰.۲۹، ۰.۵۷]
۳	[۹، ۱۱]	[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]

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

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

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		۴.۲۷۹		۳.۵۲۵		$w = 2$	
۱۰.۳۰۰		۸.۰۷۹		۴.۷۵۰		۲.۲۶۱		$w = 3$	
d^4		d^3		d^2		d^1			
$t = 2$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 1$	p	i
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	۶.۳۳۲	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

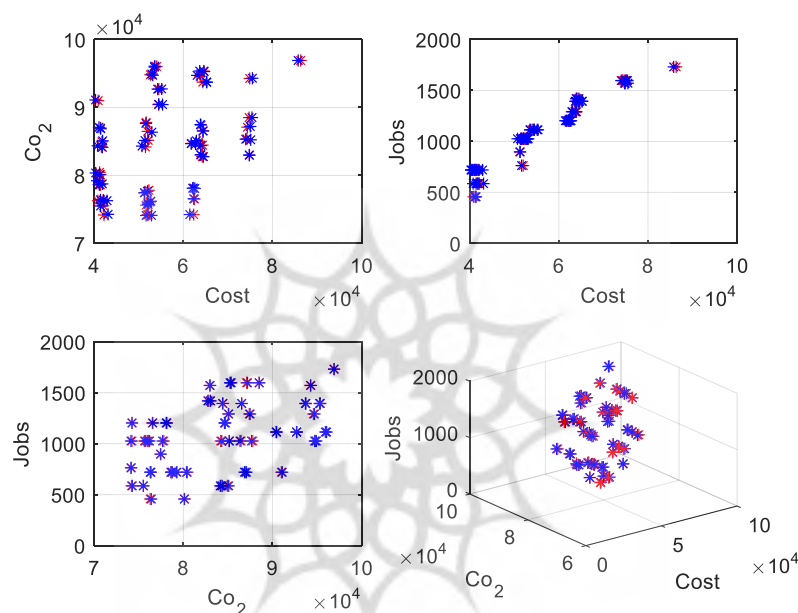
سایر پارامترهای مدل ریاضی نیز بر اساس تابع توزیع یکنواخت به صورت جدول ۶ نشان داده شده است. داده‌های مسئله به نحوی مقدار دهی شده است تا فضای موجه برای دستیابی به جواب‌های کارا وجود داشته باشد.

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

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\sim U [۵۰, ۸۰]$ kg	cd_{ip}	$\sim U [۱۰۰۰۰, ۱۲۰۰۰]$ \$	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
$[۰.۵, ۴]$ 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	$m\lambda$

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$m\lambda'$	۰.۸	M	۱۰۰۰۰
$h_{lpt}, pc_{cp}, dc_{lp}$	$\sim U [۲, ۴] \$$	ξ	۱۰
c_v	$\sim U [۹۰, ۱۲۰] \text{ kg}$	η	۵
c'_w	$\sim U [۱۰۰, ۲۰۰] \text{ kg}$		

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.

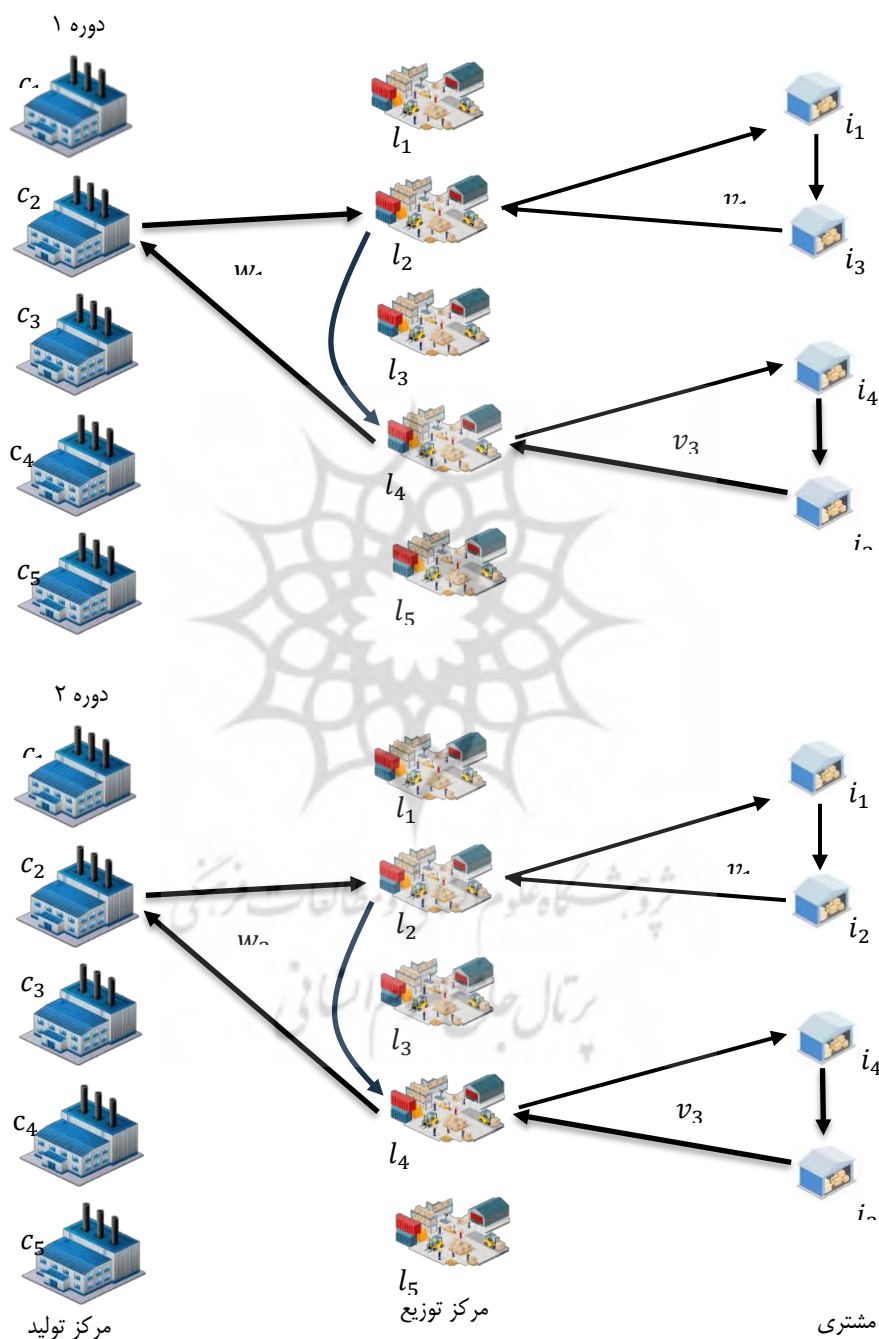


شکل ۱۰. جبهه پارتو بدست آمده بین کل توابع هدف مسئله

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 سائز 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 میابد، 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 ساینز 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. حمل‌ونقل 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

محصول	دوره ۱	دوره ۲
مرکز توزیع ۲	محصول ۱	۳۸.۱۸۱
مرکز توزیع ۲	محصول ۲	۳۹.۴۵۷
مرکز توزیع ۴	محصول ۱	۳۹.۸۸۹
مرکز توزیع ۴	محصول ۲	۴۰.۰۰۹
مرکز تولید ۲	محصول ۱	۷۹.۵۸۸
مرکز تولید ۲	محصول ۲	۷۹.۴۶۶

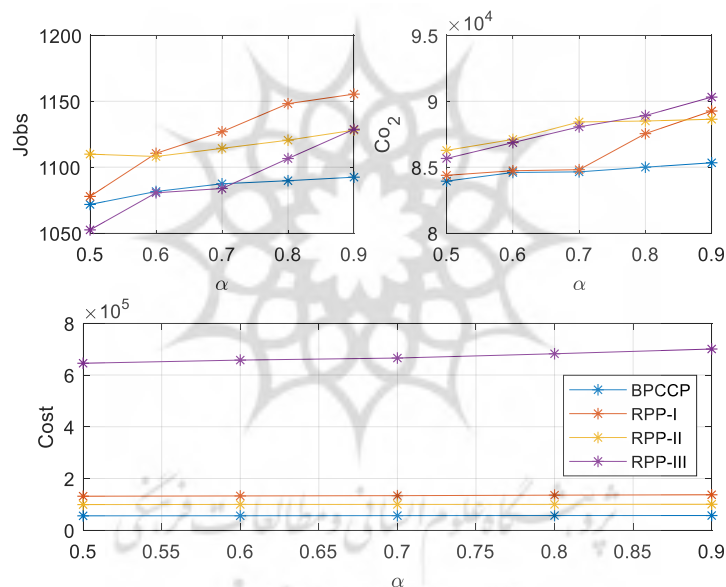
با توجه به نتایج جدول فوق، هیچ گونه محصولی در این جواب کارا در مرکز توزیع انبار نشده است. لذا هزینه‌های نگهداری در این جواب کارا برابر با ۰ بوده است. پس از بررسی اولین جواب کارا، به تحلیل حساسیت مدل ریاضی تحت مدل RPP-I، RPP-II، RPP-III و پرداخته شده است. از این رو با فرض ثابت بودن مقادیر $\xi = 10$ و $\eta = 5$ 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 برنامه‌ریزی

میانگین هزینه کل	میانگین انتشار CO ₂	میانگین فرصت شغلی	زمان حل
مدل BPCCP			
۵۵۶۲۹.۷۴	۸۳۹۳۹.۸۹	۱۰۷۱.۷۲	۴۲۵.۴۵
۵۵۸۸۴.۲۸	۸۴۵۹۷.۴۶	۱۰۸۱.۵۶	۴۱۰.۲۳
۵۶۴۰۳.۵۵	۸۴۶۴۴.۷۱	۱۰۸۷.۴۰	۴۱۹.۱۴
۵۶۷۰۸.۷۲	۸۴۹۹۸.۷۳	۱۰۸۹.۷۲	۴۳۴.۹۲
۵۶۷۵۰.۴۳	۸۵۳۳۴.۱۸	۱۰۹۲.۴۰	۴۳۷.۷۶
مدل RPP-I			
۱۳۱۴۶۳.۴۸	۸۴۳۸۱.۵۵	۱۰۷۷.۸۳	۳۷۶.۴۸
۱۳۲۵۴۱.۲۸	۸۴۷۳۱.۰۲	۱۱۱۰.۴۹	۳۵۹.۳۵
۱۳۳۵۶۱.۶۵	۸۴۸۰۸.۹۶	۱۱۲۶.۸۹	۶۸۴.۷۵
۱۳۵۵۴۸.۹۴	۸۷۵۴۶.۳۸	۱۱۴۸.۲۰	۳۲۲.۶۶
۱۳۷۰۴۲.۲۳	۸۹۲۶۰.۹۳	۱۱۵۵.۴۴	۳۴۷.۴۰
مدل RPP-II			
۹۹۰۷۵.۰۰	۸۶۲۷۴.۲۵	۱۱۰۹.۸۹	۴۲۱.۳۱
۹۹۶۷۷.۲۹	۸۷۱۰۸.۳۴	۱۱۰۸.۰۹	۴۱۵.۸۴
۹۹۷۱۷.۵۶	۸۸۴۳۲.۰۱	۱۱۱۴.۲۸	۴۱۹.۶۷
۹۹۸۷۲.۴۳	۸۸۵۰۱.۹۵	۱۱۲۰.۴۸	۴۲۲.۳۷
۱۰۰۳۵۲.۵۰	۸۸۶۳۶.۳۵	۱۱۲۸.۱۰	۴۱۶.۲۰
مدل RPP-III			

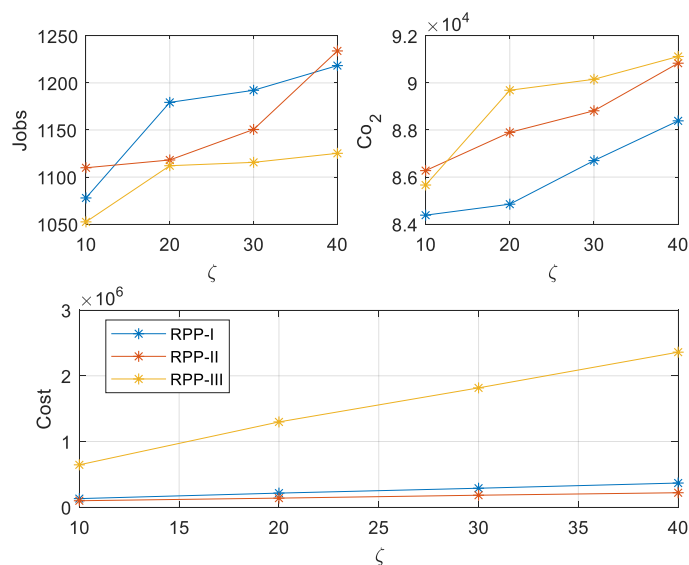
زمان حل	میانگین فرصت شغلی	میانگین انتشار CO_2	میانگین هزینه کل	
۳۶۷.۴۹	۱۰۵۲.۴۲	۸۵۶۶۲.۲۲	۶۴۵۳۰.۸۶	۰.۵
۳۷۱.۶۷	۱۰۸۰.۵۷	۸۶۸۶۳.۲۶	۶۵۷۶۳۹.۴۰	۰.۶
۳۹۷.۵۴	۱۰۸۳.۸۳	۸۸۰۵۸.۶۱	۶۶۵۵۰۰.۵۱	۰.۷
۳۸۴.۵۵	۱۱۰۴.۵۴	۸۸۹۱۶.۱۶	۶۸۲۱۱۸.۲۷	۰.۸
۳۶۶.۰۰	۱۱۲۸.۷۵	۹۰۳۱۷.۴۱	۷۰۰۴۷۲.۱۴	۰.۹

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.

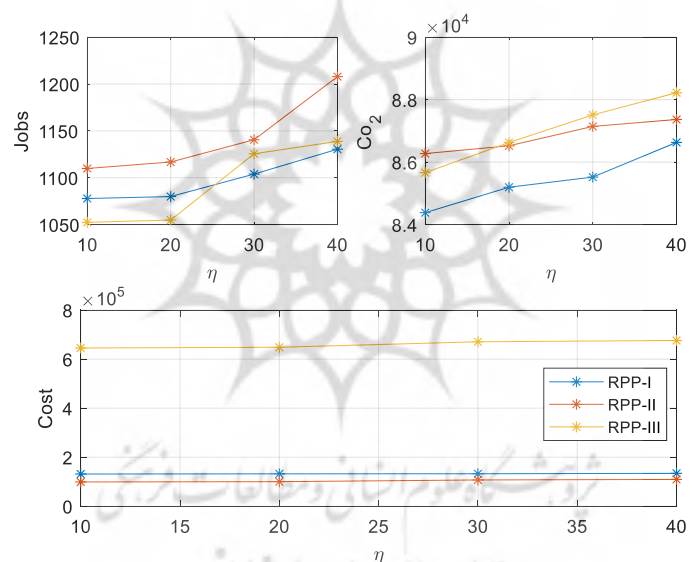


شکل ۱۲. تغییرات نرخ عدم قطعیت بر روی میانگین‌های جواب کارا

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

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

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ خرابی، قابلیت اطمینان مراکز احداث شده کاهش یافته و برای رفع محدودیت حداقل قابلیت اطمینان هر سطح از مسئله مکان‌یابی-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 [۵۰]:

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

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

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

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 اپسیلون 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	۱۰۳۴.۰۹
۸	۵۷۲۲۵.۸۰	۷۸۲۶۱.۶۷	۱۰۳۳.۲۳
۹	۶۳۱۷۰.۲۶	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 سایزهای بزرگتر

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

جدول ۱۴. شاخص‌های مقایسه در مثال‌های عددی مختلف

مسئله نمونه	NSGA-II					اپسیلون محدودیت تقویت شده				
	NPF	MSI	SM	MID	CPT	NPF	MSI	SM	MID	CPT
۱	۴۸	۷۱۹۸۸.۷۰	۰.۶۹	۴۵۱۳.۷۱	۳۵.۳۹	۴۸	۶۶۲۷۳.۵۷	۰.۳۳	۴۲۸۴.۳۹	۵۷۸.۴۸
۲	۴۴	۶۱۹۰۳.۴۰	۰.۴۶	۴۹۱۶.۴۵	۴۷.۰۸	۵۰	۷۱۱۷۷.۳۸	۰.۴۳	۴۲۹۸.۹۱	۸۱۶۶۶
۳	۴۲	۶۲۹۹۴.۳۷	۰.۷۷	۴۷۴۸.۶۳	۵۱.۴۴	۶۲	۶۹۸۹۴.۳۱	۰.۵۴	۴۲۷۸.۱۶	۱۲۷۵.۰۴
۴	۵۰	۶۱۷۹۴.۴۰	۰.۴۶	۴۹۹۰.۱۲	۶۸.۹۹	-	-	-	-	-
۵	۵۰	۶۲۶۸۳.۲۶	۰.۷۵	۴۷۵۷.۱۳	۸۳.۷۴	-	-	-	-	-
۶	۵۸	۶۱۲۵۹.۳۴	۰.۴۳	۴۳۰۵.۳۸	۱۰۲.۳۹	-	-	-	-	-
۷	۶۲	۶۹۱۲۱.۵۵	۰.۵۱	۴۱۸۸.۴۴	۱۲۲.۵۴	-	-	-	-	-
۸	۴۲	۶۵۰۸۵.۷۳	۰.۴۶	۴۷۲۲.۹۹	۱۵۰.۰۲	-	-	-	-	-
۹	۴۰	۷۳۵۱۰.۵۳	۰.۶۲	۴۶۸۴.۵۸	۱۷۵.۶۹	-	-	-	-	-
۱۰	۵۸	۶۸۱۱۹.۹۵	۰.۷۷	۴۲۲۸.۰۱	۲۰۵.۱۳	-	-	-	-	-
۱۱	۴۸	۷۰۹۱۳.۳۱	۰.۵۹	۴۸۰۴.۸۷	۲۴۰.۱۶	-	-	-	-	-
۱۲	۵۲	۶۲۸۱۴.۹۲	۰.۷۳	۴۶۴۴.۰۲	۲۷۸.۲۱	-	-	-	-	-
۱۳	۶۱	۷۴۸۱۱.۹۸	۰.۶۹	۴۹۵۷.۶۲	۳۴۴.۷۲	-	-	-	-	-
۱۴	۵۲	۷۱۸۰۳.۷۵	۰.۷۰	۴۷۴۸.۰۵	۴۲۳.۲۲	-	-	-	-	-
۱۵	۴۴	۶۷۱۱۰.۴۲	۰.۵۸	۴۶۵۴.۷۳	۵۰۶.۱۱	-	-	-	-	-

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 کوتاه‌تر 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 می‌گردد. برای دستیابی به تصمیمات بهینه این مدل سه تابع هدف پایداری تحت عناوین 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 شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

1. Afandizadeh, 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. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization: 23rd European Conference*, 16-33. 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. (In Persian).
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. Fallahrafti, A., Ardjmand, E., Young Li, 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. (In Persian).
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. *The vehicle routing problem*. 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. 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.
32. 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.
33. Li, H., Li, S. (2020). Two-echelon location routing problem with multi-fuzzy and pick-delivery model and algorithm. *Cyber Security Intelligence and Analytics*. 600-610. Springer International Publishing.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Mohtashami, A. (2014). A novel meta-heuristic-based method for deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgments. *Applied Soft Computing*, 23, 530-545.
41. 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.
42. 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.
43. 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).
44. 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).
45. 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.
46. 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.
47. Perwira Redi, A.A.N., Sekaringtyas, N.N., Astiana, H.B., Lipierda, R.I., Asih, A.M.S., Sopha, B.M. (2023). Two Echelon Vehicle Routing Problem for Disaster Mapping Process Using Cooperated Vehicles Assignment. *Smart and Sustainable Supply Chain and Logistics—Challenges, Methods and Best Practices*, 2, 233-242. Cham: Springer International Publishing.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. Raff, S. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers & Operations Research*, 10(2), 63-211.
52. Seifbarghy, M., Esmaeili, 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.
53. 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.
54. 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.

55. Stodola, P. (2020). Hybrid ant colony optimization algorithm applied to the multi-depot vehicle routing problem. *Natural Computing*, 19(2), 463-475.
56. 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.
57. 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.
58. Temiz, S., Kazanç, H. C., Soysal, M., & Çimen, M. (2025). A probabilistic bi objective model for a humanitarian location routing problem under uncertain demand and road closure. *International Transactions in Operational Research*, 32(2), 590-625.
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. Zeinodin Zadeh, S., Amiri, M., Olfat, L., Pishvae, 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).

