

Paper Type: Original Article



Presenting A Multi-Objective Mathematical Model of a Location-Routing-Inventory Problem for Hazardous Materials Considering Elastic Demand and Queuing System

Parisa Bolhasani¹, Mohammad Fallah^{1*}, Reza Tavakkoli-Moghaddam², Akbar Alam Tabriz³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; parisa.bolhasanii@gmail.com

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; mohammad.fallah43@yahoo.com

² Department of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran; tavakoli@ut.ac.ir

³ Department of Industrial Management and IT, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; a-tabriz@sbu.ac.ir

Citation:



Bolhasani, P., Fallah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Alam Tabriz, A. (2021). Presenting a multi-objective mathematical model of a location-routing-inventory problem for hazardous materials considering elastic demand and queuing system. *Journal of decisions and operations research*, 6(2), 210-241.

Received: 25/04/2021

Reviewed: 10/06/2021

Revised: 04/07/2021

Accept: 20/07/2021

Abstract

Purpose: Increasing the population, followed by increasing human needs and problems related to transportation, has led managers to seek for solutions by the goal of increasing economic profitability and reducing costs. Therefore, in this study, a set of location decisions, vehicle routing and inventory management has been used as the main tools to face with these problems.

Methodology: model has been solved and validated by Gams software using Epsilon method in small scale. Since this is one of the NP-Hard problems, meta-heuristic algorithms, MOPSO, MOFF, MOIWO, NSGA-II have been used to solve large-scale problems.

Finding: The results of all comparative criteria show the superiority of the MOIWO algorithm over other algorithms and the appropriate efficiency of these methods in solving the mathematical model, especially in high dimensions and short times.

Originality / Value: In this study, the design of hazardous materials transportation network is considered by considering the decisions related to location, routing, inventory. For this purpose, a new multi-objective mathematical model with the objectives of minimizing cost, minimizing travel time and maximum social responsibility is presented. This mathematical model can be used in different areas and different dimensions.

Keywords: Sustainable supply chain, Hazardous material, Risk, MOIWO.

Corresponding Author: mohammad.fallah43@yahoo.com

doi:10.22105/DMOR.2021.265606.1295



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



نوع مقاله: پژوهشی



ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی - موجودی مواد خطرناک با در نظر گرفتن تقاضای کشسان و سیستم صف

پریسا بوالحسنی^۱، محمد فلاح^۱، رضا توکلی مقدم^۲، اکبر عالم تیریز^۳

^۱گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
^۲گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
^۳دانشکده مدیریت و حسابداری، گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

هدف: افزایش جمعیت و به دنبال آن افزایش نیازهای انسانی و مشکلات مربوط به حوزه حمل‌ونقل، موجب شده است تا مدیران سازمان‌ها به دنبال راه‌حلهایی به منظور افزایش سودآوری اقتصادی و کاهش هزینه‌ها برآیند. لذا در این مطالعه از مجموعه تصمیمات مکان‌یابی، مسیریابی وسایل نقلیه و مدیریت موجودی تحت عنوان ابزارهای اصلی مقابله با چنین مشکلاتی استفاده شده است.

روش‌شناسی پژوهش: مدل در ساینز کوچک به کمک روش اسپیلون محدودیت با نرم‌افزار گمز حل و اعتبارسنجی شده است. از آنجا که این مسأله جز مسائل *NP-Hard* به شمار می‌رود برای حل مسائل ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های فرا ابتکاری *MOPSO*, *MOFF*, *MOIWO*, *NSGA-II* استفاده شده است.

یافته‌ها: نتایج حاصل از تمامی معیارهای مقایسه‌ای حاکی از برتری الگوریتم *MOIWO* نسبت به سایر الگوریتم‌ها و کارایی مناسب این روش‌ها در حل مدل ریاضی به‌خصوص در ابعاد بالا و زمان‌های کوتاه است می‌باشد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: در این مطالعه طراحی شبکه حمل‌ونقل مواد خطرناک با در نظر گرفتن تصمیمات مربوط به مکان‌یابی، مسیریابی، موجودی مدنظر می‌باشد، برای این منظور یک مدل ریاضی جدید چندهدفه با اهداف کمینه‌نمودن هزینه، کمینه نمودن زمان سفر و بیشینه‌سازی مسئولیت اجتماعی ارائه شده است. این مدل ریاضی قابلیت استفاده در حوزه‌های مختلف و ابعاد متفاوت را به همراه دارد.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین پایدار، مواد خطرناک، ریسک، *MOIWO*.

۱- مقدمه

با رشد جمعیت و به دنبال آن افزایش نیازهای جامعه بشری، مدیران سازمان‌ها و شرکت‌ها درصدد یافتن استراتژی‌هایی برای افزایش سودآوری اقتصادی و کاهش هزینه‌ها برآمدند. بهبود خدمات به مشتریان و کاهش هزینه‌ها، دو چالش اصلی و بزرگ برای هر شرکت در

* نویسنده مسئول

mohammad.fallah43@yahoo.com

10.22105/DMOR.2021.265606.1295



فضای تجاری رقابتی محسوب می‌شود. از مجموعه تصمیمات مکان‌یابی، مسیریابی وسایل نقلیه و مدیریت موجودی تحت عنوان ابزارهای اصلی مقابله با چنین چالش‌هایی یاد می‌شود. احداث مراکز جدید خدمت‌دهی در بهترین نقطه جغرافیایی و یافتن مسیرهای بهینه وسایل نقلیه از جمله تصمیماتی است که می‌تواند بستر لازم به‌منظور کاهش هزینه‌ها و بهبود خدمت‌رسانی به مشتریان را فراهم آورد. مدیریت موجودی نیز یکی دیگر از تصمیمات مهم عملیاتی است که شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا پاسخگویی بهتری را با هزینه کمتری ارائه دهند. تعداد محدودی از مطالعات در طراحی شبکه زنجیره تأمین^۱ وجود دارد که به‌صورت همه‌جانبه و هم‌زمان تمامی این موارد را مورد تحلیل و بررسی قرار داده باشد، در صورتی که شواهد نشان داده است که ادغام این تصمیمات منجر به طراحی بهتر شبکه زنجیره تأمین می‌شود، زیرا شرکت را قادر می‌سازد تا فرایند و اقدامات سیستم‌های لجستیکی خود را به‌صورت کارآمد و بهینه مدیریت نماید، که این موضوع، کاملاً اشاره به مفهوم مدیریت زنجیره تأمین^۲، یعنی پیاده‌سازی و کنترل تمام عملیات از سمت تأمین‌کننده‌ها تا مشتری‌ها به‌منظور کارایی هرچه بیشتر دارد (ظهوری و توکلی مقدم،^۳ ۲۰۱۴). تقریباً نزدیک به سه دهه است که بحث مدیریت زنجیره تأمین مطرح گردیده است و براساس آمار و ارقام موجود، کشورها و سازمان‌هایی که این دانش را به کار گرفته‌اند. پیشرفت‌های چشم‌گیری در حوزه‌های مربوطه داشته‌اند و همچنین سود سرشار و صرفه‌جویی‌های کلان مالی از بابت به‌کارگیری این نگرش نصیبشان شده است. از سوی دیگر تمرکز ویژه مدیران بر روی جنبه‌های اقتصادی زمینه این مسأله را فراهم آورد تا سازمان‌های بین‌المللی به‌منظور جلوگیری از پدیدار شدن و یا کاستن مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی قوانینی را وضع، و تمامی صنوف را ملزم به اجرای آن نمایند. درنهایت پرداختن و در نظر گرفتن تمامی جوانب اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی موجب پدیدار شدن بحث پایداری شد (طالب زاده حسینی^۴، ۲۰۱۵؛ ولیدی و همکاران^۵، ۲۰۱۵). تلفیق تصمیمات مربوط به مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی یکی از راهکارهای مناسب جهت پیشرفت مفهوم پایداری در طراحی زنجیره تأمین پایدار می‌باشد. از این رو مسئله مکان‌یابی - مسیریابی^۶، شامل تعیین تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات و به‌طور هم‌زمان تعیین مجموعه مسیره‌های مرتبط جهت خدمت‌رسانی به مشتریان و کاهش هزینه‌ها مورد اهمیت می‌باشد (محمود سلطانی و همکاران^۷، ۲۰۱۳).

از دیگر ارکان اصلی پایداری، تاثیرات اجتماعی^۸ به شمار می‌رود که به‌ندرت در ادبیات به آن پرداخته شده است. محققان بر این باورند که انجام فعالیت در رابطه با پروژه و ساخت‌وسازهای زیر بنایی بزرگ تنها خودشان را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد و به جامعه و محیط اطراف آن‌ها نیز سرایت می‌کند به بیان بهتر آن‌ها معتقدند که جوامع اطراف محل کار باید از نظر اقتصادی و اجتماعی مورد احترام قرار گیرند. تاثیرات زیست‌محیطی^۹ نیز از جمله ارکان اصلی و مهم دیگری است که به طرق مختلف همچون انتشار گازهای گلخانه‌ای، انرژی و سوخت اتلافی توسط وسایل نقلیه و غیره، مفهوم پایداری را تحت تاثیر قرار می‌دهد (پن و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۳). در راستای پیاده‌سازی این مفهوم از پایداری رویکردهای مختلفی همچون سیستم صف در طراحی شبکه زنجیره تأمین را می‌توان اثربخش برشمرد. در این میان شبکه‌های حمل‌ونقل و به دنبال آن شبکه‌های حمل‌ونقل مواد خطرناک نقش مهمی را در طراحی زنجیره تأمین پایدار دارند. در کشورهای صنعتی حمل‌ونقل مواد خطرناک از اهمیت شایانی برخوردار است، از آن جهت که تمامی دسته‌های مواد خطرناک در مکانی تولید و سپس به یک مکان دیگر منتقل می‌گردند. باوجود آنکه بخش حمل‌ونقل مربوط به مواد خطرناک از دیگر بخش‌های حمل‌ونقل امن‌تر می‌باشد (دات یو^{۱۱}، ۲۰۰۰) اما کماکان حوادث فراوانی در ارتباط با آن اتفاق می‌افتد. به همین جهت امنیت افراد، امنیت زیست‌محیطی و سایر امنیت‌های مرتبط با زنجیره تأمین مواد خطرناک در کنار مسائل اقتصادی و اجتماعی به‌صورت یک هدف اساسی شکل گرفته است. بنابراین ایجاد بستر مناسب به‌منظور تصمیم‌گیری برای طراحی زنجیره تأمین پایدار با در نظر گرفتن افزایش نرخ اشتغال و افزایش

^۱Supply Chain Network Design (SCND)

^۲Supply Chain Management (SCM)

^۳Zahiri & Tavakkoli-Moghaddam

^۴Talebzadehosseini

^۵Validi et al.

^۶Location Routing Problem (LRP)

^۷Mahmood Soltani et al.

^۸Social Impact (SI)

^۹Environmental Impact (EI)

^{۱۰}Pan et al.

^{۱۱}DOT U



نرخ توسعه اقتصادی منطقه در کنار سایر جنبه‌های زیست‌محیطی شبکه طراحی شده، می‌تواند نقش چشمگیری در کاهش نگرانی‌های جهانی در رابطه با مفهوم پایداری داشته باشد. شبکه‌های زنجیره تأمین دارای ماهیتی پویا می‌باشند، لذا این امر موجب عدم قطعیت بسیاری از پارامترهای ورودی نظیر هزینه، ظرفیت، تقاضا و سایر پارامترهای مربوطه می‌شود و از آنجا که این امر به شدت بر طراحی شبکه و تصمیمات مربوطه تاثیرگذار می‌باشد بایستی مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد (ژاله چیان و همکاران^۱، ۲۰۱۶). با توجه به ضرورت شبکه زنجیره تأمین پایدار، این مقاله درصدد ایجاد و طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار مواد خطرناک می‌باشد که در آن تصمیمات مربوط به مکان‌یابی، مسیریابی و مدیریت موجودی تحت شرایط عدم قطعیت و به صورت هم‌زمان اعمال شده است. به این منظور در ابتدا ضمن مروری بر مطالعات انجام شده در گذشته، مدل ریاضی و توضیحات مسأله ارائه شد و به منظور ارزیابی عملکرد مدل نتایج تجربی برای مسائل در ابعاد کوچک و بزرگ توسط نرم‌افزار گمز^۲ و الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات^۳، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب^۴، الگوریتم چندهدفه کرم شب‌تاب^۵ و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه علف‌های هرز تهاجمی^۶ تولید و مقایسه بین این روش‌های کاربردی و پیشنهادی مطرح شده است. در نهایت نیز نتایج آزمایش‌های محاسباتی، تجزیه و تحلیل حساسیت و مطالعه موردی بیان شده است.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش تمرکز اصلی بر روی مطالعات مرتبط می‌باشد که به چهار دسته مجزا تفکیک می‌شوند: مکان‌یابی- مسیریابی- موجودی در شبکه زنجیره تأمین، زنجیره تأمین پایدار، زنجیره تأمین مواد خطرناک و موضوع مسئولیت اجتماعی در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین.

۲-۱- مدیریت موجودی کالا، مسیریابی وسایل حمل و نقل و موقعیت مکانی در زنجیره تأمین

بررسی توأم تصمیمات مربوط به مدیریت موجودی و مکان‌یابی به طور چشمگیری به یکی از رویکردهای مهم تبدیل شده که در مطالعات پیشین به چشم می‌خورد. ایده اصلی این موضوع توسط (باومل و ولف^۷، ۱۹۵۸) با در نظر گرفتن یک مسأله مکان‌یابی و هزینه ثابت موجودی مطرح شده است که به منظور حل آن نیز از روش تجزیه دانتزیگ-ولف^۸ استفاده کردند. لی و همکاران^۹ (۲۰۱۸) به بررسی تصمیمات هم‌زمان مکان‌یابی- موجودی در یک زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند و به منظور حل آن از یک روش ابتکاری جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. دای و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۸) به منظور حل مشکلات موجودی- مکان‌یابی و ارائه یک مدل بهینه‌سازی برای اقلام فاسدشدنی از الگوریتم ژنتیک ترکیبی^{۱۱} و جستجوی هماهنگی ترکیبی^{۱۲} به منظور کمیته‌سازی هزینه‌های سیستم استفاده نمودند. داسکین و همکاران^{۱۳} (۲۰۰۲) به معرفی یک روش جدید برای ادغام تصمیمات مربوط به مکان‌یابی و مدیریت موجودی تحت سیاست (Q,r) در بخش توزیع پرداختند و برای حل آن از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده کردند. ابوالحاج و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۶) به منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی و تصمیمات مربوط به مدیریت موجودی و مکان‌یابی یک شبکه زنجیره تأمین را در نظر گرفته و برای نزدیک‌تر کردن مدل به شرایط حاکم در دنیای واقعی، عدم قطعیت تقاضاها را با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند.

^۱Zhalechian et al.

^۲GAMS

^۳Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

^۴Non-dominated Sorting Genetic algorithm (NSGA- II)

^۵Multi Objective Firefly (MOFF)

^۶Multi Objective Invasive Weed Optimization (MOIWO)

^۷Baumol and Wolfe

^۸Dantzig-wolfe Decomposition

^۹Li et al.

^{۱۰}Dai et al

^{۱۱}Hybrid Genetic Algorithm (HGA)

^{۱۲}Hybrid Harmony Search (HHS)

^{۱۳}Daskin et al.

^{۱۴}Alhaj et al.

سرانجام لیو و همکاران^۱ (۲۰۲۰) برای مقابله با مشکل موجودی-مکان‌یابی در یک زنجیره تامین از یک رویکرد دو فازی مبتنی بر تئوری صف و تکنیک‌های بهینه‌سازی بهره گرفته و در نهایت از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی مناسب با روش جستجوی مستقیم استفاده کردند.

ادبیات زیر شامل موضوعات دیگری است، در حقیقت مجموعه تصمیمات مدیریت موجودی و مسیریابی از جمله تصمیمات مهم عملیاتی می‌باشند که به طور مستقیم بر روی کاهش هزینه‌ها و افزایش خدمت‌دهی به مشتریان تاثیر دارند و به صورت مجزا منجر به ایجاد جواب‌های زیر-بهینه می‌شوند. واتسون-گاندی و همکاران^۲ (۱۹۷۳) به عنوان اولین محققانی شناخته شده‌اند که به بررسی مسائل مکان‌یابی-مسیریابی پرداختند و پس از آن‌ها مسائل مختلف دیگری در این باره مطرح شد (تو و ویگو^۳، ۲۰۰۲؛ ربانی و همکاران^۴، ۲۰۱۹).

در نظر گرفتن تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی در کنار یکدیگر مسائل مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی را پدید می‌آورد که اخیراً در بخش از مطالعات به آن‌ها اشاره شده است (لئو و لی^۵، ۲۰۰۳). از جمله نخستین پژوهش‌هایی می‌باشد که در این زمینه مطرح شده است و برای حل از یک روش ابتکاری دو فازی بهره گرفته‌اند. نکو قدیری و همکاران^۶ (۲۰۱۴) یک مدل موجودی-مسیریابی-مکان‌یابی^۷ دو هدفه‌ی جدید به منظور بررسی یک سیستم چند محصولی و چند دوره‌ای ارائه دادند که در این مدل تقاضای احتمالی مشتریان متاثر از نیاز مشتریان تلقی می‌شود. توکلی مقدم و اترودی^۸ (۲۰۱۳) به توسعه یک مدل مسیریابی و وسایل نقلیه برای کالاهای فاسدشدنی پرداختند و در نهایت به منظور حل آن از نرم‌افزار لینگو^۹ بهره بردند. نبی زاده و نسب^{۱۰} (۲۰۱۴) یک مسأله مکان‌یابی-مسیریابی پویا با فرض تقاضاهای فازی و ظرفیت محدود را در نظر گرفتند. دنگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۴) یک مدل *LRI* چندهدفه تدارکات معکوس در سیستم لجستیک یکپارچه را توسعه دادند و به منظور حل و دستیابی پاسخ‌های نزدیک به بهینه، یک الگوریتم ژنتیکی آنالیز شبیه‌سازی شده^{۱۲} را استفاده کردند. جاوید و آزاد^{۱۳} (۲۰۱۰) به طرح یک مدل *LRI* برای یک سیستم زنجیره تامین تصادفی پرداختند و برای حل از الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری جستجوی ممنوعه^{۱۴} و الگوریتم‌های آنالیز شبیه‌سازی استفاده کردند. ژاله چیان و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تصادفی احتمالی از یک شبکه زنجیره تامین موجودی، موقعیت مکانی مسیریابی حلقه بسته را ایجاد کردند و با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی تصادفی احتمالی برای مقابله با عدم اطمینان و یک الگوریتم متا هیوریستیک هیبرید توسعه یافته برای مقابله با مشکلات مطرح شده پرداختند.

۲-۲- زنجیره تامین پایدار

مدیریت زنجیره تامین پایدار دربرگیرنده ابعاد اقتصادی، پایداری اجتماعی و زیست محیطی است. بنابراین این مفهوم از مدیریت زنجیره تامین سبز گسترده‌تر است. به عبارت دیگر مدیریت زنجیره تامین سبز بخشی از مدیریت زنجیره تامین پایدار است. در طی چند سال اخیر ظهور فناوری‌های نوین و ایجاد تحولات عظیم در بازارهای جهانی ضرورت توجه به این مقوله را بیش از پیش ساخته است. پژوهش‌های متعددی در این راستا انجام شده است که به ارائه برخی از آن‌ها می‌پردازیم. قاسمی و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۷) در مقاله‌ای با

^۱Liu et al.

^۲Watson-Gandy et al.

^۳Toth and Vigo

^۴Rabbani et al.

^۵Liu and Lee

^۶Nekooghadirli et al.

^۷Location-Routing-Inventory (LRI)

^۸Tavakoli Moghadam and Otrodi

^۹Lingo

^{۱۰}Nabizadeh and Nasab

^{۱۱}Deng et al.

^{۱۲}Sequence Alignment by Genetic Algorithm (SAGA)

^{۱۳}Javid and Azad

^{۱۴}Tabu Algorithm

^{۱۵}Ghasemi et al.





بهره‌گیری از فرایند تحلیل شبکه‌ای به ارزیابی و اولویت‌بندی شاخص‌های تاثیر گذار در زنجیره تامین پایدار مواد غذایی پرداختند. فهیم نیا و همکاران^۱ (۲۰۱۳) برای یک زنجیره تامین حلقه بسته، مدل بهینه‌سازی را مطرح نمود که برای نخستین بار تاثیرات ناشی از انتشار گاز کربن در زنجیره تامین حلقه بسته را مورد بررسی قرار داده است. رعیت پیشه و همکاران^۲ (۲۰۱۸) بررسی شاخص‌های زنجیره تامین پایدار در صنعت پتروشیمی را مورد پژوهش قرار دادند و در نهایت به کمک رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره، اهمیت و روابط میان شاخص‌ها را مشخص ساختند. وفایی نژاد و همکاران^۳ (۲۰۱۹) یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه را به منظور برنامه‌ریزی زنجیره تامین چند سطحی، چند محصولی، چند دوره‌ای توسعه داده‌اند که به طور هم‌زمان تمامی ابعاد پایداری را بررسی و بهبود می‌بخشد. ژانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۶) یک مدل استراتژیک جدید برای طراحی شبکه زنجیره تامین با چندین کانال توزیع ارائه نمودند که تمام ابعاد پایداری در طراحی این مدل نقش داشته و در نهایت به کمک الگوریتم اصلاح شده چندمنظوره کلنی زنبور عسل^۵ حل شده است. تسو و همکاران^۶ (۲۰۱۸) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت را به منظور طراحی یک شبکه زنجیره تامین پایدار ارائه نمودند و به منظور غلبه بر مشکلات مربوط به عدم قطعیت، از یک روش تعاملی مبتنی بر برنامه‌نویسی تصادفی دو فاز و برنامه‌نویسی احتمالی فازی استفاده و سرانجام، تجزیه و تحلیل عددی، کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در پژوهش‌های اخیر به اثرات اجتماعی که سومین جنبه پایداری می‌باشد بیشتر از گذشته اشاره شده است به طور مثال دهقانیان و منصور^۷ (۲۰۰۹) طراحی یک شبکه ریکاوری را با در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مورد مطالعه قرار دادند و با بهره‌گیری از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی اثرات اجتماعی را محاسبه نمودند. همچنین یک مدل ریاضی سه هدفه با در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های پایداری و صنعت لاستیک به عنوان مطالعه موردی ارائه نمودند. ژاله چیان و همکاران^۸ (۲۰۱۷) با ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه تمامی جنبه‌های پایداری را بررسی و اشتغال و توسعه منطقه‌ای را به عنوان اقدامات مسئولیت اجتماعی در مدل پیشنهادی مطرح نمودند، در نهایت نیز از یک روش حل ترکیب دو فاز بر اساس برنامه‌ریزی احتمالی برای حل مدل استفاده کردند. ورسه ای و پلایاکویسی^۹ (۲۰۱۵) یک مدل کلی برنامه‌ریزی ریاضی به منظور طراحی زنجیره تامین پایدار با در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های پایداری و اجرا در یک مطالعه موردی در صنعت آبمیوه کشور استرالیا مطرح نمودند و برای حل از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده استفاده نمودند. محمدی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۸) مدلی جهت برنامه‌ریزی یکپارچه مالی-فیزیکی زنجیره تامین حلقه بسته پایدار ارائه نمودند، اهداف این مدل ریاضی تمامی جنبه‌های پایداری یعنی بیشینه‌سازی سود، کمینه‌سازی اثرات منفی زیست‌محیطی و اجتماعی و شاخص‌های مالی را شامل می‌شود. به منظور حل نیز از روش برنامه‌ریزی آرمانی و مطالعه موردی صنعت بازیافت پلاستیک بهره گرفته شده است. پیشوایی و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۲) یک زنجیره تامین تحت شرایط عدم قطعیت ارائه نمودند که یک مدل ریاضی با دو تابع هدف به جهت کمینه‌سازی هزینه‌های کل و بیشینه‌سازی اثرات اجتماعی را شامل می‌شود، در نهایت از یک مطالعه موردی و روش برنامه‌ریزی روبااست-فازی استفاده شده است.

۲-۳- شبکه حمل و نقل مواد خطرناک

امروزه طراحی شبکه زنجیره تامین نقش به‌سزایی را در حمل و نقل و برنامه‌ریزی ارتباطات بر عهده دارد که در این میان حمل و نقل مواد خطرناک به دلیل وجود ریسک بالاتر، در مقابل سایر دسته‌های حمل و نقل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. همین امر موجب شده تا محققان بیش از پیش به این موضوع توجه ویژه‌ای داشته باشند. آشتکالا و انو^{۱۲} (۱۹۹۶) برای سه ماده خطرناک گاز کلر، اسیدسولفوریک

^۱Fahimnia et al.

^۲Rayatpisha et al.

^۳Vafaeezhad et al.

^۴Zhang et al.

^۵Multi Objective Artificial Bee Colony Algorithm (MOABC)

^۶Tsao et al.

^۷Dehghanian and Mansour

^۸Zhalechian et al.

^۹Varsai and Polyakovskiy

^{۱۰}Mohamadi et al.

^{۱۱}Pishvae et al.

^{۱۲}Ashtakala et al.



و گاز مایع مدلی با اهداف کمیته سازی هزینه سفر و بهینه سازی ریسک بر اساس ریسک محیط زیستی و ریسک جمعیت ارائه نمودند. توکلی مقدم و همکاران (۲۰۱۲) در مقاله ای به منظور حل مسأله مسیریابی حمل و نقل مواد خطرناک یک تابع هدف چندگانه شامل کمیته کردن ریسک هزینه و تاخیرات با لحاظ کردن محدودیت تعداد وسایل نقلیه و زمان ارسال کالا به مشتری ارائه نمودند. گزارا^۱ (۲۰۱۳) طراحی یک شبکه حمل و نقل مواد خطرناک را به صورت یک جریان شبکه چند کالایی در دو سطح ارائه نموده است و از روش صفحه برش به منظور حل استفاده کرده است. هاوو و همکاران^۲ (۲۰۱۹) یک روش جدید بهینه سازی چندهدفه به منظور یافتن مسیرهای مطلوب در تدارکات مواد خطرناک با در نظر گرفتن محدودیت های ترافیکی ارائه نموده اند، برای حل مدل پیشنهادی به ترتیب یک الگوریتم ژنتیک منفرد^۳ و یک الگوریتم ژنتیک وزن انطباقی^۴ ارائه شده است. یک مطالعه موردی در دنیای واقعی نیز ارائه شده است تا کارایی مدل پیشنهادی و روش راه حل مرتبط با آن را نشان دهد. نوگچی و همکاران^۵ (۲۰۲۰) به توسعه یک رویکرد جدید به منظور تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف با حوادث حمل و نقل مواد خطرناک پرداخته اند. در رویکرد توسعه یافته، با درهم آمیختن شبکه حادثه حمل و نقل مواد خطرناک و عوامل محیطی حمل و نقل، بر اساس داده های حادثه، از سناریوهای تصادف نمونه برداری می شود. در نهایت نیز روش پیشنهادی برای تجزیه و تحلیل سناریوی حادثه می تواند ارزیابی ریسک حمل و نقل مواد خطرناک را تسریع کند و به پیشبرد ارزیابی ریسک به مدیریت ریسک کمک کند.

۲-۴- رویکرد صف بندی در زنجیره تامین

خودمانی یزدی و همکاران^۶ (۲۰۱۹) یک مشکل مکان یابی سیستم هاب را که به طور هم زمان دو هدف کمیته سازی هزینه های کل و حداقل سازی بیشترین طول مسیر را دنبال می کند بررسی کرده اند و از سیستم صف بندی $M/M/1$ و $M/M/C$ برای امکانات هاب استفاده نموده اند. مدل ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی $GVIWO$ حل و در ادامه با الگوریتم های HSA و $NSGA-II$ مقایسه شده است. یوسفی بادادی و همکاران^۷ (۲۰۱۷) در مقاله ای یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چندمنظوره^۸ را برای یک زنجیره تامین پتروشیمی تحت شرایط عدم اطمینان ارائه نمودند که در این مدل، دو سیستم نوبت دهی کارآمد در مراکز تولید و بازیافت نایلون پلاستیک اعمال می شود که در آن ها از شبکه جکسون نیز استفاده می شود. اهداف مدل این است که حداقل تأخیر در ارائه محصولات، هزینه کل و هزینه حمل و نقل به حداقل برسد. سعیدیو همکاران^۹ (۲۰۱۵) در مقاله ای تعیین ظرفیت در یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته هنگامی که یک سیستم صف در جریان معکوس ایجاد می شود را در نظر گرفته اند. سیستم نوبت دهی موجب ایجاد هزینه هایی در سیستم می شود لذا تصمیم گیرنده با چالش تعیین ظرفیت تسهیلات از طریق ایجاد تعادل بین هزینه های نوبت دهی و هزینه های ثابت به منظور احداث مراکز جدید روبه رو می باشد. به منظور حل از رویکرد برنامه نویسی $De Novo$ نیز استفاده شده است. وحدانی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۲) یک مدل جدید به منظور طراحی یک شبکه قابل اعتماد از امکانات در زنجیره تامین حلقه بسته تحت عدم اطمینان ارائه نمودند. مدل ارائه شده دو هدف اصلی یعنی حداقل سازی هزینه های کل و هزینه های مورد انتظار حمل و نقل را بررسی می کند. برای حل این مدل یک روش جدید راه حل ترکیبی با ترکیب رویکرد بهینه سازی قوی، تئوری صف و برنامه نویسی چندهدفه فازی معرفی شده است. سین هوم هو و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۸) در یک مقاله زنجیره های تامین با چندین مرحله از ساختار شبکه را در نظر گرفته اند. زنجیره های تامین درونزا هستند به این معنا که شامل سیستم صف می باشند زیرا زمان هدایت هر سفارش به سفارشات موجود در سیستم بستگی دارد. محتشمی و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۰) یک زنجیره تامین سبز با ملاحظه لجستیک جلو و معکوس را طراحی و از سیستم صف

^۱Gzara

^۲Hu et al.

^۳Single Genetic Algorithm (SGA)

^۴Adaptive Weight Genetic Algorithm

^۵Noguchi et al.

^۶Khodemani-Yazdi et al.

^۷Yousefi-Babadi et al.

^۸Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP)

^۹Saeedi et al.

^{۱۰}Vahdani et al.

^{۱۱}Hum et al.

^{۱۲}Mohtashami et al.



برای بهینه‌سازی زمان حمل‌ونقل و انتظار شبکه ناوگان حمل‌ونقل استفاده نمودند. یک مثال عددی برای مدل طراحی شده در اندازه کوچک مورد بحث قرار گرفته و با روش‌های دقیق حل شده است. علاوه بر این، یک روش فرا ابتکاری برای حل مسئله بزرگ استفاده شده است. یوسفی نژاد عطاری و همکاران^۱ (۲۰۲۰) در مقاله‌ای به منظور تعیین حداقل تعداد پرستار مورد نیاز در هر شیفت کاری با در نظر داشتن کمترین هزینه در بخش اورژانس مدلی را ارائه و به منظور حل از روش سری زمانی و ابزار ARIMA جهت بررسی سیستم صف با ظرفیت محدود از مدل M/M/C/K استفاده شده است. در نهایت نیز به مقایسه میزان کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و الگوریتم زنبورها^۲ پرداخته شده است. آواخ درستانی و هممتی^۳ (۲۰۱۹) یک شبکه زنجیره تامین برای کالاهای فاسدشدنی طراحی و به منظور کاهش زمان انتظار در مراکز توزیع از یک سیستم صف استفاده نموده‌اند. کمینه‌سازی کل هزینه‌های شبکه و به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای دو هدف اصلی مدل ارائه شده می‌باشد که به منظور حل آن نیز از روش‌های تصمیم‌گیری استفاده شده است. ژاله چیان و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تصادفی احتمالی از یک شبکه زنجیره تامین موقعیت مکانی مسیریابی بسته را ایجاد کردند آن‌ها با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی تصادفی احتمالی برای مقابله با عدم اطمینان و یک الگوریتم فرا ابتکاری هیبرید توسعه یافته به مقابله با مشکلات مطرح شده پرداختند. ژاله چیان و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای به منظور مکان‌یابی شبکه هاب به طور هم‌زمان مسائل اقتصادی، پاسخگویی به مشتریان و مسائل اجتماعی را مورد بررسی قرار داده‌اند و جنبه‌های مثبت اثرات مسئولیت اجتماعی که پیش‌تر گفته شد پرداخته‌اند. به منظور ارائه و درک بهتر مطالعات انجام شده، شرح مختصری از پژوهش‌های انجام شده در قالب جدولی در ضمیمه ارائه شده است.

۳- مدل‌سازی ریاضی

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه ارائه شده است که به طراحی یک شبکه زنجیره تامین پایدار برای مواد خطرناک می‌انجامد. از این‌رو مدل ارائه شده شامل سه تابع هدف می‌باشد، تابع هدف اول علاوه بر اینکه مباحث اقتصادی رو مورد توجه قرار می‌دهد و مجموع هزینه‌ها را کمینه می‌سازد، از طریق رویکرد نرخ بازده سرمایه^۴ چگونگی تامین مالی این هزینه‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد که به شرح زیر ارائه شده است

۳-۱- روش تامین مالی

پیش‌بینی و بودجه‌بندی کامل پروژه‌های عمرانی و زیر بنایی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه بسیار دشوار و بعضاً غیر ممکن می‌باشد. همچنین برخی از پروژه‌های بزرگ با روش‌های مختلف تامین اعتبار، سعی در جذب سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی دارند. از این‌رو با توجه به اهمیت هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت در توجیه‌پذیری طرح‌ها، بررسی نحوه تامین مالی احداث تأسیسات، امری مهم و ضروری می‌باشد که در مدل پیشنهادی در این پژوهش سه روش تامین مالی به منظور ایجاد مراکز مورد نیاز در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از:

– تامین از بانک‌های داخلی (تسهیلات بانکی).

– تامین مالی خارجی (تسهیلات ارزی).

– آورده توسط سرمایه‌گذار (بودجه دولتی).

به منظور محاسبه و بررسی این دست از هزینه‌ها می‌توان با کمک روش‌ها و رویکردهای علم اقتصاد سرمایه‌گذاری‌های ثابت را به سرمایه‌های یکنواخت سالیانه^۵ تبدیل نمود و به‌عنوان بخشی از تابع هدف مربوط به هزینه‌ها مورد بررسی قرار داد. همچنین متغیر بودن درصد نرخ بازده سرمایه بر اساس مجموع سرمایه دریافتی به ازای هر روش نیز یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار در جذب بهترین سرمایه‌گذار می‌باشد. مدل مربوطه در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

^۱Yousefi Nejad Attari et al.

^۲Bee Algorithm (BA)

^۳Darestani and Hemmati

^۴Rate of Return (ROR)

^۵Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)

Table1- The most important researched studies.

سال	الگوریتم حل حل دقیق	عدم قطعیت		هدف
		فرا ابتکاری	ابتکاری	
۲۰۱۸	*			عوامل محیطی
۲۰۱۸	*			هزینه
۲۰۱۸	*			سود
۲۰۱۸	*			هزینه، عوامل محیطی
۲۰۱۹	*	*		هزینه، زمان، محیطی
۲۰۱۹	*	*		سود، زمان، هزینه
۲۰۱۹	*	*		محیطی، هزینه
۲۰۲۰	*	*		محیطی، زمان، هزینه
۲۰۲۰	*			ریسک، زمان، هزینه
۲۰۲۰	*	*		محیطی، زمان، هزینه
۲۰۲۰	*	*		محیطی، زمان، هزینه
۲۰۲۱	*	*		محیطی، زمان، هزینه
۲۰۲۱	*			ریسک، هزینه
۲۰۲۱	*			محیطی، زمان، هزینه
۲۰۲۱	*			ریسک، زمان، هزینه
۲۰۲۱	*			سود
۲۰۲۱	*			زمان، هزینه
۲۰۲۱	*			ریسک، محیطی
۲۰۲۱	*	*		ریسک، محیطی، هزینه، اجتماعی
۲۰۲۱	*			محیطی، هزینه
۲۰۲۱	*	*		ریسک، محیطی، هزینه
۲۰۲۱	*	*		ریسک، محیطی، هزینه
۲۰۲۱	*			هزینه
۲۰۲۱	*	*		ریسک، زمان، هزینه
۲۰۲۱	*	*		محیطی، زمان، هزینه
تحقیق حاضر	*	*		هزینه، زمان، محیطی، تقاضا، اجتماعی، صف

پارامترها.

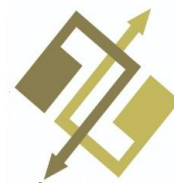
- $\left(\frac{A}{P}, int\%, years\right)$ فاکتور تبدیل مقدار سرمایه‌گذاری اولیه به سری یکنواخت سالیانه.
- B_f بودجه کل به ازای هر روش تأمین مالی f .
- $FixCost_{ff}^p$ هزینه تأسیس مرکز توزیع z به ازای محصول p به ازای روش تأمین مالی f .

متغیر تصمیم.

- ρ_{zf} اگر متغیر مقدار ۱ بگیرد یعنی مرکز توزیع z از سناریوی تأمین مالی f استفاده می‌کند.

$$\sum_j \sum_f F_{jf} \times FixCost_{jf}^p \times \rho_{jf} \times \left(\frac{A}{P}, int\%, years\right), \quad (1)$$

$$\sum_j F_{jf} \times EC_{jf} \leq B_f \quad \forall f. \quad (2)$$



تابع هدف دوم و سوم در این پژوهش به ترتیب اثرات اجتماعی و زمان را مورد بررسی قرار می‌دهد. در اکثر پژوهش‌ها به منظور پرداختن به اثرات و پیامدهای زیست‌محیطی فاکتورهای ساده و معمولی همچون سرعت وسیله نقلیه، وزن وسیله نقلیه و غیره مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش انرژی و زمان اتلاف شده در صف مرکز توزیع به‌عنوان عاملی تأثیرگذار در زمان و شرایط زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. همچنین مطالعات نشان داده است که استفاده از سیستم نوبت‌دهی $M/M/c$ در طراحی شبکه زنجیره تأمین به‌عنوان ابزاری برای مطالعه و تحلیل زمان انتظار و طول صف منجر به نتایج مفیدی شده است. از این رو، یک سیستم نوبت‌دهی $M/M/c$ برای مدل‌سازی صف ایجاد شده توسط وسایل نقلیه در نظر گرفته می‌شود که به شرح زیر قابل بررسی می‌باشد.

۲-۳- سیستم صف $M/M/c$

در مقاله حاضر نیز از آنجا که زمان‌های ورودی وسایل نقلیه به مراکز توزیع ثابت نبوده و به دلیل وجود عواملی همچون عوامل محیطی، فیزیکی، ترافیک، اختلال در مسیرهای ورودی و غیره دارای نوسان می‌باشد از یک توزیع پواسون برای محاسبه زمان انتظار وسایل نقلیه استفاده شده است، بدین صورت که فرض شده است با لحاظ نمودن زمان اوج، متوسط نرخ سرویس‌دهی و ورودی ثابت بوده و از توزیع پواسون تبعیت می‌کنند. با توجه به مطالب بیان شده، از یک مدل صف $M/M/C$ استفاده شده است که پارامترها و متغیرهای تصمیم مربوطه به‌منظور پیاده‌سازی این مدل به شرح زیر می‌باشند.

پارامترها.

- Ψ_m تعداد سرویس‌دهندگان در مرکز توزیع m .
- τ_m^t نرخ سرویس‌دهی در مرکز توزیع m در دوره زمانی t .

متغیرهای تصمیم.

- λ_m^t نرخ ورودی وسایل نقلیه به مرکز توزیع m در دوره زمانی t .
- NT_{km}^t تعداد وسایل نقلیه فرستاده شده از تامین‌کننده k به مرکز توزیع m در دوره زمانی t .
- WT_{km}^t زمان انتظار در مرکز توزیع m در دوره زمانی t .
- بر اساس نظریه گراس (۲۰۰۸) زمان انتظار در مرکز توزیع m و نرخ ورودی λ_m^t به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$WT_m^t = \frac{\left(\frac{\lambda_m^t}{\tau_m^t}\right)^{\Psi_m \tau_m^t}}{(\Psi_m - 1)! (\Psi_m \tau_m^t - \lambda_m^t)^2} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\Psi_m - 1} \left(\frac{\lambda_m^t}{\tau_m^t}\right)^n \frac{1}{n!} + \left(\frac{\lambda_m^t}{\tau_m^t}\right)^{\Psi_m} \frac{1}{\Psi_m!} \times \frac{\lambda_m^t}{\tau_m^t - \lambda_m^t} \right\}^{-1}, \quad (3)$$

$$\lambda_m^t = \sum_k NT_{km}^t. \quad (4)$$

۳-۳- تقاضای کشسان

کاربران و استفاده‌کنندگان شبکه حمل‌ونقلی با توجه به پارامترهای تأثیرگذار مختلفی قادر به انتخاب مسیر یا به‌اصطلاح شبکه عبوری دلخواه خود می‌باشند، در واقع میزان تقاضا برای هر توزیع‌کننده مقداری ثابت نیست و بسته به موقعیت جغرافیایی و مکان هر توزیع‌کننده ممکن است تغییر پیدا کند. در واقع آنچه تقاضای بیشتر برای یک تسهیل را در بر دارد، ویژگی‌های مثبت آن تسهیل می‌باشد. در این مقاله نیز یک سیستم حمل‌ونقل به‌منظور جابجایی مواد خطرناک با مسیرهای متعدد که طی فرایند مسیریابی بررسی می‌شود و مراکز توزیع از

پیش تعیین نشده‌ای که طی فرایند مکان‌یابی حل و بررسی می‌شود، در نظر گرفته شده است. لذا این گونه نتیجه‌گیری می‌شود که بین هر جفت از مبدأ و مقاصد وابسته به مکان این مراکز، تقاضا به صورت تابعی از جذابیت و سودمندی است که به صورت $W_{ij}(U_i + U_j)$ تعریف می‌شود، و این بدین معنا است که تقاضا بین هر جفت مبدأ و مقصد i و j وابسته به سودمندی ناشی از جذابیت آن تسهیل در گره i و j می‌باشد (خسروی و اکبری، ۲۰۱۴).

برای تسهیل در محاسبات متغیر سودمندی به کمک خاصیت جمع‌پذیری و تابع تقاضا طبق فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$U_i = \sum_{k, d_{ik} \leq D} \sum_m \sum_q u_{ik}^{mq} h_k^{mq}, \quad (5)$$

$$W_{ij}(U_i + U_j) = (W_{ij}^{max} - W_{ij}^{min}) \times C_{ij} \times (U_i + U_j) + W_{ij}^{min}, \quad (6)$$

$$C_{ij} = \frac{1}{U_i^{max} + U_j^{max}}. \quad (7)$$

$$U_i^{max} = \sum_{k, d_{ik} \leq D} \sum_m \text{Max}_q \{u_{ik}^{mq}\}, \quad (8)$$

$$u_{ik}^{mq} = \frac{A_k^{mq}}{d_{ik}}. \quad (9)$$

۳-۴- مدل‌سازی ریاضی مسأله

اندیس‌ها.

- i تأمین‌کننده $i \in I$
- j توزیع‌کننده $j \in J$
- c تقاضا $c \in C$
- k مشتری $k \in J \cup C$
- v وسیله نقلیه $v \in V$
- t دوره زمانی $t \in T$
- f مجموعه روش‌های تأمین مالی $f \in F$
- n سطوح ظرفیت‌های احداث در مراکز توزیع $n = \{1, \dots, N\}$
- m مجموعه مودهای حمل و نقلی.
- o مجموعه نرخ‌های بازگشت روش‌های تأمین مالی.

متغیرهای تصمیم.

- In_{it}^1 میزان موجودی پایانی در دوره زمانی t در تأمین‌کننده i .
- Q_{it} میزان محصول تولید شده در دوره زمانی t توسط تأمین‌کننده i .
- M_{ijt} مقدار محصولی که در دوره زمانی t از تأمین‌کننده i به توزیع‌کننده j می‌رود.
- Z_{ijt} اگر انبار توزیع j به تأمین‌کننده i تخصیص یابد، ۱، در غیر این صورت صفر.
- y_{jt}^n اگر انبار توزیع j با ظرفیت n به روش تأمین مالی f احداث شود، ۱، در غیر این صورت صفر.
- In_{jt}^2 میزان موجودی پایانی محصول در دوره زمانی t در توزیع‌کننده j .
- X_{jkt} اگر نیازمندی‌های تقاضا مشتری k توسط انبار j تأمین گردد، ۱، در غیر این صورت صفر.
- HH_{kkvt} اگر محصولی در دوره زمانی t توسط وسیله نقلیه v از طریق مسیر موجود میان نقطه k به k حمل شود، ۱، در غیر این صورت صفر.
- H_{kkvt} مقدار محصول حمل شده توسط وسیله نقلیه v از نقطه k به k .



- TT_k^t مدت زمان طی شده برای رسیدن به نقطه جدید در دوره زمانی t .
- T_k^t مدت زمان طی شده به منظور تحویل محموله به مشتری در دوره زمانی t .
- VU_{vt} اگر از وسیله نقلیه v در دوره زمانی t استفاده شود، 1 ، در غیر این صورت صفر.
- XB_f میزان استفاده از نوع تامین مالی f در کل شبکه.
- YO_{f0} اگر میزان استفاده از نوع تامین مالی f در کل شبکه در بازه درصدی بازگشت سرمایه 0 باشد، 1 ، در غیر این صورت صفر.

پارامترها.

- CH_i هزینه نگهداری یک واحد محصول در تامین کننده i .
- CS_i ظرفیت تامین کننده i .
- Q_{max} بیشترین میزان محصول تولیدشده از تولیدکننده i در دوره زمانی t .
- In_i^{01} میزان موجودی اولیه تامین کننده i .
- CT_{ij} هزینه حمل و نقل هر واحد محصول در واحد مسافت از تامین کننده i به توزیع کننده j .
- d_{ij}^1 فاصله میان تامین کننده i و توزیع کننده j .
- R_{ij} عدد اولویت ریسک مربوط به مسیر میان دو گره i و j .
- R_{kkv} عدد اولویت ریسک مربوط به مسیر میان دو گره k و v .
- R_{jn} عدد اولویت ریسک مربوط به مکان یابی توزیع کننده j .
- R_{Max} حداکثر ریسک مورد قبول.
- EC_{jf} هزینه احداث توزیع کننده j به روش تامین مالی f .
- WT_j زمان انتظار در توزیع کننده j .
- CD_j ظرفیت انبار توزیع j .
- FS_{jn} تعداد فرصت های شغلی ثابت ایجادشده در صورت احداث مرکز توزیع j با سطح ظرفیت n .
- VS_{jn} تعداد فرصت های شغلی متغیر ایجادشده در صورت احداث مرکز توزیع j با سطح ظرفیت n .
- W_{em} اهمیت وزن معیار اشتغال.
- W_{de} اهمیت وزن معیار توسعه منطقه ای.
- α نرخ تخلیه در ساعت.
- Ur_j نرخ بیکاری در گره j .
- Ev_{jn} ارزش اقتصادی احداث مرکز توزیع j با سطح ظرفیت n .
- rd_j سطح توسعه منطقه ای در گره j .
- A_{jnm} میزان جذابیت توزیع کننده j با مود حمل و نقل m و سطح ظرفیت n .
- In_j^{02} میزان موجودی اولیه توزیع کننده j .
- U_{jkmn} سودمندی که گره j از مشتری k با مود حمل و نقل m و ظرفیت n دریافت می کند.
- d_{jk}^2 فاصله میان توزیع کننده j و مشتری k .
- dT_{kk} فاصله زمانی میان K تا k .
- FC_v هزینه ثابت وسیله نقلیه.
- $Big O$ یک عدد بسیار بزرگ است.
- CV_v ظرفیت وسایل نقلیه.
- B^f بودجه کل به ازای روش تامین مالی f .
- D_{kt} تقاضای کشسان مربوط به مشتری k در دوره زمانی t .
- S تعداد وسیله نقلیه موجود در سیستم.
- Bin_{f0} حد بالایی بازه درصدی 0 برای روش تامین مالی f .

$$Max Z_1 = \sum_j \sum_f \left(\bar{E}C_{jf} \times \sum_n \left(y_{jn}^n \sum_o YO_{fo} \right) \right) \times \left(\frac{A}{P}, int\%, years \right)$$

$$+ \left(\sum_t \sum_v FC_v UV_{vt} + \sum_i \sum_j \sum_t \bar{C}T_{ij} M_{ijt} + \sum_k \sum_k \sum_v \sum_t \bar{C}T_{kk} H_{kkvt} \right) \quad (10)$$

$$+ \sum_i \sum_t CH_i^1 \times In_{it}^1 + \sum_j \sum_t CH_j^2 \times In_{jt}^2.$$

$$Max Z_2 = W_{em} \left(\sum_j \sum_n \sum_f (FS_{jn} + VS_{jn}) UR_j \times Y_{jf}^n \right) + W_{ed} \left(\sum_j \sum_n \sum_f EV_j^n Y_{jf}^n (1-rd_j) \right). \quad (11)$$

$$Min Z_3 = \sum_c \sum_t T_c^t. \quad (12)$$

مدل ارائه شده شامل سه تابع هدف می‌شود. تابع هدف اول تابع هدف اول مجموع هزینه‌های احداث، هزینه‌های حمل و نقل مواد خطرناک و هزینه‌های موجودی را کمینه می‌کند، همچنین چگونگی تأمین مالی این هزینه‌ها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. بخش اول این تابع هدف مربوط به هزینه‌های احداث مراکز توزیع و بخش دوم اشاره به چگونگی تأمین مالی این هزینه‌ها دارد. بخش سوم نیز به ترتیب مربوط به هزینه ثابت وسایل نقلیه، هزینه‌های حمل کالا بین مراکز تأمین کننده و توزیع کننده و هزینه‌های حمل کالا بین مراکز توزیع و مشتریان می‌باشد. بخش چهارم نیز هزینه‌های مربوط به موجودی و نگهداری در مراکز تأمین را در نظر می‌گیرد. تابع هدف دوم نیز به منظور پیشینه‌سازی اثرات مثبت و اثرگذار اجتماعی در نظر گرفته شده است. بخش اول این تابع هدف اشاره به پیشینه‌سازی فرصت‌های شغلی ایجاد شده با در نظر گرفتن نرخ بیکاری دارد و در ادامه بخش دوم این تابع هدف پیشینه‌سازی توسعه وضعیت اقتصادی با توجه به میزان رشد توسعه اقتصادی مناطق مختلف را شامل می‌شود. تابع هدف سوم نیز حداکثر زمان حمل و نقل میان هر جفت مبدا و مقصد را مینیمم می‌سازد.

محدودیت‌ها.

$$In_{it}^{01} + Q_{it} - \sum_j M_{ijt} = In_{it}^1 \quad \forall i, t=1, \quad (13)$$

$$In_{i(t-1)}^1 + Q_{it} - \sum_j M_{ijt} = In_{it}^1 \quad \forall i, t>1, \quad (14)$$

$$Q_{it} \geq Q_i^{Max} \quad \forall i, t, \quad (15)$$

$$In_j^{02} - \sum_c D_{ct} \times \sum_v X_{jcv} + \sum_i M_{ijt} = In_{jt}^2 \quad \forall i, t=1, \quad (16)$$

$$In_{j(t-1)}^2 - \sum_c D_{ct} \times \sum_v X_{jcv} + \sum_i M_{ijt} = In_{jt}^2 \quad \forall i, t \geq 1, \quad (17)$$

$$CS_i \leq In_{it}^1 \quad \forall i, t, \quad (18)$$

$$In_{jt}^2 \leq \sum_n (CD_{jn} \times \sum_f y_{jn}^n) \quad \forall j, t, \quad (19)$$

$$\sum_j \sum_n y_{jn}^n \leq 1 \quad \forall j, \quad (20)$$

$$\sum_i Z_{ij} \leq \sum_f \sum_n y_{jf}^n \quad \forall j, t, \quad (21)$$

$$X_{jcv} \geq \sum_f \sum_n y_{jf}^n \quad \forall j, c, v, t, \quad (22)$$

$$M_{ijt} \geq bigM \times Z_{ij} \quad \forall i, j, \quad (23)$$

$$HH_{kcv} \geq \sum_j X_{jkv} \quad \forall k, c, v, t, \quad (24)$$

$$HH_{ckv} \geq \sum_j X_{jkv} \quad \forall k, c, v, t, \quad (25)$$

$$\sum_v \sum_j X_{jkv} \leq 1 \quad \forall k, t, \quad (26)$$





$$\sum_v H_{kkvt} + \sum_v HH_{kkvt} \geq 1 \quad \forall k, k', v, t, \quad (27)$$

$$\sum_j \sum_c X_{jcv} \times D'_c \leq CV_v \quad \forall v, t, \quad (28)$$

$$H_{kkvt} \geq HH_{kkvt} \times bigM \quad \forall k, k', v, t, \quad (29)$$

$$\sum_K H_{kcv} \cdot D'_c \times \sum_k HH_{kcv} \geq \sum_c H_{cc'vt} \quad \forall c, v, t, \quad (30)$$

$$\sum_k HH_{kkvt} \leq 1 \quad \forall k, v, t, \quad (31)$$

$$\sum_c H_{jcv} \leq \sum_c X_{jcv} \times D'_c \quad \forall j, v, t, \quad (32)$$

$$H_{kjvt} = 0 \quad \forall k, j, v, t, \quad (33)$$

$$HH_{kkvt} = 0 \quad \forall k, v, t, \quad (34)$$

$$\sum_k \sum_v H_{kcv} \geq D'_c \quad \forall c, t, \quad (35)$$

$$TT_c^t = \sum_c \sum_v HH_{ccvt} \times (TT_c^t + dT_{cc} + \alpha \times D'_c) \quad \forall c, t, \quad (36)$$

$$TT_c^t \geq \sum_j \sum_v HH_{jcv} \times dT_{jc} \quad \forall c, t, \quad (37)$$

$$T_c^t = TT_c^t + \sum_v \sum_j X_{jcv} \times WT_{jvt} \quad \forall c, t, \quad (38)$$

$$T_c^t \leq Tmax \quad \forall c, t, \quad (39)$$

$$\sum_{ijt} R_{ij}^1 \times M_{ijt} + \sum R_{kkv}^2 \times H_{kkvt} + \sum_j \sum_f \sum_n Y_{jfn} \times R_{jn}^3 \leq R_{Max}, \quad (40)$$

$$\sum_j \sum_n EC_{jfn} \times y_{jfn} = XB_j \quad \forall f', \quad (41)$$

$$XB_j \leq B^f \quad \forall f', \quad (42)$$

$$\sum_o YO_{fo} \leq 1 \quad \forall f', \quad (43)$$

$$\sum_o YO_{fo} \times Bin_{fo} \geq XB_j \quad \forall f', \quad (44)$$

$$\sum_j \sum_c X_{jcv} \leq VU_{vt} \times bigM \quad \forall t, v, \quad (45)$$

$$\sum_v VU_{vt} \leq S \quad \forall t. \quad (46)$$

محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب میزان موجودی محصول مربوط به تولیدکنندگان در انتهای دوره برای دوره زمانی اول و دوره زمانی دوم به بعد را تضمین می‌کند. محدودیت ۱۵ ظرفیت تولید مربوط به تولیدکنندگان را محدود می‌سازد. محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ نیز به ترتیب میزان موجودی محصول مربوط به توزیع‌کنندگان در انتهای دوره برای دوره زمانی اول و دوره زمانی دوم به بعد را تضمین می‌کند. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ نیز به ترتیب ظرفیت انبار مربوط به تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان را محدود می‌سازد. محدودیت ۲۰ بیان می‌کند که در هر نقطه تنها با یک ظرفیت و تنها توسط یکی از روش‌های تأمین مالی f می‌توان انبار توزیع احداث کرد. محدودیت ۲۱ نشان‌دهنده شرط تخصیص هر انبار توزیع به تأمین‌کننده می‌باشد. محدودیت ۲۲ نیز نشان‌دهنده شرط تخصیص محصول از انبار توزیع به مشتری می‌باشد. محدودیت ۲۳ حداکثر مقدار محصول حمل شده بین i و j را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵ نشان می‌دهد که اگر هیچ وسیله نقلیه‌ای در دوره زمانی t به تقاضای k پاسخگو نباشد هیچ جریانی نباید اتفاق بیفتد. محدودیت ۲۶ بیان می‌دارد که تنها یک وسیله نقلیه از یک انبار توزیع مجاز است تا نیازمندی‌های تقاضا مشتریان را برآورده سازد. محدودیت ۲۷ بیان می‌کند که در یک دوره زمانی نمی‌توان هم‌زمان از k به k' و بالعکس حرکت نمود. در یک محدودیت ۲۸ نیز مربوط به محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه موجود در سیستم می‌باشد. محدودیت ۲۹ نیز نشان‌دهنده میزان محصول جابه‌جاشده بین دو نقطه k و k' می‌باشد. محدودیت ۳۰ نیز نشان‌دهنده میزان محصول جابه‌جاشده بین دو نقطه k و k' می‌باشد. محدودیت ۳۱ ارتباط بین نقاط k با یکدیگر را محدود می‌سازد. محدودیت ۳۲ نشانگر تعادل میان میزان محصولات حمل شده و میزان تقاضای مشتریان می‌باشد. محدودیت ۳۳ شرط ممنوعیت حرکت از نقاط تقاضا به توزیع را متذکر می‌شود. محدودیت ۳۴ نیز شرط ممنوعیت حرکت و مسیریابی از یک مرکز تقاضا به همان مرکز را بیان می‌دارد. محدودیت ۳۵ تضمین می‌کند که تقاضای هر نقطه در هر دوره زمانی باید در همان دوره تأمین شود. محدودیت ۳۶ بیان‌گر مدت‌زمان رسیدن به نقطه جدید است. محدودیت ۳۷ زمان رسیدن به نقاط جدید برای شروع مسیر از توزیع‌کننده را محاسبه می‌کند. محدودیت ۳۸ نیز مدت‌زمان لازم به منظور رسیدن محصول از سفارش‌گیری تا دریافت توسط مشتری را شامل می‌شود. محدودیت ۳۹ تضمین می‌کند که مدت‌زمان رسیدن محصول به دست مشتری از یک زمان مشخص نباید تجاوز کند. محدودیت ۴۰ نیز مجموع RPN تحمیل شده به سیستم حمل و نقل مواد خطرناک مربوط به مسیریابی و مکان‌یابی را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۴۱ و ۴۲ نیز به ترتیب نیز بیان می‌کند که از هر روش تأمین مالی به چه میزان استفاده شده و اینکه مجموع هزینه‌های ثابت مصرف‌شده برای احداث مراکز توزیع توسط روش تأمین مالی f نباید از کل

بودجه سرمایه‌گذاری تجاوز کند. محدودیت ۴۳ نشان می‌دهد که از هر روش تأمین مالی تنها مجاز به استفاده در یک بازه مالی هستیم. محدودیت ۴۴ نشان می‌دهد که میزان استفاده از هر روش تأمین مالی در چه بازه درصدی قرار می‌گیرد. محدودیت ۴۵ تعداد وسایل نقلیه استفاده شده در هر دوره زمانی را شامل می‌شود. محدودیت ۴۶ بیان می‌دارد که تعداد کل وسایل نقلیه استفاده شده در فرایند مواد خطرناک باید کمتر از وسایل نقلیه موجود در سیستم باشد.

۴- رویکرد و راه حل پیشنهادی

به منظور تأیید صحت مدل ریاضی ارائه شده، پیش از آنکه به تجزیه و تحلیل مدل پرداخته شود، یک مسأله آزمایشی در اندازه کوچک با ابعاد $(i*j*c*v*t*f*n*o)=(2*5*6*4*1*3*3*3)$ و داده‌های تصادفی ایجاد شده توسط روش اسپیلون محدودیت با نرم‌افزار گمز و الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشنهادی حل شده است. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های پیشنهادی مسأله $MOIWO$ و $MOFF$ می‌باشد که نتایج حاصل از اجرای دو الگوریتم فرا ابتکاری $MOPSO$ و $NSGA-II$ نیز به منظور ارزیابی و آنالیز نتایج الگوریتم‌های قبلی ارائه شده است.

۴-۱- روش حل

۴-۱-۱- الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب یک الگوریتم فرا ابتکاری می‌باشد که نخستین بار توسط یانگ^۲ (۲۰۱۰) و با الهام از رفتار چشمک‌زن کرم شب‌تاب ارائه شده است. نتایج مقایسه عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم کرم شب‌تاب انتخاب مناسب‌تری برای حل مسائل بهینه‌سازی چندمُدی و همگرایی خواهد بود. این الگوریتم با مدل‌سازی رفتار مجموعه‌ای از کرم‌های شب‌تاب و تخصیص مقداری مرتبط با برزندگی مکان هر کرم شب‌تاب سعی در جستجوی جواب بهینه مسأله دارد. در حقیقت دو فاز اصلی در هر تکرار فاز به‌روز کردن رنگدانه و فاز حرکت می‌باشد (حسن زاده و همکاران^۳، ۲۰۱۲).

۴-۱-۲- الگوریتم علف‌های هرز مهاجم

الگوریتم علف‌های هرز در روش بهینه‌سازی از عملکرد رشد علف‌های هرز در طبیعت الهام گرفته است. این الگوریتم توسط محرابیان و لوکاس^۴ (۲۰۰۶) ارایه گردید. الگوریتم فرا ابتکاری علف‌های هرز یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید و توانمند است که بر اساس تقلید از قابلیت تطابق‌پذیری و تصادفی بودن کولونی علف‌های هرز و با استفاده از مفاهیم ساده و کاربردی و راهکارهایی مانند ایجاد رقابت و دانه‌پاشی، مسئله را بهینه می‌کند و آن را به نقطه همگرایی می‌برد. همچنین تولیدمثل برای هر علف از فرمول مقابل بدست می‌آید:

$$S = \left[S_{min} + (S_{max} - S_{min}) \times \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \right] \quad (47)$$

که S_{min} و S_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر دانه تولیدی، f_{min} و f_{max} به ترتیب کمترین و بیشترین میزان شایستگی و f میزان شایستگی علف مورد نظر را نشان می‌دهد.

^۱Multi Objective Invasive Weed Optimization (MOIWO)

^۲Yang

^۳Hassanzadeh et al.

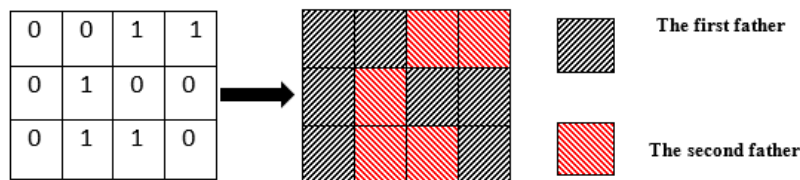
^۴Mehrabian and Lucas

به منظور ارزیابی عملکرد حاصل از نتایج به دست آمده به کمک الگوریتم‌های فرا ابتکاری قبل از دو الگوریتم *MOPSO* و *NSGA-II* استفاده می‌شود.



۱-۲-۴- الگوریتم چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب^۱

الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش ابتکاری سازنده و بهبوددهنده جهت حل مسائلی با اندازه بزرگ، برای اولین بار توسط جان هلند معرفی شد که از جمله مفیدترین و تکاملی‌ترین الگوریتم‌های موجود می‌باشد. این الگوریتم مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی اولیه را ایجاد و در تکرارهای بعدی آن را بهبود می‌بخشد. راه‌حل‌های تصادفی منتخب با توجه به تعداد ورودی‌ها، به کمک عملگرهای تغییر در الگوریتم ژنتیک مانند جهش و تقاطع بهبود می‌یابند. به منظور حل مسائل چندهدفه، الگوریتم *NSGA* بر اساس اصول *GA* ارائه شده است که این الگوریتم، شامل مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه‌ی پارتو در مقابل یافتن تنها یک جواب می‌باشد و به تصمیم‌گیرندگان قدرت انتخاب بیشتری می‌بخشد. اسرینیواس و دب^۲ (۱۹۹۴) در طول سالیان انتقادهایی به رویکرد *NSGA* وارد شده است بدین منظور دب و همکاران الگوریتم *NSGA-II* را با هدف کاهش مشکلات الگوریتم قبلی و بهبود فرآیند انتخاب والد در دو الگوریتم پیشین که به صورت تصادفی انجام می‌پذیرفت ارائه دادند. دب و همکاران^۳ (۲۰۰۲) برای ایجاد جمعیت پاسخ اولیه در این الگوریتم از نحوه‌ی نمایش کدگذاری باینری استفاده شده است. شکل زیر الگوریتم *NSGAII* مربوطه را نشان می‌دهد به این صورت که ماتریس فرزند به کمک یک ماتریس صفر و یک اولیه به دست می‌آید، در واقع زمانی که عدد داخل ماتریس برابر یک باشد فرزند از پدر اول و در غیر این صورت زمانی که سلول متناظر برابر با صفر باشد فرزند از پدر دوم به ارث می‌برد.



۲-۲-۴- الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات

این الگوریتم یک الگوریتم بهینه‌سازی است که نخستین بار توسط ابرهارت و کندی در سال ۱۹۹۵ ارائه شد (کونلو و همکاران^۴، ۲۰۰۴). ایده‌ی اولیه این الگوریتم، بر اساس شبیه‌سازی گرافیکی رفتار غیرقابل پیش‌بینی پرندگان در پرواز شکل گرفته است. در حقیقت این الگوریتم تعمیم‌یافته الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (*PSO*) می‌باشد که به منظور حل مسائل چندهدفه و همچنین مسائلی با چندین زیر هدف متناقض استفاده می‌شود. در حقیقت مزیت اصلی این روش در مقابل سایر استراتژی‌های بهینه‌سازی دیگر تعداد فراوان ذرات ازدحام کننده است که موجب انعطاف آن در برابر مشکل پاسخ بهینه محلی^۵ می‌گردد.

۳-۴- نمایش راه‌حل

در این مقاله به منظور ایجاد نمایش راه‌حل، متغیرهای اصلی را به صورت تصادفی تولید می‌کنیم، سپس متغیرهای وابسته را از روی آن‌ها محاسبه می‌نماییم و در نهایت یک جواب شدنی خواهیم داشت. نمایش راه‌حل پیشنهادی شامل دو قسمت می‌باشد که (۱) محل قرارگیری و مکان‌یابی مراکز توزیع، (۲) تخصیص تأمین‌کننده‌ها به مراکز توزیع موجود.

^۱Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

^۲Srinivas and Deb

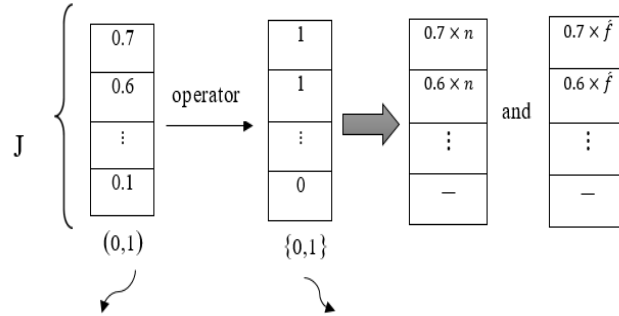
^۳Deb et al.

^۴Coello et al.

^۵Local Search



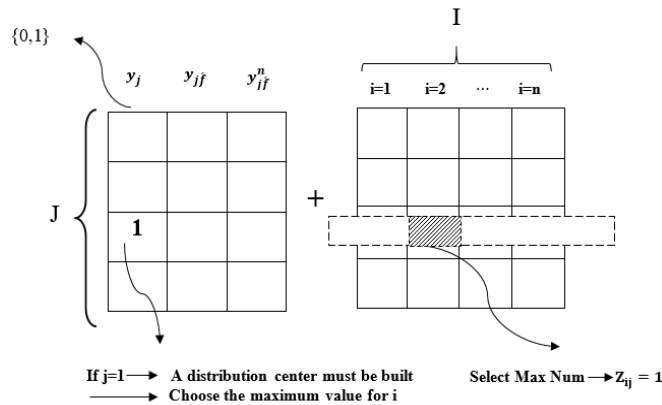
در این قسمت نمایش جواب به صورت یک ماتریس با چهار ستون بوده که به تعداد مراکز توزیع (j) دارای سطر می باشد. ستون اول مربوط به متغیر (y_j) یعنی احداث ایجاد مراکز توزیع می باشد، نحوه عملکرد مدل بدین صورت است که به ازای j های مختلف اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ ایجاد می کنیم اگر عدد تصادفی داخل هر سلول بزرگ تر از ۰/۴ بود سلول مورد نظر عدد ۱ پذیرفته و مرکز توزیع متناظر احداث می شود (در غیر این صورت ۰ جایگزین می شود). همچنین طبق شکل (۲) در ادامه با ضرب در ستون دوم و سوم به ترتیب میزان ظرفیت و روش سرمایه گذاری مربوطه نیز مشخص می شود. این قسمت از نمایش جواب در برگزیده تخصیص تامین کنندگان به توزیع کنندگان می باشد، بدین صورت که در شکل (۳) نیز نمایش داده شده است، بیشترین عدد و مقدار موجود در سطر متناظر هر توزیع کننده نشان دهنده تامین کننده (i) مربوط به آن می باشد.



Select random numbers between 0 and 1 if $x \geq 0.25 \rightarrow x = 1$

شکل ۱- مکان یابی مراکز توزیع.

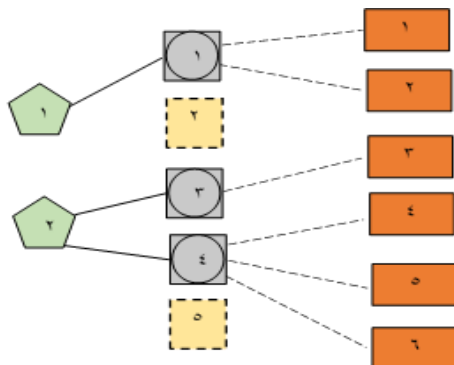
Figure 1- Location of distribution centers.



شکل ۲- تخصیص.

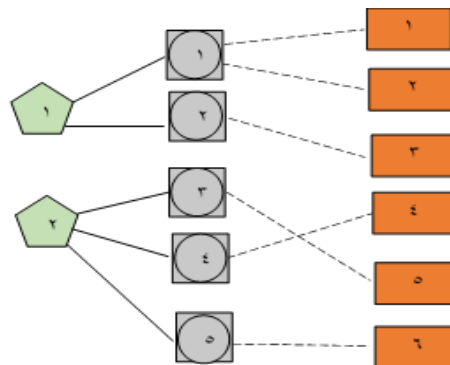
Figure 2- Allocation.

شکل های زیر نتایج به دست آمده به ازای حل توابع هدف را نشان می دهد (در شکل های زیر پنج ضلعی ها نشان دهنده تامین کننده ها، مربع های نقطه چین مکان های کاندید برای احداث مراکز توزیع جدید، مربع-دایره مناطق برگزیده به منظور ساخت واحداث مراکز توزیع جدید و مستطیل ها خرده فروش ها را نشان می دهد):



شکل ۴- راه حل بهینه به ازای تابع هدف سوم.

Figure 4- Optimal solution for the third objective function.



شکل ۳- راه حل بهینه به ازای تابع هدف دوم.

Figure 3- Optimal solution for the second objective function.

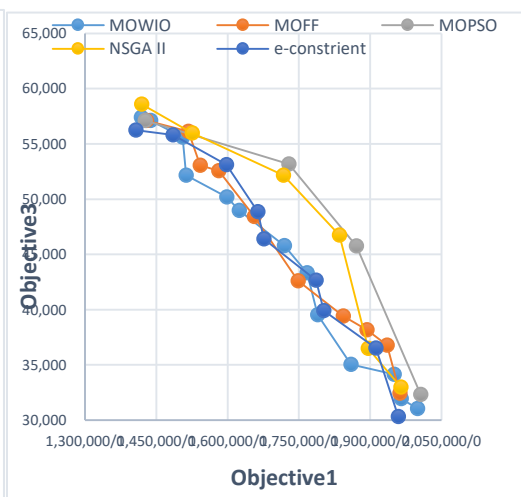


به منظور تجزیه و تحلیل، هر تابع هدف به صورت مجزا بررسی می‌شود و واضح است که با بررسی تابع هدف اول به منظور کاهش هزینه‌ها، مدل، هیچ مرکز توزیع جدیدی را احداث نمی‌کند، با بررسی تابع هدف دوم به منظور افزایش هر چه بیشتر اثرات اجتماعی مدل تصمیم گرفته است که به احداث تمامی نقاط جدید به منظور ساخت مراکز توزیع بپردازد و با بررسی تابع هدف سوم به منظور کاهش زمان مدل اصطلاحاً تمایل به تشکیل تورهای بیشتری نسبت به حالت اول را دارد و تعدادی از مراکز توزیع را برحسب موقعیت انتخاب می‌نماید. در حقیقت تابع هدف دوم و سوم همگرا و هم راستا می‌باشند، یعنی هرچه تابع اول به سمت بهینگی پیش می‌رود توابع دیگر کمینه می‌شوند و نهایتاً در حالت کلی به منظور تجزیه و تحلیل مسأله پیش رو، سیاست مدل و پاسخ‌ها به دودسته کلی تقسیم می‌شوند، دسته اول که تاکید بر افزایش و ساخت مراکز توزیع جدید دارد و دسته دوم که به منظور کاهش هر چه بیشتر هزینه‌ها ساخت مراکز جدید را توصیه نمی‌نماید، که البته تمامی این نظریه و فرضیات تا حد قابل توجهی تحت تاثیر سیاست‌های اجرایی و تصمیم سیاست‌گذاران و خبرگان می‌باشند.



شکل ۵- تجزیه و تحلیل جبهه پارتو بر اساس توابع هدف اول و دوم.

Figure 5- Analysis of the Pareto front based on the first and second objective functions.



شکل ۶- تجزیه و تحلیل جبهه پارتو بر اساس توابع هدف اول و سوم.

Figure 6- Pareto front analysis based on the first and third objective functions.

میانگین مقادیر توابع هدف به ازای یک مسأله آزمایشی انجام شده و نمودارهای فوق حاصل شده است و مشخص است که نتایج آن‌ها چیزی جز تاکید بر صحت نتایج قبلی می‌باشد.

۵- نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور نشان دادن کارایی مدل و الگوریتم‌های فرا ابتکاری به بیان نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار *GAMS* و چهار الگوریتم فرا ابتکاری *MOPSO*، *MOFF*، *NSGA II* و *MOIWO* پرداخته می‌شود. برای این منظور دو نمونه مسأله در ابعاد کوچک و بزرگ در نظر گرفته شده است. مسائل با ابعاد کوچک شامل ده نمونه مسأله می‌باشد که هم‌زمان با نرم‌افزار گمز و الگوریتم‌های فرا ابتکاری حل و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در ادامه مسائل با ابعاد بزرگ‌تر که آن‌ها نیز شامل ده نمونه مسأله می‌باشد توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری یادشده حل می‌گردد البته باید به این نکته نیز اشاره کرد که به علت بزرگ بودن ابعاد مسأله نرم‌افزار گمز در این قسمت کاربرد و کارایی لازم را ندارد. در نهایت نیز به منظور مقایسه عملکرد روش‌های مورد استفاده، مسائل موجود در هر دسته توسط معیارهای مقایسه با یکدیگر مقایسه گردیده و سرانجام مطلوب‌ترین روش برای هر دسته از مسائل مشخص می‌شود. در مقاله مورد بررسی از روش سطوح پاسخ^۱ برای تعیین مقدار پارامتر الگوریتم‌های مورد نظر استفاده شده است که نتایج در جدول زیر ارائه شده است.

¹Response Surface Methodology (RSM)

به منظور مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده شده در این مقاله از معیارهای مختلفی استفاده شده است که این معیارها خود به دودسته تقسیم می‌شوند، دسته اول معیارهای برگرفته از کارایی است که شامل معیار زمان، تعداد جواب‌های پارتو^۱ و سنجش فاصله^۲ می‌باشد و دسته دیگر نیز معیارهای برگرفته از خطا بوده که معیارهایی همچون پراکندگی^۳ و شکاف بهینگی^۴ را شامل می‌شود. جداول و نمودارهای حاصل از تحلیل هر یک از معیارهای مطرح شده در ادامه نمایش داده شده است که همگی آن‌ها به طور اتفاق کارایی و عملکرد بهتر الگوریتم *MOIWO* را نشان می‌دهد (البته شایان ذکر است که این نتیجه در رابطه با معیار زمان صادق نمی‌باشد و الگوریتم *MOPSO* نتیجه بهتری را ارائه داده است و دلیل آن ناشی از این نکته است که در فرایند این الگوریتم عملیاتی همچون جهش و غیره وجود ندارد، لذا مدت زمان کمتری را برای حل به خود اختصاص می‌دهد). جداول ۳-۷ و شکل‌های ۷-۱۵ همگی نتایج حاصل از مقایسه معیارهای مختلف و برتری الگوریتم *MOIWO* در مسائل مختلف را به صورت گرافیکی نشان می‌دهند.

جدول ۲- مقدار پارامترها در روش‌های فرا ابتکاری.

Table 2- The value of parameters in meta-innovative methods.

Value (Big size)	Value (Small size)	Parameter	Algorithm
870	340	maxit	NSGA II
244	100	npop	
0.6	0.51	Pcrossover	
0.75	0.62	Pmutation	
0.14	0.12	Mu	MOPSO
975	426	maxit	
222	84	npop	
56	41	nRep	
0.49	0.58	w	MOFireFly
1003	283	maxit	
228	85	npop	
0.21	0.26	alpha	
0.91	0.95	gama	MOIWO
2.05	2.02	beta	
889	340	maxit	
29	11	initial-npop	
435	214	npep	
12	6	Smax	

۱-۱-۵- معیار تعداد جواب‌های بهینه پارتو

تعداد نقاط بیشتر به ازای هر روش به منظور عملکرد بهتر آن روش می‌باشد.

^۱Number of Pareto Front

^۲Spacing

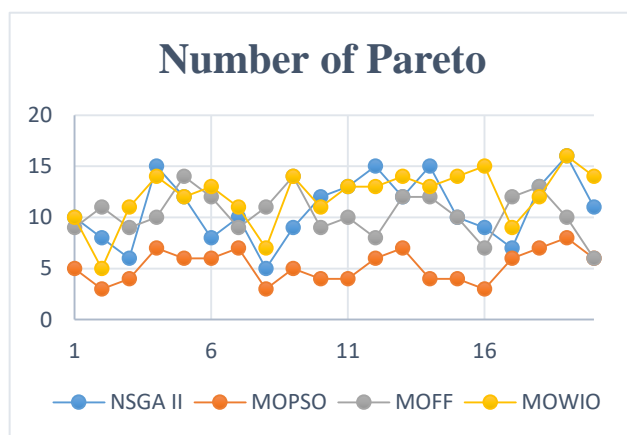
^۳Diversity

^۴Optimality Gap



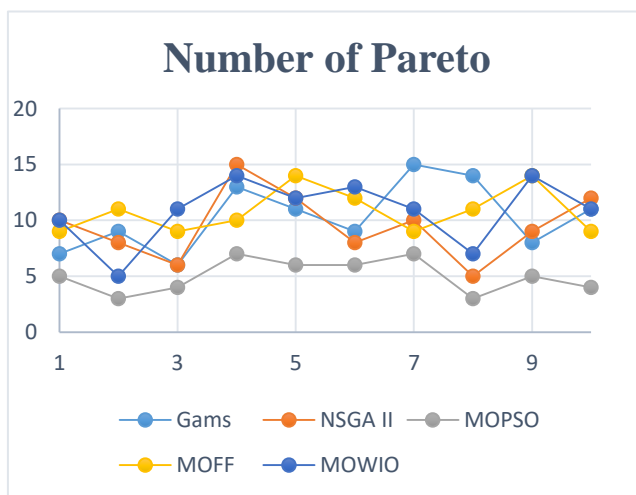
Table 3- Comparison of methods based on the number of Pareto optimal answers.

Problem	Index ($i*j*c*v*t*f*n*o$)	NUMBER OF PARETO				
		Gams	NSGA II	MOPSO	MOFF	MOIWO
1	2*4*30*8*7*3*3*3	7	10	5	9	10
2	2*5*30*10*7*3*5*5	9	8	3	11	5
3	2*6*35*12*7*3*5*5	6	6	4	9	11
4	2*6*45*15*7*3*5*5	13	15	7	10	14
5	2*6*45*15*14*3*5*5	11	12	6	14	12
6	2*8*50*15*14*3*5*5	9	8	6	12	13
7	3*4*40*12*14*3*3*3	15	10	7	9	11
8	3*5*50*12*14*3*3*3	14	5	3	11	7
9	3*5*40*12*21*3*3*3	8	9	5	14	14
10	3*6*60*12*21*3*3*3	11	12	4	9	11
11	3*6*60*30*30*3*5*5	-	13	4	10	13
12	3*6*80*40*30*3*5*5	-	15	6	8	13
13	3*6*100*40*30*3*5*5	-	12	7	12	14
14	4*6*120*50*30*3*5*5	-	15	4	12	13
15	4*8*150*60*30*3*5*5	-	10	4	10	14
16	4*8*180*60*30*3*5*5	-	9	3	7	15
17	4*10*200*70*30*3*5*5	-	7	6	12	9
18	4*10*220*80*30*3*5*5	-	13	7	13	12
19	4*12*240*80*30*3*5*5	-	16	8	10	16
20	4*12*300*100*30*3*5*5	-	11	6	6	14



شکل ۷- مقایسه روش‌های مختلف مسائل ابعاد بزرگ با تعداد جبهه پارتو.

Figure 7- Comparison of different methods of large dimensional problems with the number of Pareto fronts.



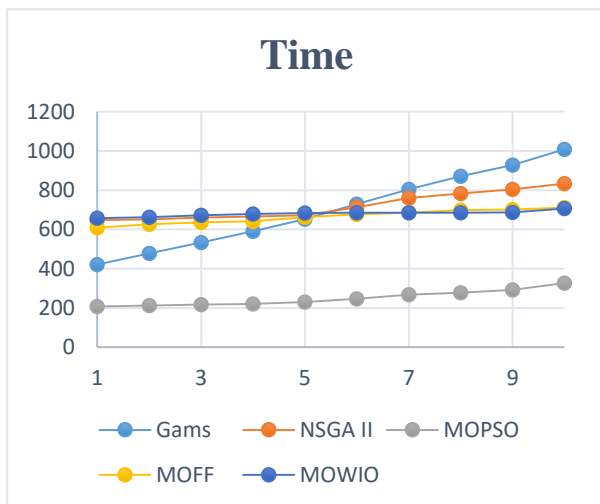
شکل ۸- مقایسه روش‌های مختلف مسائل ابعاد کوچک با تعداد جبهه پارتو.

Figure 8- Comparison of different methods of small dimensional problems with the number of Pareto fronts.

جدول ۴- مقایسه روش ها بر اساس معیار زمان حل بر حسب دقیقه.

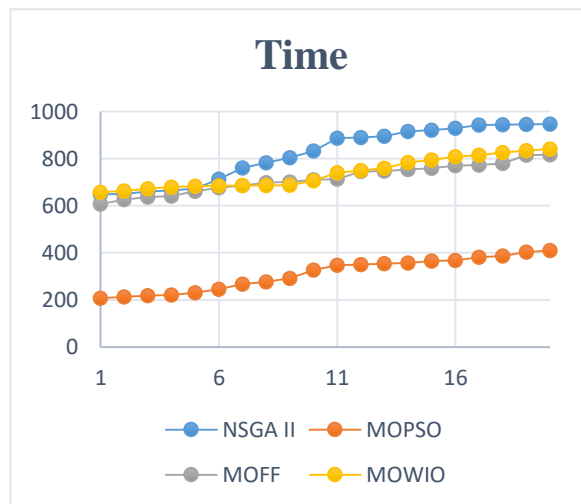
Figure 4- Comparison of different methods of small dimensional problems with the number of Pareto fronts.

Problem	Index (i*j*c*v*t*f*n*o)	TIME (min)				
		Gams	NSGA II	MOPSO	MOFF	MOIWO
1	2*4*30*8*7*3*3*3	421	648	208	608	657
2	2*5*30*10*7*3*5*5	479	651	213	627	663
3	2*6*35*12*7*3*5*5	533	661	218	637	673
4	2*6*45*15*7*3*5*5	590	666	221	642	679
5	2*6*45*15*14*3*5*5	653	672	231	662	684
6	2*8*50*15*14*3*5*5	729	713	246	677	685
7	3*4*40*12*14*3*3*3	804	761	268	686	686
8	3*5*50*12*14*3*3*3	871	783	277	699	686
9	3*5*40*12*21*3*3*3	929	804	292	701	687
10	3*6*60*12*21*3*3*3	1008	833	327	711	707
11	3*6*60*30*30*3*5*5	-	887	347	713	741
12	3*6*80*40*30*3*5*5	-	890	351	746	750
13	3*6*100*40*30*3*5*5	-	895	355	748	759
14	4*6*120*50*30*3*5*5	-	916	357	754	784
15	4*8*150*60*30*3*5*5	-	922	365	760	795
16	4*8*180*60*30*3*5*5	-	929	368	771	809
17	4*10*200*70*30*3*5*5	-	943	381	773	815
18	4*10*220*80*30*3*5*5	-	944	387	780	826
19	4*12*240*80*30*3*5*5	-	946	404	815	834
20	4*12*300*100*30*3*5*5	-	948	410	817	841



شکل ۹- مقایسه روش های مختلف مسائل ابعاد کوچک با زمان پردازش.

Figure 9- Comparison of different methods of small dimensional problems with processing time.



شکل ۱۰- مقایسه روش های مختلف تمام مسائل با زمان پردازش.

Figure 10- Comparing different methods of all problems with processing time.

از این معیار به منظور محاسبه میزان پراکندگی جواب ها در منحنی پارتو استفاده می شود و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک تر باشد، جواب های بهتری را حاصل می کند. که بر اساس معادلات زیر قابل محاسبه می باشد (در این معادلات \bar{s}_i میانگین s_i ها و n نیز، تعداد جواب های پارتو قرار گرفته در جبهه پارتو مورد نظر می باشد):

$$s_i = \min_j \left(\sum_{k=1}^j |f_k^i - f_k^j| \right), \quad (48)$$

$$\bar{s}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i, \quad (49)$$



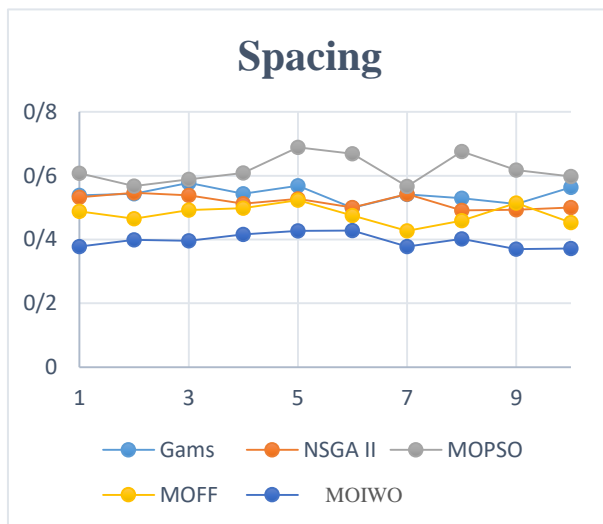
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}, \quad (50)$$

$$j=1,2,\dots,n \quad i \neq j. \quad (51)$$

جدول ۵- مقایسه روش‌ها بر اساس معیار سنجش فاصله.

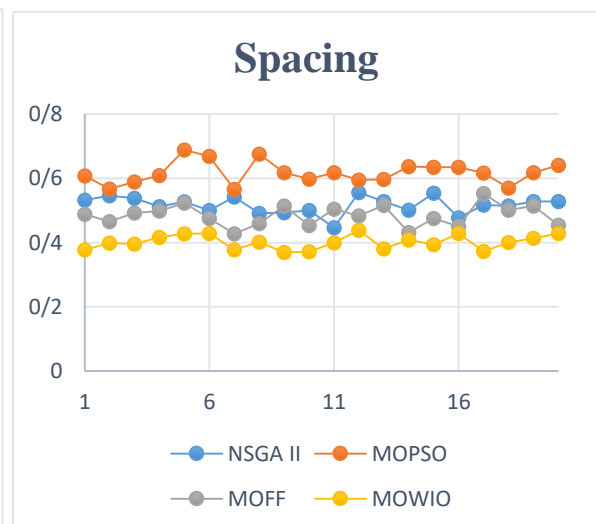
Table 5- Comparison of methods based on distance measurement criteria.

Problem	Index (i*j*c*v*t*n*o)	Gams	NSGA II	Spacing		
				MOPSO	MOFF	MOIWO
1	2*4*30*8*7*3*3*3	0.538	0.532	0.608	0.488	0.378
2	2*5*30*10*7*3*5*5	0.543	0.546	0.567	0.465	0.399
3	2*6*35*12*7*3*5*5	0.577	0.538	0.589	0.492	0.396
4	2*6*45*15*7*3*5*5	0.543	0.512	0.609	0.498	0.416
5	2*6*45*15*14*3*5*5	0.568	0.527	0.689	0.523	0.427
6	2*8*50*15*14*3*5*5	0.499	0.5	0.669	0.475	0.428
7	3*4*40*12*14*3*3*3	0.541	0.542	0.566	0.427	0.378
8	3*5*50*12*14*3*3*3	0.529	0.491	0.676	0.459	0.402
9	3*5*40*12*21*3*3*3	0.511	0.493	0.618	0.514	0.37
10	3*6*60*12*21*3*3*3	0.563	0.5	0.598	0.453	0.372
11	3*6*60*30*30*3*5*5	-	0.446	0.618	0.504	0.4
12	3*6*80*40*30*3*5*5	-	0.556	0.595	0.483	0.438
13	3*6*100*40*30*3*5*5	-	0.528	0.597	0.516	0.381
14	4*6*120*50*30*3*5*5	-	0.501	0.637	0.431	0.409
15	4*8*150*60*30*3*5*5	-	0.554	0.635	0.475	0.394
16	4*8*180*60*30*3*5*5	-	0.477	0.635	0.45	0.428
17	4*10*200*70*30*3*5*5	-	0.517	0.617	0.553	0.373
18	4*10*220*80*30*3*5*5	-	0.514	0.57	0.501	0.401
19	4*12*240*80*30*3*5*5	-	0.528	0.618	0.514	0.414
20	4*12*300*100*30*3*5*5	-	0.528	0.641	0.454	0.428



شکل ۱۱- مقایسه روش‌های مختلف مسائل ابعاد کوچک با معیار فاصله گذاری.

Figure 11- Comparison of different methods of small dimensional problems with spacing criterion.



شکل ۱۲- مقایسه روش‌های مختلف تمام مسائل با معیار فاصله گذاری.

Figure 12- Comparison of different methods of all problems with spacing criteria.

۴-۱-۵- معیار پراکندگی- معیار پراکندگی از طریق مجموع دامنه‌ی حاصل از تفریق بیشینه‌ی مقدار هر تابع هدف از مقدار کمینه‌ی آن از طریق معادله ریاضی زیر حاصل می‌شود و مشخص است که هر چه این مقدار بیشتر باشد در نهایت جواب‌های پارتو بهتری حاصل می‌شود-

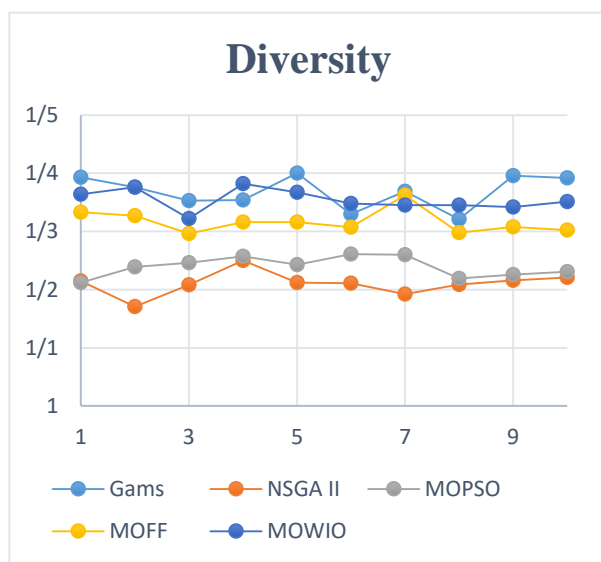
$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^p \left(\frac{f_k^{\max} - f_k^{\min}}{f_k^{\max}} \right)^2} \quad (52)$$

جدول ۶- مقایسه روش‌ها بر اساس معیار پراکندگی (۱۰^۴).

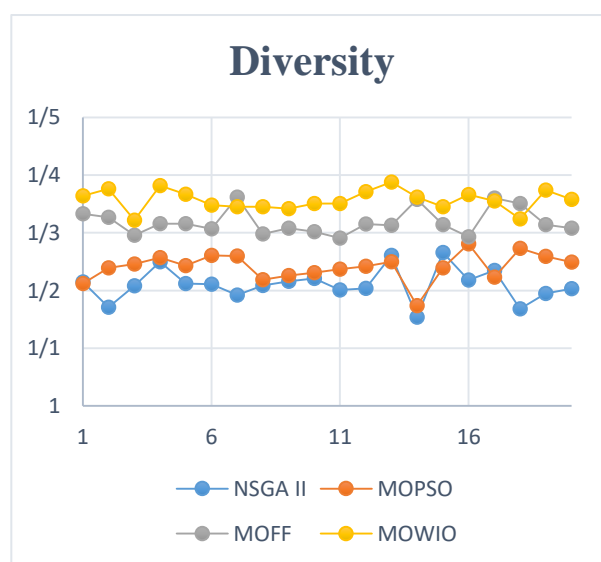
Table 6- Comparison of methods based on dispersion criteria (10⁴).

Problem	Index (i*j*c*v*t*f*n*o)	Diversity *10 ⁴				
		Gams	NSGA II	MOPSO	MOFF	MOIWO
1	2*4*30*8*7*3*3*3	1.393	1.215	1.212	1.333	1.364
2	2*5*30*10*7*3*5*5	1.376	1.171	1.239	1.327	1.376
3	2*6*35*12*7*3*5*5	1.353	1.208	1.246	1.296	1.322
4	2*6*45*15*7*3*5*5	1.354	1.25	1.257	1.316	1.382
5	2*6*45*15*14*3*5*5	1.4	1.212	1.243	1.316	1.367
6	2*8*50*15*14*3*5*5	1.33	1.211	1.261	1.307	1.348
7	3*4*40*12*14*3*3*3	1.369	1.192	1.26	1.362	1.345
8	3*5*50*12*14*3*3*3	1.321	1.209	1.219	1.298	1.345
9	3*5*40*12*21*3*3*3	1.396	1.216	1.226	1.308	1.342
10	3*6*60*12*21*3*3*3	1.392	1.221	1.231	1.302	1.351
11	3*6*60*30*30*3*5*5	-	1.201	1.237	1.291	1.351
12	3*6*80*40*30*3*5*5	-	1.204	1.242	1.315	1.371
13	3*6*100*40*30*3*5*5	-	1.261	1.25	1.313	1.388
14	4*6*120*50*30*3*5*5	-	1.154	1.174	1.358	1.362
15	4*8*150*60*30*3*5*5	-	1.266	1.239	1.314	1.345
16	4*8*180*60*30*3*5*5	-	1.218	1.281	1.293	1.366
17	4*10*200*70*30*3*5*5	-	1.235	1.223	1.36	1.355
18	4*10*220*80*30*3*5*5	-	1.168	1.273	1.351	1.324
19	4*12*240*80*30*3*5*5	-	1.195	1.259	1.314	1.374
20	4*12*300*100*30*3*5*5	-	1.203	1.249	1.308	1.358

ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله مکان یابی - مسیریابی - موجودی مواد خطرناک با در نظر گرفتن تقاضای کشسان و سیستم صف



شکل ۱۳- مقایسه روشهای مختلف مسائل ابعاد کوچک با معیار پراکندگی.
Figure 13- Comparison of different methods of small dimensional problems with scattering criterion.



شکل ۱۴- مقایسه روشهای مختلف تمام مسائل با معیار پراکندگی.
Figure 14- Comparison of different methods of all problems with scatter criterion.

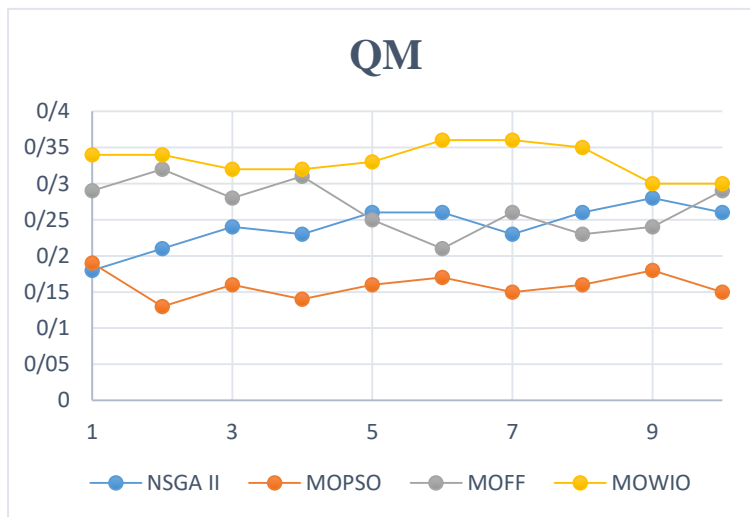
این معیار برای مسائل با ابعاد کوچک کاربرد ندارد زیرا کیفیت جواب‌ها را بررسی می‌کند و می‌دانیم که از نظر کیفی نتایج و پاسخ‌های حاصل شده توسط روش گمز بالاترین کیفیت را دارند، لذا تنها برای مسائلی در حد و اندازه بزرگ استفاده می‌شود که گمز از نظر زمانی قادر به پاسخگویی آن‌ها نمی‌باشد. اگر عملیات مغلوب، نامغلوب را بر روی نقاط پارتو به دست آمده از مراحل قبل انجام دهیم به راحتی می‌توانیم مشخص سازیم که چند درصد از تعداد نقاط نهایی انتخاب شده به عنوان مطلوب‌ترین جواب‌ها مربوط به هر کدام از الگوریتم‌ها می‌باشد.



جدول ۷- مقایسه الگوریتم‌ها فرا ابتکاری بر اساس معیار کیفیت جواب در ابعاد بزرگ.

Table 7- Comparison of meta-heuristic algorithms based on large-scale response quality criteria.

Problem	Index ($i*j*c*v*t*f*n*o$)	QM			
		NSGA II	MOPSO	MOFF	MOIWO
11	3*6*60*30*30*3*5*5	0.18	0.19	0.29	0.34
12	3*6*80*40*30*3*5*5	0.21	0.13	0.32	0.34
13	3*6*100*40*30*3*5*5	0.24	0.16	0.28	0.32
14	4*6*120*50*30*3*5*5	0.23	0.14	0.31	0.32
15	4*8*150*60*30*3*5*5	0.26	0.16	0.25	0.33
16	4*8*180*60*30*3*5*5	0.26	0.17	0.21	0.36
17	4*10*200*70*30*3*5*5	0.23	0.15	0.26	0.36
18	4*10*220*80*30*3*5*5	0.26	0.16	0.23	0.35
19	4*12*240*80*30*3*5*5	0.28	0.18	0.24	0.3
20	4*12*300*100*30*3*5*5	0.26	0.15	0.29	0.3



شکل ۱۵- نمایش مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر اساس معیار کیفیت جواب.

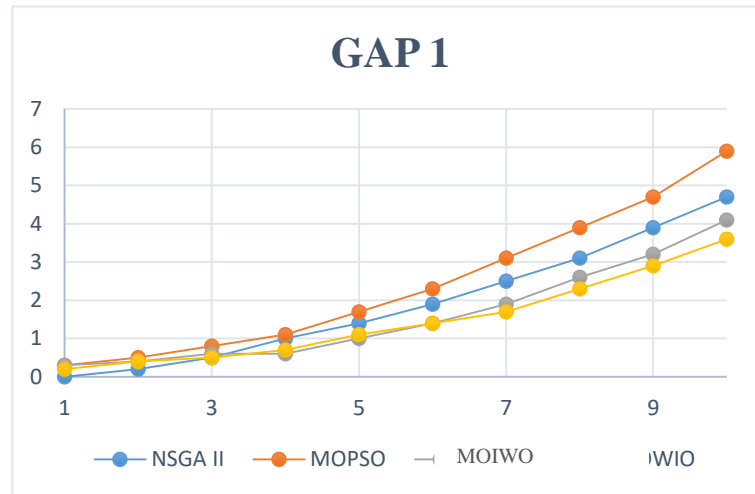
Figure 15- Shows a comparison of meta-heuristic algorithms based on the answer quality criterion.

^۱Quality Meta-Heuristic (QM)

شکاف بهینگی که به اصطلاح تحت عنوان *GAP* نیز بیان می‌شود عبارت است از میزان اختلاف بین جواب‌های بهینه حاصل از گمز و الگوریتم‌های فرا ابتکاری، مشخص است که هرچه این میزان اختلاف کمتر باشد مطلوبیت روش پیشنهادی بیشتر می‌باشد. شایان ذکر است که این معیار تنها برای مسائل با اندازه کوچک کاربرد دارد و به ازای هر یک از توابع هدف طبق رابطه $APRG = \frac{IOG - O_{Min}}{O_G} \times 100$ محاسبه می‌شود.

شکل ۱۶- بررسی عملکرد تابع هدف اول بر اساس معیار (APRG1).

Figure 16- Evaluation of the performance of the first objective function based on the criterion (APRG1).



نمودار مربوط به توابع هدف دوم و سوم نیز به مشابه نمودار رسم شده به ازای تابع هدف اول بوده و الگوریتم فرا ابتکاری *MOIWO* در بهترین جایگاه می‌باشد.

۶- تجزیه و تحلیل پارامترها

در این قسمت به منظور بررسی صحت مدل پیشنهادی یک مسأله در اندازه‌ی کوچک با داده‌های تصادفی ایجاد و با استفاده از نرم‌افزار *GAMS 22.6* حل و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت نیز به منظور تعیین میزان اعتبار و مقدار حساسیت پارامترهای مدل، با تغییراتی در مقادیر پارامترهای مهم، مقدار تغییر در جواب نهایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهایی که تغییراتشان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: میزان بودجه در دسترس، هزینه حمل و نقل و ریسک مسیر.

با توجه به نتایج و تحلیل‌های استخراج‌شده از قسمت (۴) و همچنین سیاست انتخابی سرمایه‌گذاران، دو حالت کلی در تجزیه و تحلیل مدل و پارامترهای حساس ممکن است اتفاق بیفتد که به صورت خلاصه عبارت‌اند از:

- اگر سیاست سرمایه‌گذار سیاست کاهش هزینه یا به عبارتی تابع هدف اول باشد، عملیات ساخت و ساز به صرفه نبوده و مسأله تمایل حرکت به سمتی را دارد که هزینه‌ها را ثابت نگه دارد.
- در حالت دوم سیاست سرمایه‌گذاران بر اساس تابع هدف دوم و سوم بیان می‌شود، در واقع می‌توان اظهار داشت به منظور بهینه‌سازی توابع دوم و سوم سرمایه‌گذاران تمایل به عملیات ساخت و ساز و احداث مراکز جدید دارند.

^۱Average Percentage of Relative Gap (APRG)

جدول ۸- تحلیل حساسیت پارامتر بودجه بر اساس سیاست اول مسأله.

Table 8- Analysis of the sensitivity of the budget parameter based on the first policy of the problem.

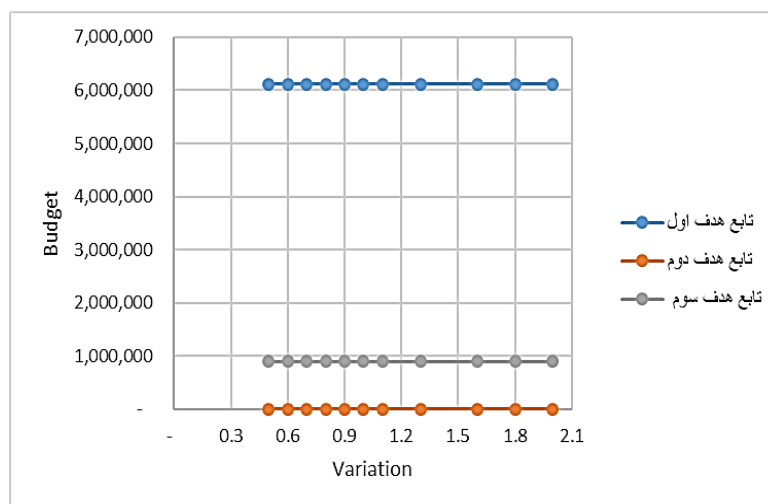
تابع هدف سوم	تابع هدف دوم	هزینه حمل و نقل	هزینه ساخت	تابع هدف اول	ضریب تغییرات بودجه
890824	1027	6115970	-	6115970	0.5
890824	1027	6115970	-	6115970	0.6
890824	1027	6115970	-	6115970	0.7
890824	1027	6115970	-	6115970	0.8
890824	1027	6115970	-	6115970	0.9
890824	1027	6115970	-	6115970	1.0
890824	1027	6115970	-	6115970	1.1
890824	1027	6115970	-	6115970	1.3
890824	1027	6115970	-	6115970	1.6
890824	1027	6115970	-	6115970	1.8
890824	1027	6115970	-	6115970	2



جدول ۹- تحلیل حساسیت پارامتر بودجه بر اساس سیاست دوم مسأله.

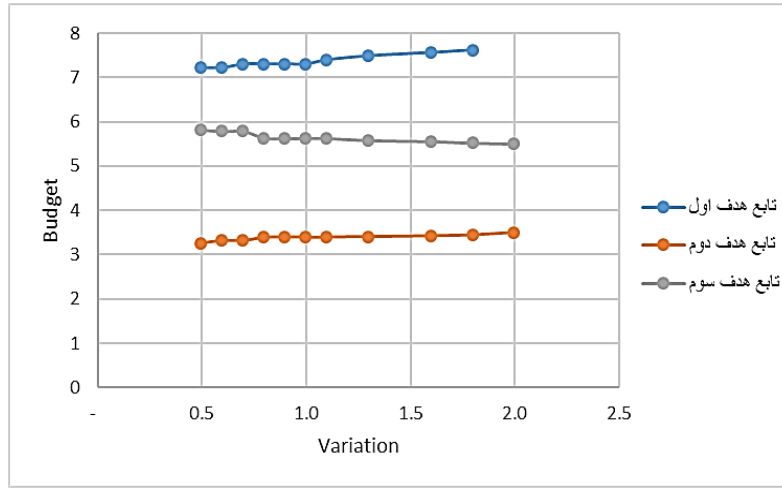
Table 9- Analysis of the sensitivity of the budget parameter based on the second policy of the problem.

تابع هدف سوم	تابع هدف دوم	هزینه حمل و نقل	هزینه ساخت	تابع هدف اول	ضریب تغییرات بودجه
658219	1826	4812394	9686417	14498812	0.5
612382	2094	4167208	12297071	16646279	0.6
612382	2094	4167208	12297071	16646279	0.7
430981	2475	3954671	15953418	19900889	0.8
424324	2491	3873750	16027138	19900889	0.9
424324	2491	3873750	16027138	19900889	1.0
424324	2491	3873750	16027138	19900889	1.1
381033	2572	3691230	21048134	24739364	1.3
358712	2669	3501382	26982138	30483520	1.6
330956	2814	3371827	32910831	36282658	1.8
316128	3203	3259132	38120391	41379253	2



شکل ۱۷- نمایش نحوه تغییرات توابع هدف در حالت اول نسبت به پارامتر B^f .

Figure 17- Shows how the objective functions change in the first case relative to the parameter B^f .



شکل ۱۸ - نمایش نحوه تغییرات توابع هدف در حالت دوم نسبت به پارامتر B^f .

Figure 18- Shows how the objective functions change in the second case relative to the parameter B^f .

نتایج به دست آمده از تحلیل پارامتر بودجه طبق جداول و نمودارهای فوق قابل انتظار هستند، چون به دنبال افزایش هزینه‌ها به منظور احداث مراکز جدید، تعداد مسیرهای ارتباطی میان مراکز بیشتر و فاصله زمانی میان آن‌ها کمتر می‌شود و در نهایت به دلیل وجود گزینه بیشتر جهت انتخاب مسیر بهتر توسط هر یک از وسایل نقلیه، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، زمان رسیدن محصول از مبدا به مقصد و زمان کل سیستم کاهش می‌یابد، از سوی دیگر موجب افزایش نرخ رشد منطقه‌ای و اشتغال‌زایی نیز خواهد شد.

در صورتی که سیاست اول یعنی کاهش هزینه‌ها مدنظر باشد طبق جدول ۷ و شکل ۱۷ هیچ ساخت و سازی پیشنهاد نمی‌شود، زیرا واضح است که در حالت کلی هزینه‌های مربوط به عملیات ساخت و ساز چندین برابر هزینه‌های دیگر از جمله هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد. همچنین اگر سیاست سرمایه‌گذاران اولویت قرار دادن تابع هدف دوم و سوم یا به عبارتی افزایش بودجه مصرفی را در برداشته باشد طبق جدول ۸ و شکل ۱۸ ساخت و ساز مراکز جدید پیشنهاد می‌شود.

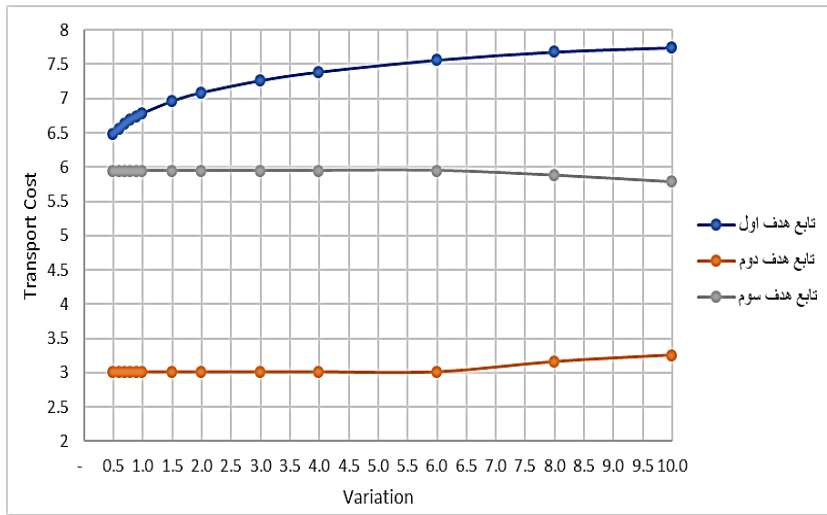
۶-۲- هزینه حمل و نقل

جدول برای توابع هدف به ازای تغییرات پارامتر هزینه حمل و نقل طبق سیاست اول در نظر گرفته شده برای مسأله نمونه می‌باشد و بر اساس سیاست دوم و ضرایب هزینه مختلف مسأله روندی ثابت و یکنواخت طی شده است که نمودار آن ترسیم شده است.

جدول ۱۰ - تحلیل حساسیت پارامتر هزینه حمل و نقل بر اساس سیاست اول مسأله.

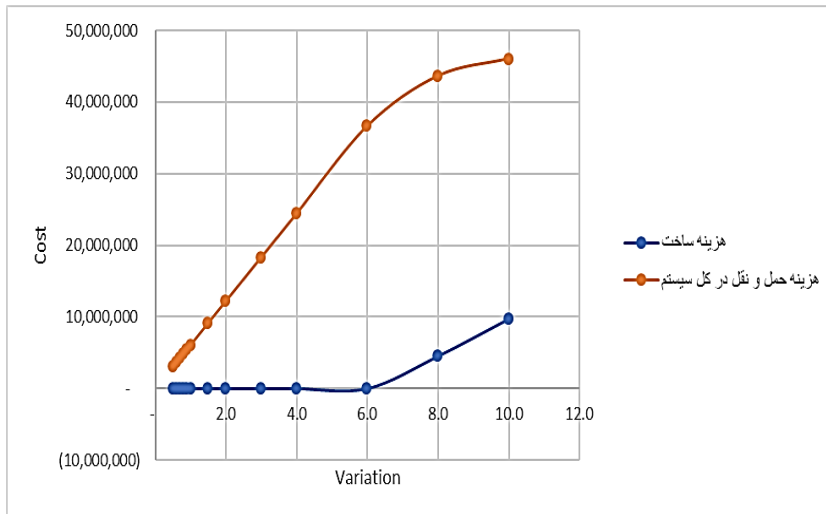
Table 10- Sensitivity analysis of the shipping cost parameter based on the first policy of the problem.

تابع هدف سوم	تابع هدف دوم	هزینه حمل و نقل	هزینه ساخت	تابع هدف اول	ضریب هزینه حمل و نقل
890824	1027	3057985	-	3057985	0.5
890824	1027	3669582	-	3669582	0.6
890824	1027	4281179	-	4281179	0.7
890824	1027	4892776	-	4892776	0.8
890824	1027	5504373	-	5504373	0.9
890824	1027	6115970	-	6115970	1.0
890824	1027	9173955	-	9173955	1.5
890824	1027	12231940	-	12231940	2
890824	1027	18347910	-	18347910	3
890824	1027	24463880	-	24463880	4
890824	1027	36695820	-	36695820	6
764182	1452	43670092	4527236	48197328	8
620536	1809	46068418	9713823	55782241	10



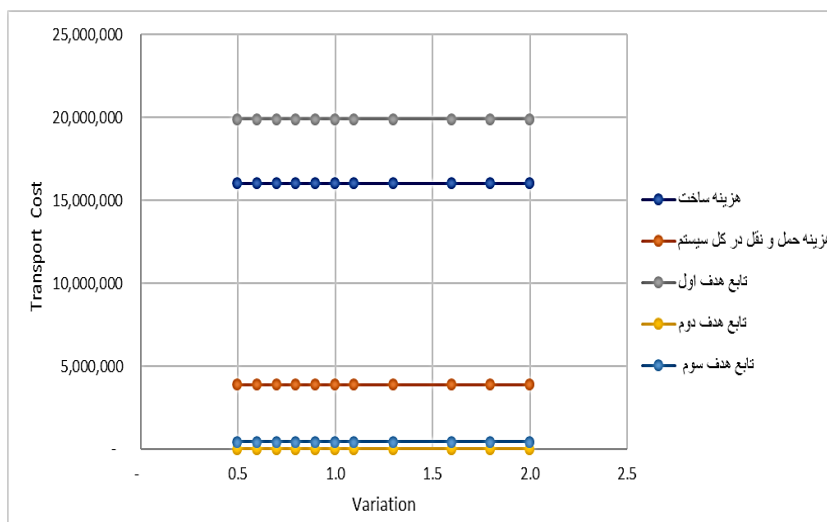
شکل ۱۹- نمایش نحوه تغییرات توابع هدف در حالت اول نسبت به پارامتر CT_{ij} .

Figure 19- Shows how the objective functions change in the first case relative to the parameter CT_{ij} .



شکل ۲۰- نمایش نحوه تغییرات هزینه‌ها در حالت اول نسبت به پارامتر CT_{ij} .

Figure 20- Shows how the costs change in the first case relative to the parameter CT_{ij} .



شکل ۲۱- نمایش نحوه تغییرات هزینه‌های موجود در سیستم و توابع هدف در حالت دوم نسبت به پارامتر CT_{ij} .

Figure 21- Shows how the costs in the system and the objective functions change in the second case relative to the parameter CT_{ij} .



به منظور بررسی بیشتر، هزینه حمل و نقل موجود در شبکه را به صورت مجزا مورد بررسی قرار داده ایم و مشخص است که بر اساس حالت اول یعنی زمانی که تابع هدف اول موضوع اصلی پروژه می باشد تا یک حد مشخصی از تغییرات، ساخت و ساز و احداث مراکز جدید مقرون به صرفه نمی باشد تنها زمانی که نرخ تغییرات هشت برابر می شود سیستم به دنبال احداث مراکز جدید رفته و درصدد متعادل سازی هزینه ها بر می آید. در حقیقت تنها از این نقطه به بعد بر روی سایر توابع هدف نیز تاثیرگذار ظاهر شود. در ادامه نیز با مشاهده مقادیر به دست آمده به ازای حالت دوم این گونه برداشت می شود که تغییرات هزینه های حمل و نقل تاثیری بر روی بهینه یا کمینه سازی توابع هدف دیگر ندارد که این مهم، با نتایج دریافتی از مراحل قبل نیز تطابق دارد. در حقیقت هزینه های حمل و نقل بر روی اشتغال زایی و رسیدن محصول به دست مشتریان در سریع ترین زمان ممکن تاثیر گذار نمی باشد.

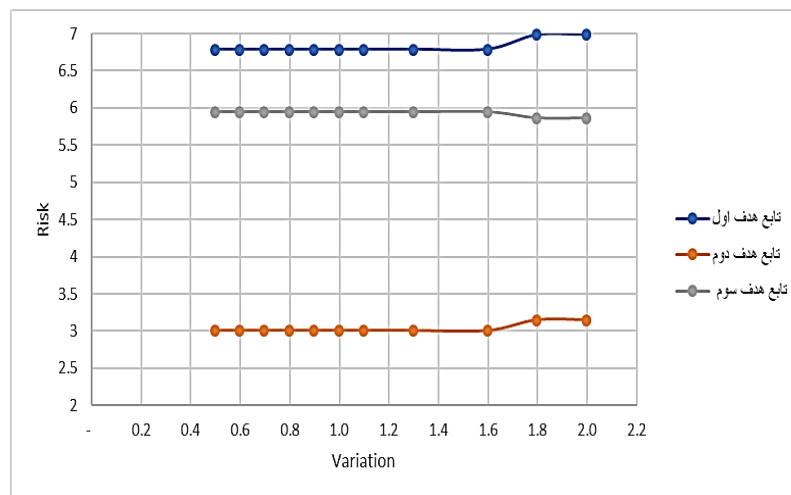
۶-۳-ریسک

همچون موارد قبل جدول زیر مقادیر به دست آمده برای توابع هدف به ازای تغییرات پارامتر ریسک ناشی از حمل و نقل (ریسک مسیر) را طبق حالت دوم نشان می دهد و بر اساس حالت اول نیز روندی ثابت طی شده است که تنها نمودار آن رسم شده است. در این مسأله ریسک مسیر بین دو نقطه بر اساس ضریبی از فاصله زمانی بین هر دو شهر در نظر گرفته شده است (ضریب ریسک عدد تصادفی مابین ۰/۰۰۰۰۰۱ الی ۰/۰۰۰۰۰۱ می باشد) همچنین R_{Max} مورد قبول ۵ درصد می باشد.

جدول ۱۱- تحلیل حساسیت پارامتر ریسک بر اساس سیاست دوم مسأله.

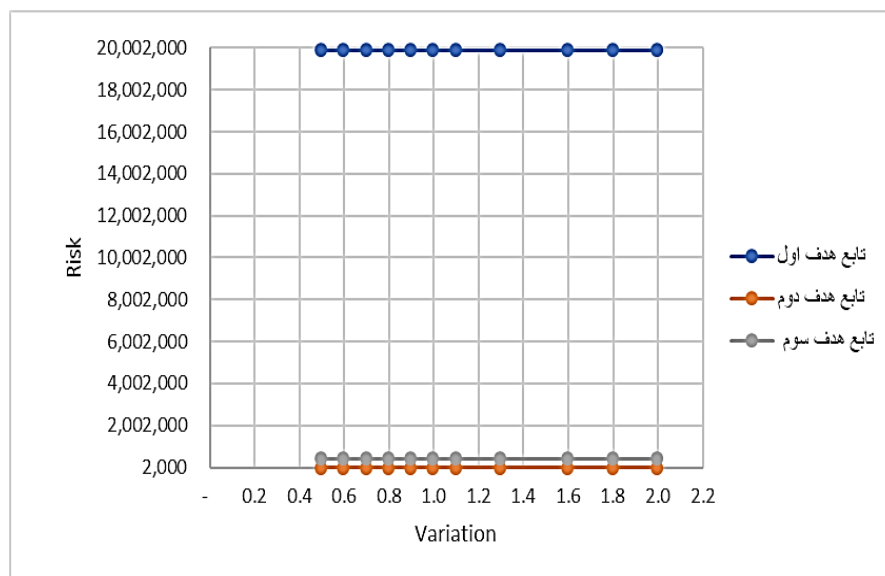
Table 11- Analysis of parametric risk based on the second policy of the problem.

تابع هدف سوم	تابع هدف دوم	هزینه حمل و نقل	هزینه ساخت	تابع هدف اول	ضریب تغییرات ریسک
424324	2491	3873750	16027138	19900889	0.5
424324	2491	3873750	16027138	19900889	0.6
424324	2491	3873750	16027138	19900889	0.7
424324	2491	3873750	16027138	19900889	0.8
424324	2491	3873750	16027138	19900889	0.9
424324	2491	3873750	16027138	19900889	1.0
424324	2491	3873750	16027138	19900889	1.1
424324	2491	3873750	16027138	19900889	1.3
424324	2491	3873750	16027138	19900889	1.6
424324	2491	3873750	16027138	19900889	1.8
424324	2491	3873750	16027138	19900889	2



شکل ۲۲- نمایش نحوه تغییرات توابع هدف در حالت اول نسبت به پارامتر R_{ij} .

Figure 22- Shows how the objective functions change in the first case relative to the parameter R_{ij} .



شکل ۲۳- نمایش نحوه تغییرات توابع هدف در حالت دوم نسبت به پارامتر R_{ij} .

Figure 23- Shows how the objective functions change in the second case relative to the parameter R_{ij} .

در حالت اول مسأله زمانی که ضریب ریسک تا بازه $1/6$ تغییر می کند مقدار ریسک موجود در سیستم همچنان سازگار و به اصطلاح ریلکس می باشد. اما در بازه های بالاتر که مقدار ریسک از حد مورد قبول مسأله تجاوز می کند به منظور کاهش مسافت میان مراکز، ساخت و احداث مراکز جدید توصیه می شود. در حقیقت ساخت مراکز جدید موجب افزایش تعداد حمل و نقل، کاهش مسافت طی شده توسط هر وسیله و در نهایت کاهش ریسک ناشی از مسیر می شود. با بررسی حالت دوم مسأله نیز مشخص است که میزان تغییرات ضریب مربوط به ریسک تاثیر چشمگیری بر روی این توابع ندارد.

۷- نتیجه گیری

مواد خطرناک و به صورت کلی صنعت نفت نقش مهمی را در جوامع بشری امروزه بر عهده دارد و یکی از مهم ترین منابع استراتژیک به شمار می رود. به همین منظور در این پژوهش مجموعه ای از تصمیمات تاکتیکی و استراتژیک مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله یک مدل برنامه نویسی خطی عدد صحیح مختلط، با سه تابع هدف متفاوت را ارائه می نماید. تابع هدف اول درصد کاهش هزینه ها و بررسی چگونگی تأمین هزینه های مذکور می باشد، تابع هدف دوم تلاش می کند تاثیرات اجتماعی را به حداکثر برساند و تابع هدف سوم به دنبال کاهش زمان و حداقل سازی تهدیدات زیست محیطی می باشد. اگر بخواهیم به صورت خلاصه تمایز و تفاوت مطالب ارائه شده در این پژوهش را برشماریم می توان به مباحثی همچون توجه به مباحث زیست محیطی با کمک گرفتن از مباحث پایداری به کاهش زمان و ریسک اشاره داشت، همچنین در نظر گرفتن توأم مسائل مکان یابی-مسیریابی-موجودی در شبکه خاص و نزدیک به واقعیت که تحقیق را هم برای مدیران و تصمیم گیرندگان و هم برای مشتریان مفید می سازد، و در عین حال بر پایه دو سناریوی مختلف می تواند مدیران را به سمت تصمیم نهایی هدایت سازد. علاوه بر این در این مدل مباحثی چون مفهوم تقاضای کشسان، روش های تأمین مالی و مسئولیت اجتماعی به صورت توأم در نظر گرفته شده است که می تواند مدل را کاربردی تر و از نظر اقتصادی به صرفه تر نماید و نیز به دنیای رقابتی و صنعتی کنونی نزدیک تر سازد. به منظور حل مسأله مورد نظر در ابعاد کوچک از روش اپسیلون محدودیت به کمک نرم افزار گمز و برای حل در ابعاد بزرگ تر از الگوریتم های پیشنهادی *MOIWO* و *MOFF* استفاده و جهت مقایسه کارایی آن ها از الگوریتم های *MOPSO* و *NSGA II* استفاده شده است. همچنین به منظور مقایسه و نتیجه گیری بهتر از معیارهای مقایسه مختلفی همچون پراکندگی، زمان، تعداد نقاط بهینه و غیره بهره گرفته شده است که در نهایت همگی برتری و کارایی بهتر الگوریتم پیشنهادی *MOIWO* نسبت به سایر الگوریتم ها را نشان می دهند.

به منظور نشان دادن کارایی روش مطرح شده، حدود ۲۰ مسأله حل و نتایج آن ها بر اساس پارامترهای ریسک، بودجه و هزینه حمل و نقل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و سناریوهای تصمیم گیری مختلفی بر اساس توابع هدف پیشنهاد شده است که این نکته بیانگر کارایی مدل و روش پیشنهادی در مسائل دنیای واقعی و قابل تعمیم به سایر مسائل مشابه می باشد.

پیشنهادهای آتی برای مطالعات بعدی بسیار می باشد که برخی از مهم ترین آن ها عبارت اند از:

- وارد نمودن بحث موجودی اعم از بدون کمبود و نیز انواع کمبود در مدل.
- در نظر گرفتن محدودیت برای وسایل نقلیه مورد استفاده اعم از بخش جاده ای و ریلی.
- استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری چندهدفه دیگر و یا روش های حل دقیق دیگر مانند آزادسازی لاگرانژ و یا تجزیه بندرز.
- در اکثر پژوهش های انجام شده به مدل سازی جوامع در جنبه های اجتماعی پرداخته نشده است لذا در پژوهش های آتی می توان به مدل سازی سایر جنبه های پایداری اجتماعی اشاره کرد.
- چند محصولی کردن انواع کالا های ارسالی.

توافقنامه نویسندگان

مقاله حاضر مستخرج از پایان نامه دکتری خانم پریسا بوالحسنی تحت راهنمایی جناب آقایان دکتر محمد فلاح، دکتر رضا توکلی مقدم و دکتر اکبر عالم تبریز به عمل آمده است.

تعارض با منافع

نویسندگان اعلام می دارند که هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد.

منابع

- Adarang, H., Bozorgi-Amiri, A., Khalili-Damghani, K., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). A robust bi-objective location-routing model for providing emergency medical services. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*.
- Alhaj, M. A., Svetinovic, D., & Diabat, A. (2016). Retracted: a carbon-sensitive two-echelon-inventory supply chain model with stochastic demand. *Resources, conservation and recycling*, 108, 82-87.
- Ashtakala, B., & Eno, L. A. (1996). Minimum risk route model for hazardous materials. *Journal of transportation engineering*, 122(5), 350-357.
- Baumol, W. J., & Wolfe, P. (1958). A warehouse-location problem. *Operations research*, 6(2), 252-263.
- Coello, C. A. C., Pulido, G. T., & Lechuga, M. S. (2004). Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 8(3), 256-279.
- Dai, Z., Aqlan, F., Zheng, X., & Gao, K. (2018). A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints. *Computers & industrial engineering*, 119, 338-352.
- Darestani, S. A., & Hemmati, M. (2019). Robust optimization of a bi-objective closed-loop supply chain network for perishable goods considering queue system. *Computers & industrial engineering*, 136, 277-292.
- Daskin, M. S., Coullard, C. R., & Shen, Z. J. M. (2002). An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results. *Annals of operations research*, 110(1), 83-106.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, conservation and recycling*, 53(10), 559-570.
- Deng, S., Li, Y., Zhou, T., & Cao, Y. (2014, October). Study on recyclable reserve logistics network optimization based on e-commerce. *2014 International conference on management of e-commerce and e-government* (pp. 337-340). IEEE.
- DOT, U. (2000). *Departmentwide program evaluation of the hazardous materials transportation programs (HMPE)*. Retrieved from http://www.phmsa.dot.gov/staticfiles/PHMSA/DownloadableFiles/Files/hmpe_report.pdf
- Fahimnia, B., Sarkis, J., Dehghanian, F., Banihashemi, N., & Rahman, S. (2013). The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study. *Journal of cleaner production*, 59, 210-225.
- Ghasemi, A., Rayatpisheh, M. A., Haddadi, A., & Rayat, A. (2017). Identifying and prioritizing the factors contributing to sustainability of food supply chain. *Journal of environmental science and technology*, 19(4), 369-382. (In Persian). DOI: 10.22034/JEST.2017.10738
- Gross, D. (2008). *Fundamentals of queueing theory*. John Wiley & Sons.
- Gzara, F. (2013). A cutting plane approach for bilevel hazardous material transport network design. *Operations research letters*, 41(1), 40-46.
- Hassanzadeh, T., Faez, K., & Seyfi, G. (2012, February). A speech recognition system based on structure equivalent fuzzy neural network trained by firefly algorithm. *2012 international conference on biomedical engineering (ICoBE)* (pp. 63-67). IEEE.
- Hu, H., Li, X., Zhang, Y., Shang, C., & Zhang, S. (2019). Multi-objective location-routing model for hazardous material logistics with traffic restriction constraint in inter-city roads. *Computers & industrial engineering*, 128, 861-876.
- Hum, S. H., Parlar, M., & Zhou, Y. (2018). Measurement and optimization of responsiveness in supply chain networks with queueing structures. *European journal of operational research*, 264(1), 106-118.





- Javid, A. A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 46(5), 582-597.
- Kalantari, M., Pishvae, M., Yaghoubi, S. (2024). A multi objective model integrating financial and material flow in supply chain master planning. *Journal of industrial management perspective*, 5(3), 139-167.
- Khodemani-Yazdi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bashiri, M., & Rahimi, Y. (2019). Solving a new bi-objective hierarchical hub location problem with an $M/M/c$ queuing framework. *Engineering applications of artificial intelligence*, 78, 53-70.
- Khosravi, S., & Akbari Jokar, M. R. (2014). Hub location problem considering an elastic demand. *Proceedings of CIE44 & IMSS'14* (pp. 581-588). Istanbul, Turkey.
- Li, Y., Guo, H., & Zhang, Y. (2018). An integrated location-inventory problem in a closed-loop supply chain with third-party logistics. *International journal of production research*, 56(10), 3462-3481.
- Liu, S. C., & Lee, S. B. (2003). A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 22(11), 941-950.
- Liu, Y., Dehghani, E., Jabalameli, M. S., Diabat, A., & Lu, C. C. (2020). A coordinated location-inventory problem with supply disruptions: A two-phase queuing theory-optimization model approach. *Computers & industrial engineering*, 142, 106326.
- Mahmood Soltani, F., TavakkoliMoghaddam, R., Javadian, N., & MahmoodAbadi, A. (2020). Bi-objective modeling for a fuel distribution problem in a multi-distribution warehouse centers. *Supply chain management*, 15(42), 54-61. (In Persian). https://scmj.ihu.ac.ir/article_203521.html?lang=en
- Mehrabian, A. R., & Lucas, C. (2006). A novel numerical optimization algorithm inspired from weeds colonization. *Ecological informatics*, 1(4), 355-366.
- Mohammadi, A., Alem Tabriz, A., Pishvae, M. (2018). Proposing model for master planning of sustainable supply chain with considering integration of physical and financial flow. *Journal of industrial management perspective*, 8(1), 39-62. (In Persian). https://jimp.sbu.ac.ir/article_87179.html?lang=en
- Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2020). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of cleaner production*, 242, 118452.
- Nadizadeh, A., & Nasab, H. H. (2014). Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. *European journal of operational research*, 238(2), 458-470.
- Nekooghadirli, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ghezavati, V. R., & Javanmard, A. S. (2014). Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics. *Computers & industrial engineering*, 76, 204-221.
- Noguchi, H., Hienuki, S., & Fuse, M. (2020). Network theory-based accident scenario analysis for hazardous material transport: A case study of liquefied petroleum gas transport in japan. *Reliability engineering & system safety*, 203, 107107.
- Pan, S., Ballot, E., & Fontane, F. (2013). The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. *International journal of production economics*, 143(1), 86-94.
- Pishvae, 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.
- Rabbani, M., Heidari, R., & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European journal of operational research*, 272(3), 945-961.
- Rayatpisha, S., Ahmay, R., & Abbasi, M. (2019). Using a combined approach of qualitative & multi-criteria decision making (mcdm) approach in order to presentation of sustainable supply chains model in petrochemical industry. *Industrial management studies*, 16(51), 145-180. (InPersian). DOI: [10.22054/JIMS.2019.3955.1556](https://doi.org/10.22054/JIMS.2019.3955.1556)
- Saeedi, S., Mohammadi, M., & Torabi, S. (2015). A De Novo programming approach for a robust closed-loop supply chain network design under uncertainty: An M/M/1 queueing model. *International journal of industrial engineering computations*, 6(2), 211-228.
- Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248.
- Talebzadehosseini, S. (2015). *Measuring sustainability performance of supply chain management practices using fuzzy inference* (Doctoral dissertation, The University of Regina (Canada)). <http://hdl.handle.net/10294/6831>
- Tavakkoli Moghadam, R., & Otrodi, F. (2013). Vehicle routing problem with time-windows and weighted nodes for perishable food delivery. *2nd national conference on industrial engineering & systems*. Isfahan. <https://en.civilica.com/doc/251372/>
- Tavakkoli Moghadam, R., Alinaghian, M., Noroozi, N., & Salamatbakhsh, A. (2011). Solving a new vehicle routing problem considering safety in hazardous materials transportation: areal-case study. *Quarterly journal of transportation engineering*, 2(3), 223-237. (In Persian). DOR: [20.1001.1.20086598.1390.2.3.2.7](https://doi.org/20.1001.1.20086598.1390.2.3.2.7)
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). An overview of vehicle routing problems. *The vehicle routing problem*, 1-26.
- Tsao, Y. C., Thanh, V. V., Lu, J. C., & Yu, V. (2018). Designing sustainable supply chain networks under uncertain environments: Fuzzy multi-objective programming. *Journal of cleaner production*, 174, 1550-1565.
- Vafaenezhad, T., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Cheikhrouhou, N. (2019). Multi-objective mathematical modeling for sustainable supply chain management in the paper industry. *Computers & industrial engineering*, 135, 1092-1102.
- Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., & Baboli, A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 48(6), 1152-1168.
- Validi, S., Bhattacharya, A., & Byrne, P. J. (2015). A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model. *Computers & operations research*, 54, 204-217.
- Varsei, M., & Polyakovskiy, S. (2017). Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia. *Omega*, 66, 236-247.
- Watson-Gandy, C. D. T., & Dohrn, P. J. (1973). Depot location with van salesmen—a practical approach. *Omega*, 1(3), 321-329.
- Yang, X. S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press.



- Yousefi Nejad Attari, M., Karbasi, V., & Sharifi, S. (2020). Presenting a bi-objective random planning model for nursing services. *Iranian journal of supply chain management*, 21(65), 73-88. (In Persian). https://scmj.ihu.ac.ir/article_205263.html
- Yousefi-Babadi, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bozorgi-Amiri, A., & Seifi, S. (2017). Designing a reliable multi-objective queuing model of a petrochemical supply chain network under uncertainty: a case study. *Computers & chemical engineering*, 100, 177-197.
- Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvaei, M. S. (2014). A robust possibilistic programming approach to multi-period location-allocation of organ transplant centers under uncertainty. *Computers & industrial engineering*, 74, 139-148.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi, Y. (2017). A self-adaptive evolutionary algorithm for a fuzzy multi-objective hub location problem: An integration of responsiveness and social responsibility. *Engineering applications of artificial intelligence*, 62, 1-16.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi, Y. (2017). A self-adaptive evolutionary algorithm for a fuzzy multi-objective hub location problem: An integration of responsiveness and social responsibility. *Engineering applications of artificial intelligence*, 62, 1-16.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 89, 182-214.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 89, 182-214.
- Zhang, S., Lee, C. K. M., Wu, K., & Choy, K. L. (2016). Multi-objective optimization for sustainable supply chain network design considering multiple distribution channels. *Expert systems with applications*, 65, 87-99.