

طراحی مدل پایدار مسیریابی موجودی مواد خطرناک چندکالایی تحت عدم اطمینان

مهرناز قربانی^۱، علیرضا عیدی^{۲*}، مائده غلام آزاد^۳

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳. پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

خلاصه

مطالعه حاضر با هدف طراحی یک مدل تصمیم‌گیری پایدار برای بهینه‌سازی مسیریابی موجودی مواد خطرناک در زنجیره تأمین انجام شده است. این مواد شامل پسماندهای پزشکی، سوخت و مواد شیمیایی قابل اشتعال هستند که اگرچه نقشی اساسی در صنایع و نظام سلامت دارند، اما به دلیل ماهیت سمی و اشتعال‌زا، تهدیدات جدی برای سلامت انسان، ایمنی عمومی و محیط‌زیست ایجاد می‌کنند. اهمیت موضوع زمانی بیشتر می‌شود که در نظر داشته باشیم وقوع حتی یک حادثه در فرآیند حمل‌ونقل این مواد می‌تواند خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی گسترده‌ای در پی داشته باشد. از این‌رو، نیاز به توسعه مدل‌هایی که بتوانند ابعاد اقتصادی، ایمنی و زیست‌محیطی را به‌صورت همزمان در نظر گیرند، بیش از پیش احساس می‌شود. در این مطالعه یک مدل ریاضی چندهدفه توسعه داده شد که سه معیار کلیدی هزینه کل، بیشینه ریسک تصادف و میزان آلاینده‌گی زیست‌محیطی را بهینه‌سازی می‌کند. برای افزایش واقع‌گرایی، عدم قطعیت در تقاضا و ریسک حمل‌ونقل از طریق رویکرد سناریو محور مدل‌سازی شد، به‌گونه‌ای که راه‌حل‌های حاصل بتوانند در شرایط مختلف عملیاتی قابل استفاده باشند. به منظور حل مدل، در ابعاد کوچک از رویکرد دقیق استفاده گردید و برای مسائل بزرگ‌تر، یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر NSGA-II همراه با جستجوی محلی طراحی و پیاده‌سازی شد تا مقیاس‌پذیری و کیفیت راه‌حل تضمین شود. نتایج عددی نشان داد که در نظر گرفتن همزمان ریسک و عدم قطعیت در تصمیم‌گیری موجب کاهش قابل توجه خطرات حمل‌ونقل، بهبود عملکرد زیست‌محیطی و افزایش سطح پایداری در زنجیره تأمین می‌شود. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش شدت حادثه به‌طور مستقیم منجر به افزایش ریسک شبکه می‌گردد و تصمیم‌گیرندگان ناچار به ایجاد توازن میان هزینه‌ها و سطح ایمنی هستند. الگوریتم پیشنهادی نیز توانست نسبت به روش‌های دقیق، در ابعاد بزرگ‌تر راه‌حل‌هایی با کیفیت مناسب و در زمان محاسباتی کمتر تولید نماید. این پژوهش با تلفیق مدل‌سازی چندهدفه، عدم قطعیت سناریو محور و روش‌های فراابتکاری، چارچوبی کارآمد برای مدیریت پایدار حمل مواد خطرناک ارائه می‌دهد. یافته‌ها می‌تواند به مدیران زنجیره تأمین و سیاست‌گذاران کمک کند تا ضمن کاهش هزینه‌ها، ایمنی عمومی و ملاحظات زیست‌محیطی را نیز به‌صورت متوازن در تصمیمات خود لحاظ کنند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مدیریت زنجیره تأمین

پایداری

مسیریابی موجودی

کالای خطرناک

رویکرد سناریو محور

* نویسنده مسئول: علیرضا عیدی

تلفن: ۰۷۳-۳۳۶۶۰۰۸۷-۰۸۷ پست الکترونیکی: Alireza.cydi@uok.ac.ir

۱. مقدمه

در دنیای رقابتی کنونی مدیریت زنجیره تأمین یکی از مسائل اساسی و اقتصادی است که تمامی فعالیت‌های سازمان برای ارائه خدمات به تأمین‌کنندگان و مشتریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش قیمت تمام شده، افزایش سطح خدمت‌رسانی به مشتری‌ها و برآورده کردن نیاز سریع آن‌ها از جمله مواردی است که برای باقی‌ماندن در زمینه رقابت محصول و خدمات ارائه شده آن الزامی می‌باشد. برای این منظور، بررسی مسئله پایداری در زنجیره تأمین و مدیریت صحیح آن از جمله مسائلی است که می‌تواند به مدیران زنجیره تأمین در باقی‌ماندن در بازار رقابتی کمک شایانی کند [۱]. به‌طور کلی مدیریت زنجیره تأمین پایدار (SSCM) را می‌توان به‌صورت مدیریت جریان مواد، اطلاعات و سرمایه‌ها درک زنجیره تأمین تعریف کرد که در آن شرکت‌ها با یکدیگر همکاری می‌کنند، به‌نحوی که اهداف ادغامی سه‌بعدی پایداری (اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) ارضا شوند [۲]. در واقع، زنجیره تأمین پایدار می‌تواند به‌عنوان سیستم‌های پیچیده شبکه‌ای شناخته شود که شامل نهادهای متنوعی است که وظیفه این سیستم‌ها مدیریت محصولات تولیدی توسط تأمین‌کنندگان و تحویل آن‌ها به مشتریان و سازمان‌های مربوط به آن‌ها می‌باشد. اخیراً رفتار این سیستم‌ها اهمیت قابل توجهی پیدا کرده است، زیرا شرکت‌ها با چالش مسائل پایدار ناشی از افزایش آگاهی جامعه نسبت به مسائل محیطی و اجتماعی مواجه هستند [۲]. در واقع می‌توان گفت که SSCM تعادلی بین مفاهیم سوددهی مالی، عملکرد اجتماعی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ایجاد می‌کند [۳]. در این راستا، موجودی و حمل‌ونقل دو عملیات برجسته در سیستم‌های لجستیک هستند که بر ابعاد زنجیره تأمین پایدار تأثیر گذارند. مسئله مسیریابی موجودی (IRP)، که ادغام عملیات موجودی و حمل‌ونقل است، یک مسئله مهم و مورد مطالعه در مدیریت تدارکات است. هدف این مسئله تعیین بهترین مسیر جهت حمل و جابجایی محصولات است که محصول را به چندین مشتری عرضه می‌کند. همچنین مسئله مسیریابی موجودی در زنجیره تأمین پایدار تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین مسیر با کمترین هزینه و بهبود کیفیت سرویس‌دهی و افزایش سطح رضایت‌مندی مشتریان می‌باشد. در این‌گونه مسائل شرکت تحویل‌دهنده تصمیم می‌گیرد که چه مقداری را به کدام مشتری در روز ارسال کند در حالی که در مدل‌های مسیریابی، سفارشات باید تا انتهای روز ارسال شده باشند و افق برنامه‌ریزی بلندمدت‌تری را دارا می‌باشد. مسائل مسیریابی موجودی شامل مدل‌های تک‌هدفه و چندهدفه می‌باشد. مدل‌های تک‌هدفه، از جنبه‌های مختلف اقتصادی، کاهش هزینه‌های موجودی و مسیریابی و انتشار کربن را بررسی کرده و مدل‌های چند هدفه ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را به‌طور همزمان در نظر گرفته و به کاهش هزینه‌ها می‌پردازند. فرآیند مسیریابی به‌معنای انتخاب بهترین مسیر از بین سایر مسیرها می‌باشد. یکی از موضوعات مهم در مسائل مسیریابی موجودی پایدار، حمل‌ونقل مواد خطرناک

(ضایعات پزشکی، مواد سوختنی و اشتعال‌زا و...) می‌باشد که طبق گزارش وزارت حمل‌ونقل آمریکا در سال ۲۰۰۴ معیارهای مختلفی مانند ریسک جمعیتی، نوع راه، ملاحظات اقتصادی، توجه به مسیرهای جایگزین، شرایط آب‌وهوایی، حجم ترافیک و ... در این مسائل مهم بوده و بر انتخاب مسیر اثرگذار می‌باشند [۴]. ارزیابی ریسک اصولاً زمانی معنا پیدا می‌کند که پیش آمدن یک حادثه حتی برای یک‌بار، آسیب عمومی زیادی را وارد می‌کند. ریسک در واقع مقدار شدت و خسارتی است که به‌دلیل حمل و نگهداری مواد خطرناک ممکن است به یک مرکز جمعیتی وارد شود و معمولاً با تعداد مردمی که در هر ناحیه در معرض خطر هستند اندازه‌گیری می‌شود؛ به همین دلیل در این مطالعه ریسک حمل‌ونقل و نگهداری موجودی به‌صورت تصادفی و با توجه به نواحی جمعیتی و نیز با در نظر داشتن مسیر جایگزین برای کاهش خطر تصادفات در نظر گرفته شده است. علی‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که در رابطه با مسئله مسیریابی موجودی در زنجیره تأمین پایدار انجام شده است، مطالعه جامعی که بتواند به‌طور همزمان مسئله مسیریابی موجودی را برای مواد خطرناک در شرایط عدم قطعیت بررسی کند، وجود ندارد. به همین دلیل این مطالعه به بررسی شکاف‌های تحقیقاتی موجود در مقایسه با مطالعات پیشین پرداخته و مباحث عدم قطعیت در تقاضا، سناریو محور بودن و در نظر داشتن چندین محصول خطرناک و محاسبه ریسک ناشی از تصادفات در حمل‌ونقل را بررسی می‌کند. در واقع، عدم قطعیت سبب رسیدن به جواب‌هایی نزدیک به واقعیت در مدل‌ها می‌شود و اثر اقتصادی و زیست‌محیطی زنجیره تأمین را در افق‌های متوسط و بلند مدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این‌گونه مسائل دو هدف اصلی کاهش هزینه و ریسک مورد توجه است که با توجه به اهمیت ریسک، هدف در ابتدا کاهش ریسک و سپس کاهش هزینه خواهد بود. همچنین موضوع مهم دیگر که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است، برقراری تعادل بین هزینه‌های کلی و ریسک ناشی از حمل‌ونقل و نگهداری مواد خطرناک است. بنابراین در این پژوهش هدف اصلی مدل را تعادل بین هزینه‌ها و ریسک قرار می‌دهیم تا بتوان همزمان با حداقل کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری، بیشینه ریسک را نیز کاهش داده و به تعادلی مناسب بین هزینه‌ها و ریسک دست پیدا کرد. علاوه بر هزینه و ریسک، بُعد زیست‌محیطی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری زنجیره تأمین ایفا می‌کند. به‌ویژه در زمینه حمل مواد خطرناک، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از وسایل نقلیه می‌تواند پیامدهای جدی برای محیط‌زیست و سلامت عمومی داشته باشد. کاهش این آلاینده‌ها نه تنها در راستای الزامات قانونی و سیاست‌های زیست‌محیطی جهانی (مانند توافق‌نامه پاریس) ضروری است، بلکه می‌تواند منجر به بهبود تصویر اجتماعی سازمان‌ها و افزایش پذیرش عمومی شود. از این‌رو، هدف سوم این پژوهش به حداقل رساندن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای اختصاص یافته است تا در کنار کاهش هزینه‌ها و ریسک، بعد زیست‌محیطی نیز به‌طور همزمان در تصمیم‌گیری لحاظ گردد.

آزمایشات محاسباتی در بخش چهارم بررسی شده است. الگوریتم ژنتیک هیبریدی در بخش پنجم ارائه و تفسیر شده و در نهایت نتیجه‌گیری کلی در بخش ششم قرار گرفته است.

۲. مرور ادبیات تحقیق

مرور ادبیات در زمینه زنجیره‌تأمین نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی اجزایی مانند مکان‌یابی تسهیلات، موجودی و حمل‌ونقل منجر به کاهش هرچه بیشتر هزینه‌های شبکه و افزایش کارایی آن نسبت به بهینه‌سازی جداگانه هر یک از این اجزا می‌شود [۱]. یکی از چالش‌های مهم در مسائل مربوط به مسیریابی و حمل‌ونقل در زمینه زنجیره‌تأمین پایدار، جابجایی و حمل مواد خطرناک با توجه به خصوصیات ویژه آن‌ها نظیر قابلیت انفجار و اشتعال، سمی بودن، و تشعشعات خطرناک است. کالاهای خطرناک عبارتند از مواد یا محصولات که موقع جابجایی، عملیات بارگیری یا تخلیه و نگهداری ممکن است باعث انفجار، آتش‌سوزی، خرابی تجهیزات فنی و نیز مرگ، مسمومیت و یا بیماری انسان و حیوان گردد [۲]. در سال‌های اخیر، مقالاتی در زمینه زنجیره‌تأمین پایدار ارائه شده است که به‌طور مختصر به‌مرور برخی از آن‌ها پرداخته‌ایم.

هو و همکاران [۵]، یک مسأله زنجیره‌تأمین سه‌سطحی را با موجودی و حمل‌ونقل مواد خطرناک در میان تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و خرده‌فروشان بررسی کردند. هدف به‌دست آوردن بهترین تعادل بین ریسک و هزینه با این فرض است که تقاضاهای خرده‌فروشان متغیرهای فازی هستند. با توجه به اینکه تغییر بارگذاری وسیله نقلیه تأثیر قابل توجهی بر ریسک حمل‌ونقل دارد، لذا آن‌ها یک مدل ریسک حمل‌ونقل وابسته به بار را فرموله کرده و یک مدل برنامه‌ریزی برای به حداقل رساندن انحرافات مثبت ریسک مورد انتظار و هزینه مورد انتظار از سطح ریسک و سطح هزینه ارائه شده، پیشنهاد کرده و یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته که کروموزوم‌های آن شامل دونوع ژن است، برای مدیریت مدل برنامه‌ریزی هدف طراحی کردند. نتایج حاصل از مطالعه بهبود و کاهش ریسک حمل‌ونقل و هزینه را نشان داده است. علینقیان و زمانی [۶]، یک مدل دوهدفه جدید برای مسأله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن پیشنهاد کردند. اهداف مدل پیشنهادی کاهش انتشار و به حداقل رساندن اندازه ناوگان، نوع وسیله نقلیه، مسیریابی و هزینه‌های موجودی است. با توجه به ماهیت NP-سخت مسأله ارزیابی شده، یک الگوریتم فراابتکاری دوهدفه مبتنی بر الگوریتم تکاملی کوانتومی برای دستیابی به این اهداف پیشنهاد شده است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج آن با نتایج روش دقیق و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب II (NSGAII) مقایسه شده و نتایج این مقایسه‌ها نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی است. تیماچی و همکاران [۷]، یک مسأله مسیریابی موجودی برای اقلام دارویی خطرناک و روبه زوال در یک شبکه بهداشت و درمان را بررسی کردند. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط دو هدفه پیشنهاد کردند که در

محصولات دارویی و پسماندهای بیمارستانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین نوع مواد خطرناک می‌باشند. این دسته شامل داروهای پرخطر مانند داروهای شیمی‌درمانی و آنتی‌بیوتیک‌های تاریخ‌گذشته، و همچنین پسماندهای بیمارستانی نظیر سرنگ‌ها و سوزن‌های آلوده، کیسه‌های خون مصرف‌شده و مواد شیمیایی ضدعفونی‌کننده است. در این مطالعه مسائل مسیریابی موجودی چند محصولی از این نوع مواد خطرناک مدنظر بوده که نحوه صحیح پخش، جمع‌آوری و نگهداری آن‌ها سبب کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی و اجتماعی می‌شود. همچنین جهت بررسی‌های دقیق‌تر و دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت، چندین مثال از مدل با الگوریتم ژنتیک هیبریدی (الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب همراه با جستجوی محلی) حل شده و نتایج به‌طور کامل تجزیه، تحلیل و تفسیر گردیده است. نکته حائز اهمیت در این پژوهش این است که، مدل پیشنهادی به‌طور خاص بر جریان مستقیم مواد خطرناک تمرکز دارد و حمل‌ونقل معکوس یا جریان‌های چندسطحی در چارچوب این مطالعه مورد توجه قرار نگرفته است.

مهم‌ترین نوآوری‌ها و مشارکت‌های این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- توسعه یک مدل ریاضی سه‌هدفه تحت عدم قطعیت برای مسیریابی موجودی مواد خطرناک چندکالایی که به‌طور همزمان هزینه، بیشینه ریسک و میزان آلاینده‌گی را بهینه می‌کند؛ در حالی که بیشتر پژوهش‌های پیشین یا به تک‌هدفه بودن محدود بوده‌اند یا ابعاد ریسک و آلاینده‌گی را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند.
 - مدل‌سازی همزمان عدم قطعیت تقاضا و ریسک حمل‌ونقل به‌صورت سناریومحور، که باعث افزایش واقع‌گرایی مدل در مواجهه با تغییرات ناگهانی در شرایط عملیاتی می‌شود.
 - تلفیق روش دقیق و فراابتکاری: استفاده از روش E-محدودیت و حل‌کننده BARON برای اعتبارسنجی مدل در ابعاد کوچک، و طراحی الگوریتم ترکیبی NSGA-II همراه با جستجوی محلی برای حل مسائل با ابعاد بزرگ؛ این رویکرد ترکیبی، دقت و مقیاس‌پذیری را همزمان تضمین می‌کند.
 - تمرکز بر حوزه حساس مواد خطرناک پزشکی (مانند داروهای شیمی‌درمانی، داروهای آنتی‌بیوتیک تاریخ‌گذشته، سرنگ‌ها و پسماندهای بیمارستانی آلوده) و حمل این محصولات؛ که کمتر به‌صورت جامع و چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت در ادبیات بررسی شده‌اند. این تمرکز، علاوه بر جنبه نظری، دارای اهمیت کاربردی بالا در مدیریت زنجیره‌تأمین نظام سلامت است.
 - ارائه تحلیل جامع اثر پارامترهای کلیدی (مانند شدت حادثه و تغییرات تقاضا) بر هزینه، ریسک و آلاینده‌گی، که به مدیران زنجیره‌تأمین برای تصمیم‌گیری آگاهانه کمک می‌کند.
- ساختار کلی مقاله به‌شرح زیر است: مرور ادبی مطالعات گذشته در بخش دوم ارائه شده است. بخش سوم مدل‌سازی مسأله را ارائه داده و

آن تابع هدف اول، کل هزینه لجستیک از جمله هزینه‌های سفارش، حمل‌ونقل، تحویل، کمبود و هزینه‌های نگهداری موجودی را حداقل کرده و تابع هدف دوم حداکثر تلفات تصادف را در طول توزیع بین تمام دوره‌ها به حداقل می‌رساند. آن‌ها برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، چندین مثال عددی توسط CPLEX تولید و حل کرده و با راه‌حل‌های یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی کارآمد مقایسه کردند. نتایج نشان داد که گزینه انتقال نه تنها می‌تواند به عنوان اهرمی برای افزایش عملکرد شبکه تأمین اقتصادی از طریق صرفه‌جویی در مسیرها استفاده شود، بلکه می‌تواند به سیستم برای جلوگیری از مسیرهای پرخطر کمک کند. سان و همکاران [۸]، مسأله مسیریابی مواد خطرناک را در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی راه‌آهن-راه‌آهن با ساختار توپی و پره بررسی کردند، که در آن ریسک با ضرب قرار گرفتن در معرض جمعیت و حجم مرتبط با مواد خطرناک اندازه‌گیری شده و به حداقل رساندن ریسک کل کلیه سفارش‌های حمل‌ونقل مواد خطرناک به عنوان هدف ریسک تعیین شد. برای این منظور ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط فازی دو هدفه ایجاد شده و سپس یک استراتژی راه‌حل دقیق سه مرحله‌ای را ایجاد کردند که محدودیت شانس اعتباری فازی، تکنیک خطی‌سازی و روش وزن‌دهی نرمال‌شده را ترکیب می‌کند. در نهایت، یک آزمایش محاسباتی برای تأیید امکان‌سنجی روش پیشنهادی در برخورد با مسأله انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که معاوضه بین دوهدف متضاد می‌تواند به‌طور مؤثر با استفاده از مرز پارتو برای مسأله مسیریابی مواد خطرناک ایجاد شود. علاوه بر این، سطح اعتبار و سقف انتشار دی اکسید کربن به‌طور قابل توجهی بر بهینه‌سازی مسیریابی مواد خطرناک تأثیر می‌گذارد. ویولی و همکاران [۹]، یک رویکرد پویا و تصادفی برای مسأله مسیریابی موجودی پیشنهاد کردند که در آن محصولات با فسادپذیری بالا باید از یک تأمین‌کننده به مجموعه‌ای از مشتریان تحویل داده شوند. برای این منظور یک رویکرد افق غلشی مبتنی بر یک برنامه خطی تصادفی چندمرحله‌ای پیشنهاد کرده و آزمایش‌های محاسباتی را بر روی نمونه‌هایی با اندازه متوسط براساس داده‌های واقعی ارائه‌شده توسط یک شرکت کشاورزی-غذایی فعال در جنوب ایتالیا، طراحی کردند تا اثربخشی رویکرد پیشنهادی را نشان دهند. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نشان‌دهنده کاهش ریسک فساد مواد حمل‌شدنی به مشتریان بوده است. هو و همکاران [۱۰]، مسأله مسیریابی موجودی چنددوره‌ای مواد خطرناک را با فرض ظرفیت تولید محدود یک سازنده معین بررسی کردند. برای این منظور، یک مدل ریسک وابسته به بارگذاری را برای حمل‌ونقل چند وسیله نقلیه فرموله کرده و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای به حداکثر رساندن سود زنجیره‌تأمین ارائه کردند. سپس یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته با در نظر گرفتن دو بُعد کروموزوم که دوره فوق‌الذکر و مقدار عرضه را پوشش می‌دهد، برای مدیریت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ابداع کردند. آزمایش‌های عددی انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از تصمیم‌گیری مشترک چند دوره‌ای پیشنهادی می‌تواند به‌طور قابل توجهی سود کلی

زنجیره‌تأمین را در مقایسه با استفاده مکرر از تصمیم یک دوره زمانی افزایش دهد، در حالی که به‌طور مؤثر ریسک آن را کاهش می‌دهد. توانا و همکاران [۱۱]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه جدید برای حل مشکلات مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی در زنجیره‌های تأمین سبز با انتشار کربن کم تحت عدم قطعیت پیشنهاد کردند. مدل پیشنهادی برای انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش با در نظر گرفتن اولویت‌های مکان، مسیریابی ناهمگن خودرو، نیازهای ذخیره‌سازی، تقاضای نامشخص و کمبود سفارش استفاده می‌شود. مدل دو هدفه فرموله‌شده با یک رویکرد راه‌حل چند هدفه فازی وزنی همراه با یک الگوریتم شبیه‌سازی هوشمند جدید برای اطمینان از امکان‌سنجی فضای راه‌حل، حل شده و جهت بررسی کارایی مدل پیشنهادی، مسائل با اندازه‌های مختلف تولید و حل شد. نتایج حاصل از مدل نشان‌دهنده کاهش انتشار کربن و مسیریابی صحیح جهت پشتیبانی از نیازهای ذخیره‌سازی تحت عدم قطعیت است. رهبری و همکاران [۱۲]، یک مدل ریاضی مسأله مکان‌یابی، موجودی، مسیریابی برای مدیریت مواد خطرناک و پسماند در دو سطح زنجیره‌تأمین با در نظر گرفتن ناوگان خودروهای ناهمگن و با هدف کاهش ریسک زنجیره‌تأمین، به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش هزینه‌های زنجیره‌تأمین پیشنهاد کردند. با توجه به اینکه مدل پیشنهادی NP-سخت است، یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه به نام الگوریتم بهینه‌سازی بیوه سیاه چندهدفه ارائه شده است. عملکرد الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی با الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده چند هدفه و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب II (NSGA II) مقایسه شده است. یک رویکرد جدید مبتنی بر مینکوفسکی برای انتخاب یک راه‌حل منفرد از مجموعه راه‌حل‌های غیرمسلط جبهه اول به عنوان راه‌حل بهینه نهایی برای مسأله پیشنهادی ارائه شده است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که الگوریتم NSGA II در مسائل آزمون مقیاس کوچک و متوسط دقت بهتری می‌دهد، اما MOBWO در مسائل آزمون مقیاس بزرگ در مقایسه با دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد. فتاحی و تنابلی [۱۳]، مسأله مسیریابی موجودی تصادفی با حمل‌ونقل جانبی را برای محصول فاسدشدنی در یک شبکه زنجیره‌تأمین تحت شرایط عدم قطعیت بررسی کردند. با توجه به پیچیدگی مدل ریاضی، یک رویکرد اکتشافی مبتنی بر لاگرانژ ایجاد کردند که مرزهای بالایی و پایینی با کیفیت خوب را ارائه می‌دهد. خروجی مدل از طریق مثال‌های مختلف برای زنجیره‌تأمین محصولات لبنی مورد بحث قرار گرفت و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نشان‌دهنده خروجی‌های بهتر نسبت به سایرین بوده است. فروزش و همکاران [۱۴]، مطالعه‌ای با هدف به حداقل رساندن اثرات اختلال با ارائه استراتژی‌های جدید، مانند منابع متعدد، تأمین‌کنندگان مالی، همکاری افقی، ریسک مسیر، و شعاع پوشش، در طراحی یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط اعداد صحیح چند هدفه برای زنجیره‌تأمین چند محصولی، چند دوره‌ای، چند وجهی G-Resilient ارائه کردند. سپس، یک رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی قوی

با استفاده از اندازه‌گیری اعتبار و توابع عضویت متغیرهای فازی تعمیم‌یافته با مقدار بازه‌ای نوع دو برای مواجهه با عدم قطعیت‌های معرفتی، مانند ظرفیت عرضه تسهیلات، تقاضای مشتری، هزینه حمل‌ونقل و عامل انتشار CO_2 ، در مدل ریاضی پیشنهادی به‌کار بردند. عملکرد مدل پیشنهادی توسط یک مطالعه موردی واقعی در صنایع غذایی تأیید شده و مفاهیم مدیریتی ارائه شد. ساداتی کنتی و همکاران [۱۵]، اهداف مدیریت زنجیره‌تأمین پایدار را با بررسی مدیریت مواد خطرناک و به حداقل رساندن هزینه‌های زنجیره‌تأمین و خطر ناشی از مواد خطرناک در شبکه به‌طور همزمان بررسی کردند. برای این منظور از کلاهی کربن و مکانیسم تجارت برای کنترل میزان انتشار کربن در شبکه استفاده شده است و یک مسأله مکان-موجودی-مسیریابی با درنظر گرفتن وسیله نقلیه ناوگان ناهمگن، که در آن تصمیمات تولید درنظر گرفته می‌شود، بررسی شده و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای فرمول‌بندی مسأله ارائه شده است. برای بهبود مدل ارائه‌شده از الگوریتم گوزن قرمز چند هدفه استفاده شده و عملکرد آن با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه مقایسه شده است. درنهایت، سه معیار جدید برای بررسی عملکرد فراابتکاری کاربردی ارائه شده است و همچنین یک تکنیک جدید برای انتخاب مطمئن‌ترین راه‌حل پیشنهاد شده است. پسندیده و همکاران [۱۶]، یک مسأله مکان-موجودی-مسیریابی برای محصولات فاسدشدنی با شبکه چندبجه‌چند و ناوگان خودروهای ناهمگن بررسی کردند. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده، در سیستم مدل‌سازی جبری عمومی تأیید شده، و یک الگوریتم آرامش لاگرانژ و الگوریتم ژنتیک ترکیبی-بهینه‌سازی بیوه سیاه (HGABWO) برای حل مسائل مختلف و تعیین بهترین مرزهای پایین و بالایی ارائه شده است. هد از ارائه مدل پیشنهادی به حداقل رساندن هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل، هزینه‌های نگهداری موجودی، هزینه‌های افتتاح تسهیلات، هزینه‌های فروش ازدست‌رفته و میزان انتشار CO_2 بوده است. یافته‌های حاصل از پژوهش نشان داد که نتایج راه‌حل‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم HGABWO نسبت به الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی بیوه سیاه بهتر است. ازطرفی زمان حل مسائل در مقیاس بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی نسبت به GAMS به‌میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. پرز-لچوگا و همکاران [۱۷]، توسعه‌ای از مدل مسیریابی تصادفی را با ظرفیت ثابت برای توزیع محصولات فاسدشدنی با یک پنجره زمانی ارائه کردند. برای این منظور از توزیع احتمال نظری جهت مدل‌سازی عمر محصولات انتقال‌یافته و زمان سفر در شبکه استفاده کرده و برای بهینه‌سازی مدل پیشنهادی، از الگوریتم جستجوی تصادفی عمومی استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که در محدوده زمانی تعیین شده جهت حمل‌ونقل یخچالی با مدل پیشنهادی، کاهش آلودگی به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. محرابی دلشاد و همکاران [۱۸]، مطالعه‌ای با هدف بررسی مکان

موجودی در مرحله پاسخ لجستیک بشردوستانه با استفاده از یک شبکه لجستیکی سه سطحی برای یکپارچه‌سازی مشکلات تخصیص مکان مانند مکان انبار و تخصیص پناهگاه به هر تأسیسات، و سپس تعیین سطح موجودی در هر انبار انجام دادند. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه ارائه شده است که هدف اول کاهش هزینه‌های مکان و هزینه‌های موجودی است که تقاضای احتمالی، عوامل مصرف و هزینه‌های حمل‌ونقل را درنظر می‌گیرد و هدف دوم افزایش سطح خدمات ارائه‌شده به قربانیان در مدل است. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نشان‌دهنده بهبود کارایی و کیفیت خدمات، و حمل مواد و کالاها با کمترین هزینه ممکن بود. عباسی و همکاران [۱۹]، مسأله مسیریابی تولید را برای کاهش ریسک مرتبط با تولید و توزیع محصولات خطرناک بررسی کردند. برای این منظور یک برنامه عدد صحیح مختلط برای شبیه‌سازی مسأله پیشنهاد کردند. تابع ریسک غیرخطی مدل پیشنهادی به بار ماشین، ریسک جمعیت و ماده خطرناک بستگی دارد. در این مطالعه از چندین مورد برای ارزیابی مدل، حل آن و مقایسه دومدل خطی و غیرخطی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل تقریبی ممکن است به‌طور همزمان نتیجه دقیق‌تری به‌دست آورد. موندیم و همکاران [۲۰]، یک رویکرد دوهدفه برای مسأله مسیریابی موجودی با ناوگان ناهمگن ایجاد کردند که در آن به‌طور همزمان هزینه‌ها حداقل شده و انتشار CO_2 به کمترین میزان برسد. برای این منظور از روش‌های یادگیری ماشین استفاده کرده و میزان انتشار CO_2 را پیش‌بینی کردند و سپس، یک روش محدودشده برای یافتن مرز کارآمد پارتو با استفاده از روش شاخه‌وبرش^۱ پیشنهاد کردند. آزمایش‌های محاسباتی بر روی ۲۸۵ مورد در یک کارخانه خودروسازی انجام شده و نتایج نشان داد که رویکرد پیشنهادی منجر به کاهش ۵۸ درصدی CO_2 شده است. نخعی‌نژاد و همکاران [۲۱]، مدلی بهینه‌سازی برای مدیریت زنجیره‌تأمین سبز ارائه کردند که به‌طور همزمان هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، به‌ویژه هزینه‌های مربوط به انتشار کربن در حمل‌ونقل و نگهداری محصولات را مدنظر قرار می‌دهد. این مدل چند محصولی و چند دوره‌ای بوده و ابتدا با برنامه‌ریزی غیرخطی صحیح مختلط (MINLP) فرموله شده و سپس به‌صورت خطی (MILP) تبدیل گردیده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش مالیات بر انتشار کربن منجر به کاهش میزان انتشار و افزایش هزینه‌های کلی زنجیره‌تأمین می‌شود؛ همچنین، افزایش تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی هزینه‌های کل و حمل‌ونقل را بالا می‌برد، اما تأثیر محسوسی بر هزینه‌های نگهداری و انتشار کربن ندارد. این مدل به مدیران زنجیره‌تأمین امکان می‌دهد تا تصمیمات مؤثرتری در جهت کاهش آلودگی و ارتقای پایداری اتخاذ نمایند. دارستانی و همکاران [۲۲]، شبکه‌ای بهینه برای زنجیره‌تأمین گوشت تازه طراحی کردند که با لحاظ کردن عدم قطعیت تقاضا و به‌کارگیری استراتژی‌های انعطاف‌پذیری مانند افزایش ظرفیت و انتخاب تأمین‌کنندگان مطمئن، تاب‌آوری زنجیره را ارتقا می‌بخشد.

اهداف اصلی این پژوهش کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های ثابت و افزایش سطح سرویس در زنجیره تأمین است. تصمیمات کلیدی شامل انتخاب مزارع، تخصیص مکان کشتارگاه‌ها، انتخاب خرده‌فروشان، تعیین جریان مواد، شناسایی ریسک‌ها و تعیین سطح سرویس می‌باشد. مدل به شکل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو هدفه تدوین شده و با روش ϵ -محدودیت تقویت‌شده حل شده است. کارایی مدل از طریق مثال‌های عددی بررسی و با مدل‌های پیشین مقایسه گردیده است.

جدول (۱) برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های پیشین را برای مقایسه با پژوهش حاضر و خوانایی بیشتر ارائه می‌دهد. همان‌طور که از جدول (۱) قابل مشاهده است، بیشتر پژوهش‌های پیشین (مانند [۵]، [۷]، [۱۰]) تنها بر ریسک حمل‌ونقل یا عدم قطعیت تقاضا به صورت مجزا تمرکز کرده‌اند، در حالی که تعامل این دو عامل در مسیریابی مواد خطرناک کمتر بررسی شده است. علاوه بر این، اگرچه برخی مطالعات (مانند [۶]، [۱۱]، [۱۲]) به اهداف زیست‌محیطی پرداخته‌اند، اما مدل‌های موجود اغلب تضاد بین ایمنی، هزینه و پایداری را در زنجیره تأمین مواد خطرناک (به ویژه در بخش بهداشت) بهینه‌سازی نکرده‌اند. پژوهش‌های پیشین (مانند [۸] و [۱۶]) عمدتاً از روش‌های دقیق مانند CPLEX یا الگوریتم‌های تک‌هدفه مانند NSGA-II استفاده کرده‌اند، اما کارایی در مسائل بزرگ مقیاس و ادغام جستجوی محلی برای بهبود راه‌حل‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعاتی مانند [۷] و [۱۹] به مسیریابی

مدل ریاضی این پژوهش بر پایه ایده‌های کلیدی برخی از این مطالعات، از جمله تیماچی و همکاران [۵]، هو و همکاران [۷] و سان و همکاران [۸] توسعه یافته است. در مدل هو و همکاران، ریسک حمل‌ونقل وابسته به بار در یک چارچوب دوهدفه (هزینه و ریسک) فرموله شد. تیماچی و همکاران مسأله مسیریابی موجودی برای اقلام دارویی خطرناک را با دو هدف (کاهش هزینه و ریسک) و بدون لحاظ عدم قطعیت بررسی کردند. همچنین سان و همکاران ریسک را براساس «حاصل ضرب جمعیت در معرض خطر و حجم کالای خطرناک» تعریف نمودند، اما اثرات همزمان آلاینده‌گی و تغییرات تقاضا را در نظر نگرفتند. در مقایسه با این مطالعات، مدل پیشنهادی حاضر دارای تفاوت‌ها و نوآوری‌های زیر است:

- ۱) توسعه یک مدل سه هدفه که به طور همزمان هزینه، بیشینه ریسک و آلاینده‌گی را بهینه می‌کند، در حالی که بیشتر پژوهش‌های پیشین دو هدفه یا تک‌هدفه بوده‌اند.
- ۲) استفاده از یک رویکرد سناریومحور برای مدل‌سازی همزمان عدم قطعیت تقاضا و ریسک حمل‌ونقل؛ این ویژگی باعث افزایش واقع‌گرایی مدل و تضمین سطح خدمت ۱۰۰٪ در تمامی سناریوها می‌شود.

جدول (۱). مقایسه پژوهش‌های پیشین

نویسندگان / سال	نوع مسأله	اهداف مدل	نحوه لحاظ ریسک / عدم قطعیت	روش حل	تفاوت و نوآوری تحقیق حاضر
هو و همکاران [۵]	مسیریابی موجودی مواد خطرناک	دوهدفه (هزینه، ریسک)	ریسک وابسته به بار؛ تقاضا فازی	مدل‌سازی ریاضی، الگوریتم ژنتیک	پژوهش حاضر سه‌هدفه (هزینه، ریسک، آلاینده‌گی) و سناریومحور
تیمماچی و همکاران [۷]	مسیریابی موجودی داروهای خطرناک	دوهدفه (هزینه، ریسک تصادف)	تقاضای قطعی؛ ریسک به صورت تلفات	CPLEX، الگوریتم ژنتیک ترکیبی	عدم قطعیت تقاضا، چندمحصولی، سناریومحور
سان و همکاران [۸]	مسیریابی چندوجهی مواد خطرناک	دوهدفه (ریسک، هزینه)	ریسک = جمعیت × حجم؛ عدم قطعیت محدود	مدل غیرخطی فازی، روش دقیق	افزودن آلاینده‌گی به همراه ریسک و هزینه
علی‌نژاد و زمانی [۶]	مسیریابی موجودی سبز	دوهدفه (انتشار، هزینه/اندازه ناوگان)	تقاضای قطعی	الگوریتم تکاملی کوانتومی، NSGA-II	تمرکز بر مواد خطرناک پزشکی، ریسک سناریویی
رهبری و همکاران [۱۲]	مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی مواد خطرناک	سه‌هدفه (هزینه، ریسک، انتشار)	تقاضای قطعی	الگوریتم MOBWO، مقایسه با NSGA-II	مدل سناریومحور با عدم قطعیت تقاضا و ریسک
عباسی و همکاران [۱۹]	مسیریابی تولید مواد خطرناک	مینیمم‌سازی ریسک تولید و توزیع	ریسک غیرخطی (بار، جمعیت، نوع ماده)	مدل MINLP	ترکیب همزمان ریسک و تقاضای غیرقطعی
تحقیق حاضر	مسیریابی موجودی مواد خطرناک پزشکی (چندمحصولی)	سه‌هدفه (هزینه، بیشینه ریسک، آلاینده‌گی)	همزمان: تقاضای غیرقطعی و ریسک سناریو-محور	ϵ -محدودیت، BARON (اعتبارسنجی) و الگوریتم ترکیبی NSGA-II، جستجوی محلی	نوآوری‌ها: ۱) سه‌هدفه جامع؛ ۲) چندمحصولی؛ ۳) سناریو-محور (تقاضا + ریسک)؛ ۴) تعریف ریسک دقیق (شدت حادثه + بار وسیله نقلیه)؛ ۵) رویکرد ترکیبی دقیق-فراابتکاری

محصول حمل شده از توزیع‌کننده به خرده‌فروش و از خرده‌فروش به مشتری و همچنین سطح موجودی خرده‌فروش، تصمیم‌گیری می‌شود. مدل پیشنهادی با هدف بهینه‌سازی همزمان سه معیار اصلی طراحی شده است:

- ۱) حداقل‌سازی کل هزینه‌ها (حمل‌ونقل و نگهداری موجودی)،
- ۲) حداقل‌سازی بیشینه ریسک ناشی از حمل مواد خطرناک،
- ۳) حداقل‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای.

در ادامه این بخش، مفروضات، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل به تفصیل تشریح می‌شوند تا چارچوب ریاضی مدل پیشنهادی به‌طور کامل معرفی گردد.

۳-۱. فرضیات

۱: زنجیره‌تأمین موردنظر در سطح توزیع‌کننده مرکزی (نظیر داروخانه)، خرده‌فروش (بیمارستان) و مشتری (بیمار) می‌باشد. در این پژوهش تنها جریان مستقیم کالا از توزیع‌کننده به خرده‌فروش و سپس به مشتری درنظر گرفته شده است و جریان‌های بازگشتی یا چندمسیره لحاظ نمی‌شود.

۲: دوره برنامه‌ریزی مسأله را تک‌دوره‌ای درنظر می‌گیریم.

۳: تقاضای خرده‌فروش و مشتری غیرقطعی است.

۴: تقاضای هر خرده‌فروش از ابتدا مشخص نیست و با توجه به میزان تقاضای مشتری مشخص می‌شود.

۵: مقدار موجودی اولیه برای خرده‌فروشان صفر درنظر گرفته می‌شود.

۶: مجموع کالای حمل‌شده از مسیر نباید از ظرفیت وسیله نقلیه در آن مسیر بیشتر باشد.

۷: ریسک حمل‌ونقل به‌صورت تصادفی درنظر گرفته شده است؛ بدین‌معنا که احتمال وقوع حادثه در هر مسیر وابسته به پارامترهای احتمالی (مانند شدت حادثه و شرایط محیطی) می‌باشد. علاوه بر این، سطح ریسک هر مسیر متناسب با تراکم جمعیت مناطق اطراف آن مسیر تعریف شده است؛ به‌گونه‌ای که عبور از مناطق پرجمعیت، به‌دلیل احتمال خسارت جانی و مالی بیشتر، سطح ریسک بالاتری ایجاد می‌کند.

۸: مواد خطرناک را چند محصولی (داروهای بیماران شیمیایی، پسماندهای بیمارستانی، تجهیزات پزشکی و...) درنظر می‌گیریم. محصولات مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو دسته کلی هستند:

الف) داروهای پرخطر مانند داروهای شیمی‌درمانی و آنتی‌بیوتیک‌های تاریخ‌گذشته،

ب) پسماندهای بیمارستانی شامل سرنگ‌ها و سوزن‌های آلوده، کیسه‌های خون مصرف‌شده و مواد شیمیایی ضدعفونی‌کننده.

از آنجا که این اقلام از نظر وزن و حجم متفاوت هستند، ظرفیت وسایل نقلیه متناسب بانوع محصول محاسبه می‌شود. همچنین در این پژوهش فرض شده است که هروسیله نقلیه در هر سفر تنها یک نوع محصول را حمل می‌کند. این فرض علاوه بر افزایش ایمنی حمل‌ونقل، از اختلاط و واکنش احتمالی بین انواع مختلف مواد خطرناک جلوگیری می‌نماید.

۳) درنظر گرفتن چندین محصول خطرناک شامل داروهای پرخطر (مانند داروهای شیمی‌درمانی و آنتی‌بیوتیک‌های تاریخ‌گذشته) و پسماندهای بیمارستانی (مانند سرنگ‌ها و سوزن‌های آلوده، کیسه‌های خون مصرف‌شده و مواد شیمیایی ضدعفونی‌کننده) که کمتر در ادبیات به‌طور یکپارچه مدل‌سازی شده‌اند.

۴) تعریف ریسک براساس نواحی جمعیتی، شدت حادثه در هر مسیر و وضعیت بار وسیله نقلیه (پر یا خالی بودن)، همراه با درنظر گرفتن جریمه متناسب با سطح بار در زمان حادثه؛ این رویکرد باعث می‌شود شاخص ریسک جامع‌تر و نزدیک‌تر به شرایط واقعی باشد.

۵) تلفیق روش‌های حل دقیق و فراابتکاری: در این پژوهش ابتدا از روش ε-محدودیت و حل‌کننده BARON برای مسائل کوچک استفاده شده تا اعتبار مدل تأیید گردد، سپس یک الگوریتم ترکیبی NSGA-II همراه با جستجوی محلی برای حل مسائل بزرگ‌مقیاس طراحی و پیاده‌سازی شده است؛ این درحالی است که اغلب پژوهش‌های پیشین تنها یکی از این دو رویکرد را به‌کار برده‌اند.

در این پژوهش تمرکز اصلی بر مواد خطرناک پزشکی قرار دارد که به‌دلیل ماهیت سمی، عفونی و اشتعال‌زا از حساسیت بالایی برخوردارند. این مواد شامل داروهای پرخطر مانند داروهای شیمی‌درمانی و آنتی‌بیوتیک‌های تاریخ‌گذشته، و نیز پسماندهای بیمارستانی نظیر سرنگ‌ها و سوزن‌های آلوده، کیسه‌های خون مصرف‌شده و مواد شیمیایی ضدعفونی‌کننده می‌باشند. انتخاب این دسته از مواد به‌دلیل نقش پررنگ آن‌ها در ایجاد تهدیدات زیست‌محیطی و بهداشتی و همچنین خلأ موجود در مطالعات پیشین صورت گرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر با ارائه یک مدل چن‌دهدغه، که همزمان کاهش ریسک حوادث و مدیریت عدم قطعیت تقاضا را در مسیریابی موجودی مواد خطرناک درنظر می‌گیرد، و نیز با طراحی یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر NSGA-II همراه با جستجوی محلی، چارچوبی یکپارچه و کارآمد برای مسائل بزرگ‌مقیاس فراهم کرده است. این ترکیب نوآوری‌ها، پژوهش حاضر را از مطالعات مشابه متمایز می‌سازد.

۳. بیان مسأله

مسأله مورد مطالعه در این پژوهش، مسأله مسیریابی موجودی مواد خطرناک پزشکی در یک زنجیره‌تأمین سه‌سطحی است که شامل یک توزیع‌کننده مرکزی (مانند داروخانه مرکزی)، مجموعه‌ای از خرده‌فروشان (بیمارستان‌ها) و مشتریان نهایی (بیماران) می‌باشد. در این شبکه، مواد خطرناک شامل داروهای پرخطر (نظیر داروهای شیمی‌درمانی و آنتی‌بیوتیک‌های تاریخ‌گذشته) و پسماندهای بیمارستانی (مانند سرنگ‌ها و سوزن‌های آلوده، کیسه‌های خون مصرف‌شده و مواد شیمیایی ضدعفونی‌کننده) هستند که به‌دلیل ویژگی‌های سمی و اشتعال‌زا، نیازمند مدیریت ویژه می‌باشند. جریان کالا در مدل تنها به‌صورت مستقیم بوده و درخصوص تعیین مقدار

شده است. به این صورت که برای هر سناریو، میزان تقاضای مشتریان مشخص می‌شود و مدل، راه‌حل بهینه را برای تمام سناریوهای محتمل (با وزن احتمال وقوع آن‌ها) ارائه می‌دهد. لذا اگرچه تقاضا در هر سناریو مشخص است، اما کل مدل از نوع تصادفی سناریو محور می‌باشد.

γ_{0j} : ضریب شدت حادثه در کمان 0 و j

ρ_{0j} : ریسک تصادف ناشی از حمل‌ونقل از توزیع‌کننده 0 به خرده‌فروش j

π_s : احتمال وقوع سناریو

R_{v1} : ظرفیت وسیله نقلیه v_1

f_v : ارزش (قیمت) وسیله نقلیه v

C_{zv} : اگر وسیله نقلیه v از محصول z داشته باشد و تصادف کند جریمه‌ای معادل C_{zv} می‌پردازد.

GHL: حداکثر سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای

GHG_v: مقدار گاز گلخانه‌ای تولید شده توسط نوع وسیله نقلیه v

M_{jz} : ظرفیت خرده‌فروش j از محصول z

N_j : حداکثر ظرفیت نگهداری موجودی توسط خرده‌فروش

M : عدد بزرگ

dis_{jz} : فاصله بین توزیع‌کننده 0 و خرده‌فروش j و z

dis_{jk} : فاصله بین خرده‌فروش j و مشتری k

۳-۴. لیست متغیرهای تصمیم مسئله

Q_{z0jv}^s : مقدار محصول نوع z که از توزیع‌کننده 0 به خرده‌فروش j

توسط وسیله $v \in V_1$ حمل می‌شود تحت سناریوی s

Q_{zjkv}^s : مقدار محصول نوع z که از خرده‌فروش j به مشتری k توسط

وسیله $v \in V_2$ حمل می‌شود در سناریوی s

x_{jkv2}^s : اگر وسیله $v \in V_2$ گره بین k و j را ملاقات کند ۱ در غیر این

صورت ۰ در سناریوی s

x_{jz}^s : اگر خرده‌فروش j در سناریوی s محصول z را نگهداری کند ۱

در غیر این صورت ۰

x_{v1jz}^{so} : اگر وسیله نقلیه $v \in V_1$ از j به z در سناریوی s برود ۱

در غیر این صورت ۰

x_{v10j}^{so} : اگر گره j اولین گره بعد از توزیع‌کننده 0 توسط وسیله $v \in V_1$

در سناریوی s بازدید شود ۱ در غیر این صورت ۰

D_{jzs} : تقاضای خرده‌فروش j از محصول z تحت سناریوی s

u_{v1}^{so} : متغیر کمکی حذف زیرتور

I_{jz}^s : سطح موجودی جدید خرده‌فروش j به‌ازای محصول z در سناریوی

s

۳-۵. سناریوهای عدم قطعیت

در این پژوهش عدم قطعیت‌های موجود از طریق رویکرد سناریو محور مدل‌سازی شده‌اند. سناریوها براساس دو عامل اصلی تعریف گردیدند:

(۱) عدم قطعیت تقاضا: برای مشتریان سه سطح تقاضا (کم، متوسط و زیاد) در نظر گرفته شد که بیانگر نوسانات احتمالی در میزان مصرف داروها و تولید پسماندهای بیمارستانی است.

(۲) عدم قطعیت ریسک حمل‌ونقل: شدت ریسک ناشی از حمل مواد

۹: تلفات حادثه براساس اندازه وسیله نقلیه و محموله آن با ضریب شدت حادثه مشخص (که برای هر مسیر تخمین زده شده است) محاسبه می‌شود.

۱۰: برای هر وسیله نقلیه با توجه به میزان پر یا خالی بودن آن در هنگام تصادف جریمه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

۱۱: هزینه حمل‌ونقل متناسب بانوع محصول می‌باشد.

۱۲: کمبود مجاز نمی‌باشد (در این مدل فرض می‌شود که توزیع‌کننده مرکزی توانایی تأمین همه تقاضاها را در هر سناریویی دارد).

در این مدل، با استفاده از رویکرد سناریو محور، تقاضای غیرقطعی به‌صورت مجموعه‌ای از سناریوهای مشخص مدل‌سازی شده است و در هر سناریو، تأمین کامل تقاضای الزامی است. لذا با اعمال محدودیت‌هایی که در تمامی سناریوها مانع کمبود می‌شوند، تلاش شده است سطح خدمت برابر ۱۰۰٪ حاصل شود. در نتیجه، اگرچه سطح خدمت به‌صورت پارامتری وارد مدل نشده، اما با طراحی مدل به‌گونه‌ای که در هیچ سناریویی کمبود رخ ندهد، مدل عملاً سطح خدمت کامل را تضمین می‌کند.

۳-۲. لیست اندیس‌های مسئله

0: توزیع‌کننده

$j, j = 1, \dots, m$: اندیس خرده‌فروشان

$k, k = 1, \dots, r$: اندیس مشتریان

$z = 1, \dots, t$: اندیس محصولات

$v = 1, \dots, n$: اندیس وسیله نقلیه

v_1 : مجموعه وسایل نقلیه بین توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان

v_2 : مجموعه وسایل نقلیه بین خرده‌فروشان و مشتریان

$s = 1, \dots, h$: اندیس مجموعه سناریوها

در این مدل از رویکرد سناریو محور برای مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده شده است. در هر سناریو، مقادیر متفاوتی از تقاضای مشتریان و خرده‌فروشان در نظر گرفته می‌شود. همچنین ممکن است پارامترهای ریسک تصادف یا شدت حوادث نیز در سناریوها تغییر کنند. سناریوها به‌صورت دستی و مبتنی بر توزیع یکنواخت تعریف شده‌اند و هر یک دارای احتمال وقوع مشخصی هستند. مدل طوری طراحی شده که تمام تصمیمات (مانند مسیرها، مقادیر حمل و...) باید برای هر سناریو پاسخگو باشند. این رویکرد کمک می‌کند تا راه‌حل به‌دست‌آمده در برابر تغییرات احتمالی در تقاضا یا ریسک‌ها پایدار و واقع‌گرایانه‌تر باشد.

۳-۳. لیست پارامترهای مسئله

$f_{c_{v1}}$: هزینه ثابت وسیله حمل‌ونقل v_1

$f_{c_{v2}}$: هزینه ثابت وسیله حمل‌ونقل v_2

vc_{v1} : هزینه متغیر وسیله حمل‌ونقل v_1

vc_{v2} : هزینه متغیر وسیله حمل‌ونقل v_2

H_z : هزینه نگهداری موجودی به‌ازای هر واحد محصول z

D_{jkzs} : تقاضای مشتری k از خرده‌فروش j از محصول z تحت سناریوی s

عدم قطعیت تقاضا از طریق تعریف سناریوهای مختلف مدل‌سازی

$$\sum_{z=1}^t \sum_j Q_{zov_1}^s \leq R_{v_1} \quad \forall v_1, s \quad (4)$$

$$\sum_{z=1}^t Q_{zov_1}^s \leq M \left(\sum_{j'} x_{v_1 j'}^{so} + x_{v_1 0j}^{so} \right) \quad (5)$$

$$Q_{zjkv_2}^s \leq M x_{jkv_2}^s \quad \forall j, v_1, s \quad (6)$$

$$\sum_{j'} x_{v_1 j'}^{so} + x_{v_1 0j}^{so} \leq 1 \quad \forall j, s, v_1 \quad (7)$$

$$\sum_{j'} x_{v_1 j'}^{so} = \sum_{j'} x_{v_1 j j'}^{so} \quad \forall j, s, v_1 \quad (8)$$

$$\sum_{v_1=1}^n Q_{zov_1}^s \leq N_j x_{jz}^s \quad \forall j, z, s \quad (9)$$

$$\sum_{v_2=1}^n Q_{zjkv_2}^s \geq D_{jkzs} \quad \forall j, k, z, s \quad (10)$$

$$\sum_{z=1}^r M_{jz} x_{jz}^s \leq N_j \quad \forall j, s \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^r \sum_{v_1=1}^n Q_{zov_1}^s \geq \sum_{k=1}^r \sum_{v_2=1}^n Q_{zjkv_2}^s \quad \forall j, z, s \quad (12)$$

$$D_{jzs} = \sum_{k=1}^r \sum_{v_2=1}^n Q_{zjkv_2}^s \quad \forall j, z, s \quad (13)$$

$$I_{jz}^s = \sum_{v_1=1}^n Q_{zov_1}^s - D_{jzs} \quad (14)$$

$$u_{j'v_1}^{so} - u_{jv_1}^{so} + R_{v_1} x_{v_1 j'}^{so} \leq R_{v_1} - \sum_{z=1}^t D_{jzs} \quad \forall j, j', v_1, s \quad (15)$$

$$\sum_z D_{jzs} \left(x_{v_1 0j}^{so} + \sum_{j'} x_{v_1 j'}^{so} \right) \leq u_{jv_1}^{so} \leq R_{v_1} \quad \forall j, v_1, s \quad (16)$$

$$x_{jkv_2}^s, x_{jz}^s, x_{v_1 0j}^{so}, x_{v_1 j'}^{so} = 0 \text{ or } 1 \quad (17)$$

$$Q_{zjkv_2}^s, Q_{zov_1}^s, u_{jv_1}^{so}, D_{jzs}, I_{jz}^s \geq 0 \quad (18)$$

توضیحات مربوط به توابع هدف و محدودیت‌های (۴) تا (۱۸) به شرح زیر است.

- (۱): تابع هدف مربوط به کاهش هزینه‌ها است که شامل هزینه نگهداری، هزینه ثابت حمل‌ونقل و هزینه متغیر حمل‌ونقل می‌باشد.
- (۲): تابع هدف مربوط به حداقل کردن بیشینه ریسک تصادف می‌باشد. در این هدف ریسک حمل‌ونقل تصادفی بوده و با توجه به نواحی جمعیتی در نظر گرفته شده است، همپنین تلفات حادثه براساس اندازه وسیله نقلیه و محموله آن با ضریب شدت حادثه مشخص (که برای هر مسیر تخمین زده شده است)، محاسبه می‌شود، ضمناً برای هر وسیله نقلیه با توجه به میزان پر یا خالی بودن آن در هنگام تصادف جریمه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

ریسک حمل‌ونقل در این مطالعه به صورت تصادفی و وابسته به سناریو مدل‌سازی شده است. به این صورت که برای هر سناریوی محتمل (با احتمال وقوع π_s)، مقادیر متفاوتی از ریسک مسیرها

خطرناک در مسیرها به صورت سه سطح (کم‌خطر، متوسط و پرخطر) مدل‌سازی شد. این سطوح با توجه به تراکم جمعیت، شرایط مسیر و احتمال وقوع حادثه تعیین گردیدند.

ترکیب این دو دسته، مجموعه‌ای از سناریوها را ایجاد می‌کند که به مدل اجازه می‌دهد تصمیمات بهینه و مقاوم را در شرایط مختلف عملیاتی ارائه کند.

با توجه به محدودیت داده‌های آماری دقیق درخصوص تقاضا و شدت ریسک در مسیرهای حمل‌ونقل، فرض شد که این پارامترها از توزیع یکنواخت تبعیت می‌کنند. این فرض امکان در نظر گرفتن تمامی مقادیر ممکن در یک بازه مشخص با احتمال برابر را فراهم می‌سازد و رویکردی واقع‌گرایانه برای شرایطی است که اطلاعات کافی برای برآورد توزیع‌های پیچیده‌تر (مانند نرمال یا پواسون) وجود ندارد. علاوه بر این، با توجه به عدم وجود داده‌های آماری دقیق درخصوص احتمال وقوع سناریوها، فرض شد که تمامی سناریوها دارای احتمال وقوع برابر هستند. به عنوان مثال، در حالتی که ۶ سناریو تعریف شده باشد، احتمال وقوع هر سناریو برابر با $1/6$ در نظر گرفته می‌شود. این فرض باعث می‌شود همه شرایط به طور عادلانه در مدل لحاظ شده و تصمیمات حاصل مقاومت کافی در برابر طیف متنوعی از شرایط داشته باشند.

۳-۶. مدل‌سازی

مدل ریاضی چندهدفه زیر به منظور مسیریابی مواد خطرناک تحت سناریوی عدم قطعیت توسعه داده شده است.

$$\begin{aligned} Z_1 &= \text{Min} \sum_{s=1}^h \pi_s \left(\sum_{j=1}^m \sum_{v_1=1}^n f_{c_{v_1}} (x_{v_1 0j}^{so}) \right. \\ &+ \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \sum_{v_2=1}^n f_{c_{v_2}} x_{jkv_2}^s \\ &+ \sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^n v_{c_{v_1}} \text{dis}_{j'j} (x_{v_1 j'}^{so} + x_{v_1 0j}^{so}) \\ &+ \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \sum_{v_2=1}^n v_{c_{v_2}} \text{dis}_{jk} x_{jkv_2}^s \\ &\left. + \sum_{j=1}^m \sum_{z=1}^t H_z I_{jz}^s x_{jz}^s \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$Z_2 = \text{Min} \{ \text{MAX} \sum_{z=1}^t \sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^n \gamma_{oj} (C_{zv} Q_{zov_1}^s + f_v) \text{pr}_{oj} \} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= \text{Min} \sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^h \pi_s \text{GHG}_{v_1} x_{v_1 0j}^{so} \\ &+ \sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^h \pi_s \text{GHG}_{v_1} x_{v_1 j'}^{so} \\ &+ \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \sum_{v_2=1}^n \sum_{s=1}^h \pi_s \text{GHG}_{v_2} x_{jkv_2}^s \end{aligned} \quad (3)$$

(۶): بیان می‌کند که تنها در صورتی محصولی منتقل می‌شود که وسیله نقلیه برای انتقال آن قابل استفاده باشد.

(۷): هر خرده‌فروش j توسط وسیله نقلیه v_1 از توزیع‌کننده o ملاقات می‌شود و یا از خرده‌فروش j که این مقدار حداکثر می‌تواند ۱ را دریافت کند.

(۸): پیوستگی مسیر را نشان می‌دهد به این معنی که اگر وسیله نقلیه یک خرده‌فروش را ملاقات کرد از همان خرده‌فروش هم خارج می‌شود. (۹): مقدار محصولی که از تأمین‌کننده به خرده‌فروش منتقل می‌شود باید از حداکثر ظرفیت نگهداری کمتر باشد.

در مدل ارائه‌شده، فرض بر آن است که میزان تقاضای مشتریان در هر سناریو به‌گونه‌ای تولید شده است که از حداکثر ظرفیت نگهداری خرده‌فروشان تجاوز نمی‌کند. به عبارتی، برای اطمینان از تأمین کامل تقاضا بدون ایجاد کمبود، در تولید سناریوها و داده‌ها، این سازگاری رعایت شده است.

(۱۰): مقدار کالای حمل شده از محصول z از خرده‌فروش j به مشتری k بزرگتر از تقاضای آن باشد.

لازم به ذکر است که با وجود محدودیت (۱۰) که مانع از ایجاد کمبود در تأمین تقاضا می‌شود، نگهداری موجودی در سطح خرده‌فروش (بیمارستان) به این منظور در نظر گرفته شده است که در برابر نوسانات تقاضا در طول دوره بتوان واکنش سریع داشت و تأخیر یا کمبودی برای بیماران رخ ندهد. از آنجا که موجودی به دوره بعد منتقل نمی‌شود، فرض می‌شود محصولات باقی‌مانده در پایان هر دوره یا مصرف شده و یا براساس پروتکل‌های دفع پسماندهای خطرناک بی‌خطر سازی و معدوم می‌گردند. بنابراین هزینه انهدام یا بازگشت به‌صورت جداگانه در مدل لحاظ نشده و جزئی از الزامات عملیاتی مراکز درمانی محسوب می‌شود.

(۱۱): حداکثر ظرفیت نگهداری به‌ازای هر j .

(۱۲): مقدار محصولی که از خرده‌فروش j به مشتری K می‌رود کوچکتر مساوی مقدار محصولی است که از توزیع‌کننده o به خرده‌فروش j می‌رود.

(۱۳): این محدودیت نشان می‌دهد که در هر سناریو تقاضای خرده‌فروش براساس تقاضای مشتری مشخص می‌شود (چون تقاضای هر خرده‌فروش از ابتدا مشخص نیست و با توجه به میزان تقاضای مشتری مشخص می‌شود).

(۱۴): سطح موجودی جدید خرده‌فروش j برابر تفاضل میزان محصولی است که از تأمین‌کننده به خرده‌فروش منتقل می‌شود و تقاضای خرده‌فروش در سناریوی s

در مدل تک‌دوره‌ای ارائه شده، موجودی پایان دوره فقط جهت اطمینان از پاسخ‌گویی به تقاضای غیرقطعی در سناریوهای مختلف لحاظ شده است. فرض شده است که این موجودی مازاد در پایان دوره ذخیره می‌شود و مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، لذا هزینه‌ای برای انهدام یا عودت آن در مدل منظور نشده است. توسعه این بخش می‌تواند در آینده با در نظر گرفتن هزینه‌های انهدام، ذخیره‌سازی اضافی یا

(پارامتر Pr_{oj}) و شدت حوادث (γ_{oj}) در نظر گرفته شده است. این پارامترها براساس جمعیت مسیر، نوع محصول، نوع وسیله نقلیه و حجم بار حمل شده تنظیم می‌شوند. در نتیجه، مدل قادر است ریسک حمل‌ونقل را تحت شرایط عدم قطعیت به‌صورت واقع‌گرایانه ارزیابی و مدیریت کند.

در این مطالعه، منظور از تلفات حادثه، ترکیبی از آثار منفی ناشی از وقوع تصادف در حمل مواد خطرناک است که شامل: تلفات انسانی (جان انسان‌ها در نواحی پرجمعیت)، خسارات زیست‌محیطی (آلودگی ناشی از نشت مواد شیمیایی یا پسماندهای بیمارستانی)، و خسارات مالی (خرابی تجهیزات، وسایل نقلیه، یا هزینه‌های جبران و امداد) می‌باشد. این تلفات از طریق ضریب شدت حادثه (γ_{oj}) مدل‌سازی شده‌اند که برای هر مسیر و نوع حمل، برآورد تقریبی از میزان خسارت محتمل را ارائه می‌دهد. لذا تابع هدف دوم، ترکیبی از این آسیب‌ها را در قالب یک شاخص عددی تجمیع و حداقل‌سازی می‌کند.

لازم به ذکر است که دو پارامتر شدت حادثه و ریسک تصادف ناشی از حمل‌ونقل به‌صورت سناریو محور در نظر گرفته شده‌اند؛ بدین‌معنا که برای هر سناریو مقادیر متفاوتی از این پارامترها تعریف می‌شود. همچنین، در تابع هدف دوم (رابطه ۲)، ریسک حمل‌ونقل بر مبنای امیدریاضی محاسبه می‌شود:

$$R = \sum_{s \in S} P_s \cdot R_s$$

که در آن P_s احتمال وقوع سناریوی s و R_s سطح ریسک متناظر با همان سناریو است. بنابراین مقدار هدف دوم بیانگر ریسک مورد انتظار شبکه تحت شرایط عدم قطعیت است.

تابع هدف دوم (ریسک حمل‌ونقل) در فرم اولیه به‌صورت غیرخطی تعریف شده بود. برای خطی‌سازی آن، از تکنیک معرفی متغیر کمکی و نامساوی‌های معادل استفاده گردید تا وابستگی‌های غیرخطی به فرم خطی تبدیل شوند. این روش یک رویکرد استاندارد در مدل‌های ریاضی است [۲۳] و امکان حل مدل با الگوریتم‌های خطی/عدد صحیح را فراهم می‌کند.

(۳): تابع هدف حداقل کردن انتشار گاز است.

(۴): محدودیت مربوط به اینکه مجموع کالای حمل شده از مسیر z توسط وسیله نقلیه V نباید از ظرفیت وسیله نقلیه بیشتر باشد.

در مدل پیشنهادی، به منظور ساده‌سازی و کاهش پیچیدگی محاسبات، ظرفیت وسایل نقلیه برحسب تعداد واحد محصولات در نظر گرفته شده است و تمایزی بین اقلام مختلف از نظر حجم یا وزن لحاظ نشده است. این فرض باعث می‌شود کلیه اقلام به‌صورت یکنواخت در محاسبات مدل لحاظ شوند.

(۵): محدودیت مربوط به اینکه اگر کالایی بخواهد از تأمین‌کننده به خرده‌فروش تخصیص پیدا کند خرده‌فروش باید در مسیریابی شرکت داشته باشد، اگر شرکت داشته باشد به این صورت است که یا گره اول یا گره‌های بعد را ملاقات خواهد کرد که فقط یکی از این حالات رخ می‌دهد. اگر وسیله نقلیه در مسیریابی قرار داشته باشد Q مقدار می‌گیرد و اگر نبود Q برای خرده‌فروش و تأمین‌کننده صفر می‌شود.

داده شده است.

بازگردانی انجام شود.

(۱۵) و (۱۶): محدودیت‌های حذف زیر تور [۱۳].

(۱۷) و (۱۸): متغیرهای تصمیم.

برای خطی‌سازی تابع هدف دوم را به صورت زیر می‌نویسیم:

Min g

$$g \geq \sum_{z=1}^t \sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^n \gamma_{oj} (C_{zv} Q_{zov}^s + f_v) pr_{oj}$$

۴. آزمایشات محاسباتی

جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، یک مسأله کوچک مسیریابی موجودی که شامل توزیع‌کننده (داروخانه)، خرده‌فروش (بیمارستان) و مشتری (بیمار) می‌باشد، ارائه شده است. در این مثال، جریان کالا تنها به صورت مستقیم تعریف گردیده است؛ به طوری که مسیریابی از توزیع‌کننده به خرده‌فروش و سپس از خرده‌فروش به مشتری به صورت مستقیم در نظر گرفته شده و هیچ گونه جریان بازگشتی یا چند مسیره لحاظ نمی‌شود. این فرض به ساده‌سازی مدل و تمرکز بر ارزیابی دقیق عملکرد آن کمک می‌کند. در این مثال تقاضا غیرقطعی بوده و تحت سناریو بررسی می‌شود. برای تولید داده‌های مورد نیاز از توزیع یکنواخت متناسب با هر پارامتر استفاده شده و برای حل مدل از محیط نرم افزار GAMS استفاده شده است. گره‌ها و پارامترهای موجود در مسأله به ترتیب در جداول (۲) و (۳) لیست شده است.

جدول (۲). گره‌های مسأله

شماره گره	اندیس	شماره گره	اندیس
1,2,3	k	1,2	j
1,2,3,4	v	1,2	z
3,4	v_2	1,2	v_1
		1,2	s

جدول (۴) مقادیر تابع هدف را که با استفاده از روش E- محدودیت (سالور بارون) به دست آمده است، نشان می‌دهد. در این جدول تابع هدف اول به صورت نوسانی صعودی و توابع هدف دوم و سوم به صورت نوسانی و نزولی می‌باشد، یعنی اگر بخواهیم بیشینه ریسک و میزان آلاینده‌گی را کاهش دهیم هزینه‌ها افزایش می‌یابند. در ادامه جبهه پارتویی توابع هدف مسأله به صورت دو به دو نشان

جدول (۳). مقادیر و پارامترهای مدل

$(fc_{v_1=1} = 700, fc_{v_1=2} = 750)$	fc_{v_1}
$(fc_{v_2=1} = 400, fc_{v_2=2} = 500)$	fc_{v_2}
Uniform (0.05,0.06)	vc_{v_1}
Uniform (0.08,0.1)	vc_{v_2}
Uniform (11,14)	H_z
0	I_{jz0}
Uniform (10,20)	D_{jkzs}
Uniform (0,0.9)	γ_{oj}
Uniform (0.2,0.8)	pr_{oj}
Uniform (300,350)	R_{v1}
Uniform (1000,1500)	C_{zv}
Uniform (2,5)	GHG_v
200	GHL
Uniform (12,45)	dis_{jk}
Uniform (12,45)	$dis_{j,j}$
Uniform (180,250)	M_{jz}
Uniform (499,500)	N_j
Uniform (50000,100000)	f_v
10000	M

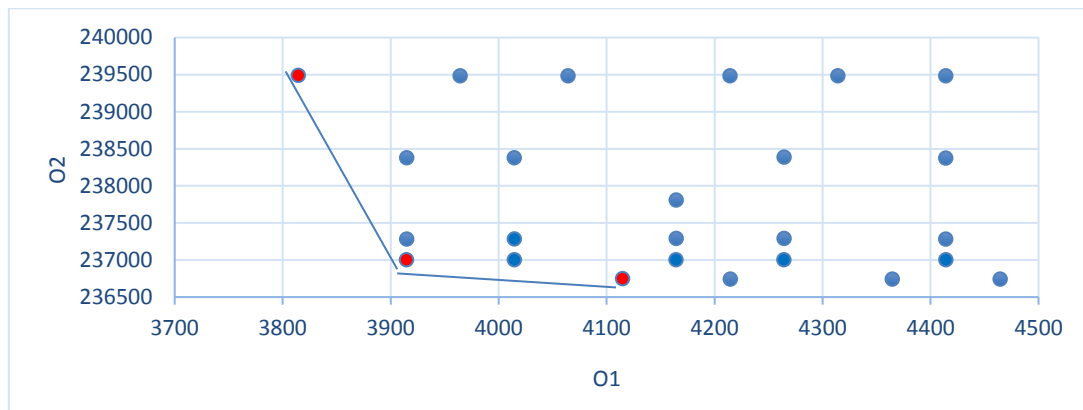
شکل (۱) نشان‌دهنده مجموعه جواب‌های بهینه در فضای جواب توابع هدف اول و دوم هستند و از بین این نقاط، با توجه به اینکه هر دو تابع هدف اول و دوم مینیم‌سازی هستند، نقاط آبی، نقاط بهینه کارای ضعیف بوده و نقاط قرمز رنگ نقاط بهینه کارای قوی یا همان جبهه پارتویی را نشان می‌دهد. هم‌چنین همان‌طور که مشاهده می‌شود در نقاط موجود در جبهه پارتویی با افزایش ریسک تصادف (O_2) میزان هزینه‌های شبکه یعنی مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری موجودی (O_1) کاهش یافته و برعکس، که این موضوع تضاد این دو تابع هدف اول و دوم را نشان می‌دهد.

در شکل (۲) با افزایش میزان ریسک تصادف (O_2) میزان آلاینده‌گی شبکه (O_3) نیز کاهش یافته و برعکس که این موضوع هم نشان‌دهنده تضاد این دو تابع هدف خواهد بود.

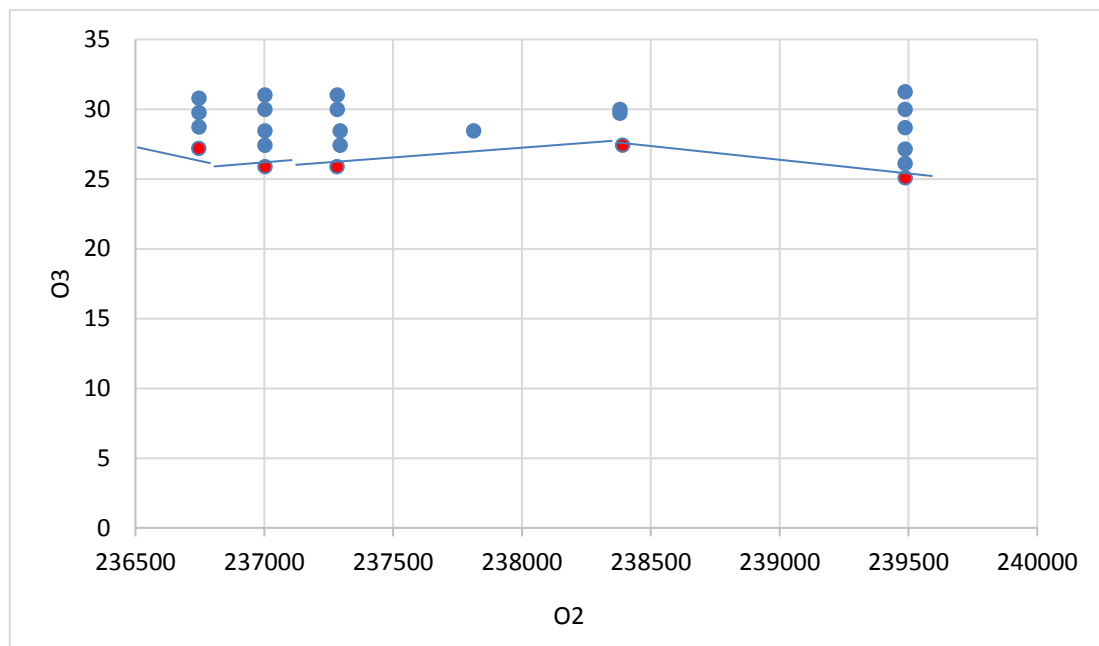
در شکل (۳) نیز، این نقاط کاهش در میزان انتشار شبکه با افزایش میزان هزینه‌ها همراه خواهد بود و برعکس که به معنای تضاد این دو تابع هدف است.

جدول (۴). مقادیر توابع هدف

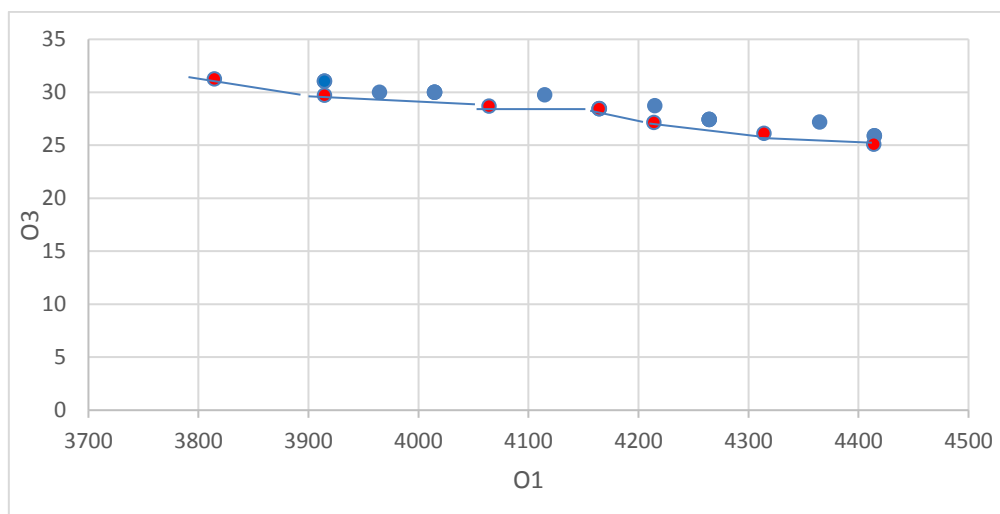
هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم
۱	۳۸۱۴.۷۳	۲۳۹۴۸۷.۴۸	۳۱.۲۶	۲۳۷۲۸۳.۹	۳۱.۰۳
۳	۳۹۱۴.۸۱	۲۳۷۲۸۳.۹	۳۱.۰۳	۲۳۷۲۸۳.۹	۲۹.۷۱
۵	۳۹۶۴.۴۸	۲۳۹۴۸۷.۴۸	۳۰	۲۳۹۴۸۷.۴۸	۳۰
۷	۴۰۱۴.۶۴	۲۳۷۲۸۳.۶۲	۳۰	۲۳۷۲۸۳.۶۲	۳۰
۹	۴۰۱۴۹۴۰	۲۳۶۷۴۶.۴۱	۳۰.۸	۲۳۶۷۴۶.۴۱	۲۸.۶۸
۱۱	۴۱۱۴.۷۹	۲۳۶۷۴۶.۴۱	۲۹.۷۷	۲۳۶۷۴۶.۴۱	۲۸.۴۵
۱۳	۴۱۶۴.۴۸	۲۳۷۲۹۴.۶۳	۲۸.۴۵	۲۳۷۲۹۴.۶۳	۲۸.۴۵
۱۵	۴۲۱۴.۲۳	۲۳۹۴۸۷.۴۸	۲۷.۱۴	۲۳۹۴۸۷.۴۸	۲۸.۷۴
۱۷	۴۲۶۴.۳۹	۲۳۷۰۰۲.۸۵	۲۷.۴۲	۲۳۷۰۰۲.۸۵	۲۷.۴۲
۱۹	۴۲۶۴.۳۹	۲۳۸۳۹۱.۰۵	۲۷.۴۲	۲۳۸۳۹۱.۰۵	۲۶.۱۱
۲۱	۴۳۶۴.۵۸	۲۳۶۷۴۶.۴۱	۲۷.۱۹	۲۳۶۷۴۶.۴۱	۲۵.۰۸
۲۳	۴۴۱۴.۲۹	۲۳۷۰۰۲.۸۵	۲۵.۸۸	۲۳۷۰۰۲.۸۵	۲۵.۸۸
۲۵	۴۴۱۴.۲۹	۲۳۸۳۷۸.۹۵	۲۵.۸۸	۲۳۸۳۷۸.۹۵	۲۶.۱۶



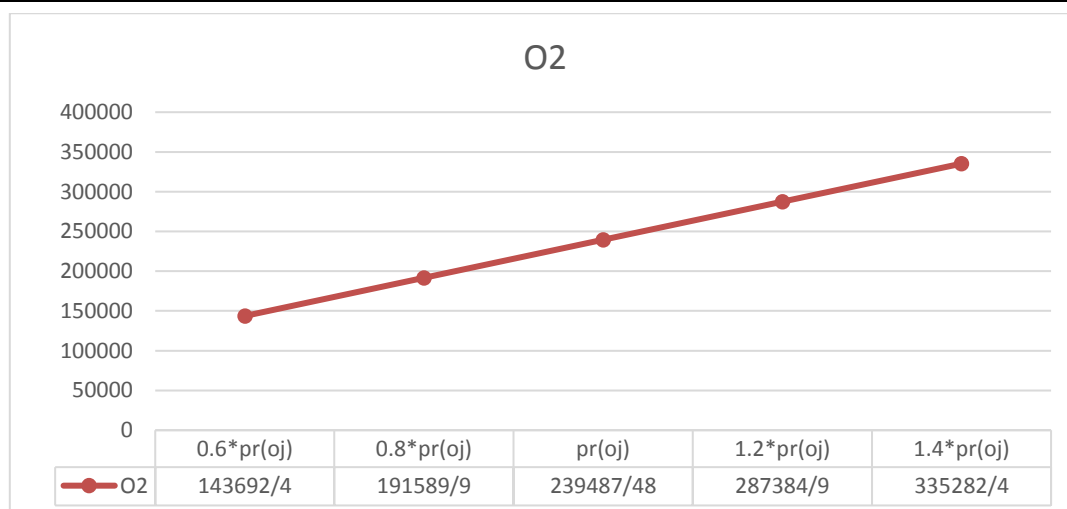
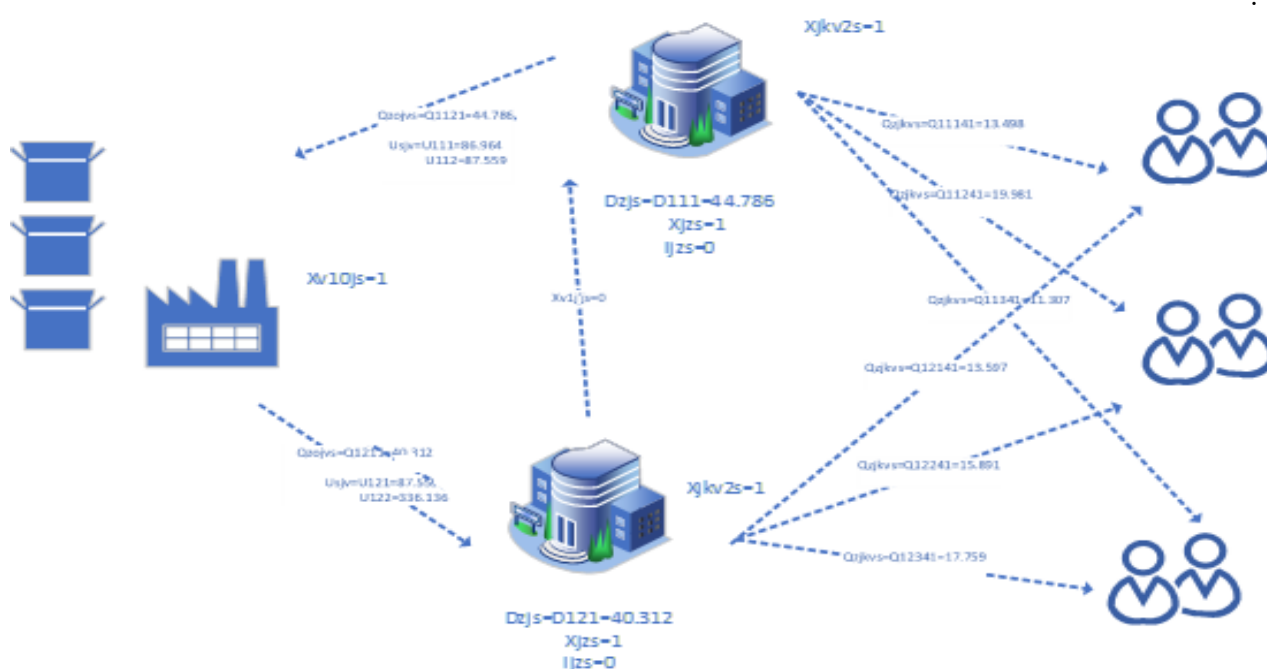
شکل (۱). نمایش مجموعه نقاط کارا در فضای جواب توابع هدف اول و دوم



شکل (۲). نمایش مجموعه نقاط کارا در فضای جواب توابع هدف دوم و سوم



شکل (۳). نمایش مجموعه نقاط کارا در فضای جواب توابع هدف اول و سوم

شکل (۴). تأثیر تغییر (pr_{oj}) بر (O_2) 

شکل (۵). نمای شماتیک محصول اول در سناریو اول

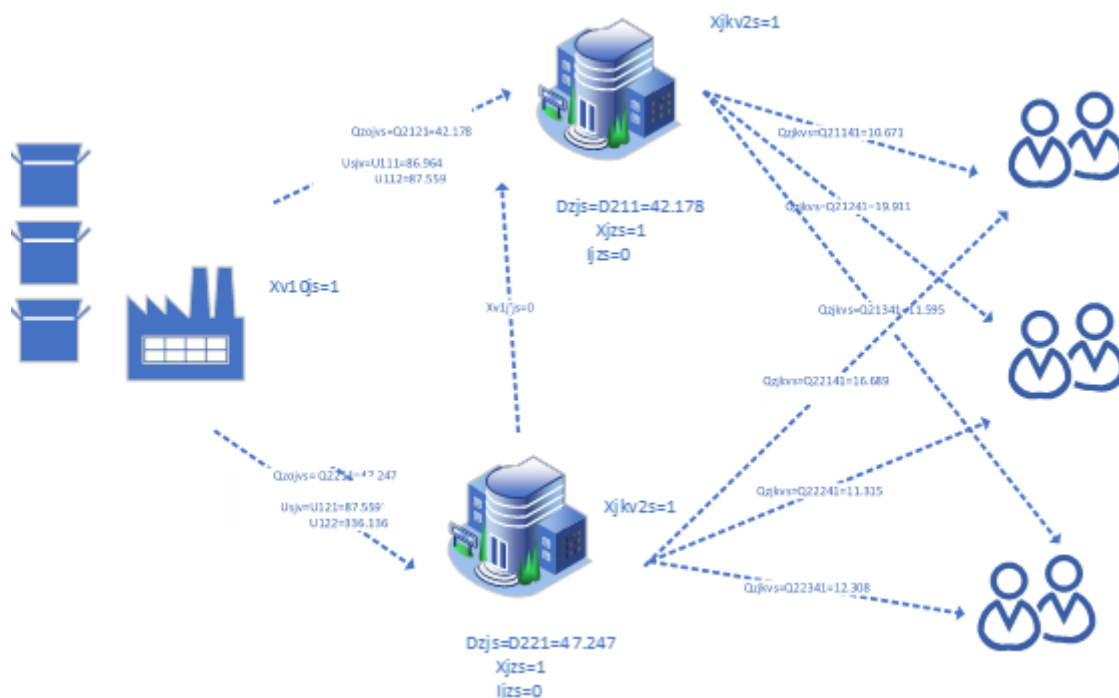
۴-۱. تحلیل حساسیت

بررسی پارامتر ریسک تصادف ناشی از حمل و نقل در کمان $(0-j)$ نسبت به توابع هدف دوم یا مقدار بیشینه ریسک در شکل (۴) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۴)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان ریسک تصادف ناشی از حمل و نقل، میزان بیشینه ریسک تصادف نیز افزایش یافته و باهم رابطه مستقیم دارند.

شکل‌های (۵) و (۶)، به ترتیب زیرمجموعه زنجیره تأمین مثال ارائه شده که شامل مقدار محصول حمل شده از تأمین کننده به خرده فروش، مقدار محصول حمل شده از خرده فروش به مشتری، مقدار تقاضای خرده فروش، متغیر کمکی زیرتور و متغیرهای باینری می‌باشند، را نشان می‌دهد.

شکل (۵) نتایج مربوط به حمل داروهای پرخطر (مانند داروهای شیمی درمانی) را نمایش می‌دهد، درحالی که شکل (۶) به پسماندهای بیمارستانی (ازجمله سرنگ‌ها و سوزن‌های آلوده و کیسه‌های خون مصرف شده) اختصاص دارد. این دو گروه محصول به دلیل تفاوت در وزن، حجم و سطح ریسک زیست محیطی، می‌توانند بر انتخاب مسیر و سطح ریسک کلی شبکه تأثیرگذار باشند. به همین دلیل، نتایج برای هر دو دسته به طور جداگانه ارائه شده است تا اثر نوع محصول بر تصمیمات مسیریابی و موجودی به وضوح مشاهده شود. توجه شود که در شکل‌های (۵) و (۶) تنها جریان مستقیم کالا از توزیع کننده به خرده فروش و سپس به مشتری در نظر گرفته شده است و هیچ جریان معکوس یا بازگشتی در مدل وجود ندارد.



شکل (۶). نمای شماتیک محصول دوم در سناریو اول

انتخاب الگوریتم ترکیبی NSGA-II و جستجوی محلی براساس نتایج مطالعات پیشین و ویژگی‌های این مسأله صورت گرفته است. NSGA-II به دلیل توانایی در ایجاد تنوع بالا در جواب‌ها و پوشش مناسب جبهه پارتو، به عنوان یکی از معتبرترین الگوریتم‌های چند هدفه شناخته می‌شود. از سوی دیگر، اضافه کردن جستجوی محلی موجب بهبود کیفیت جواب‌ها و افزایش سرعت همگرایی می‌گردد. در مقایسه با الگوریتم‌هایی نظیر MOPSO یا MOVNS، NSGA-II در مسائل مشابه مسیریابی موجودی کارایی بیشتری از خود نشان داده است. به همین دلیل، در این پژوهش رویکرد ترکیبی NSGA-II و جستجوی محلی مورد استفاده قرار گرفته است، هرچند استفاده از سایر الگوریتم‌های چند هدفه می‌تواند موضوع تحقیقات آتی باشد. فلوچارت مراحل کلی الگوریتم Hybrid NSGA-II در شکل (۷) نشان داده شده است.

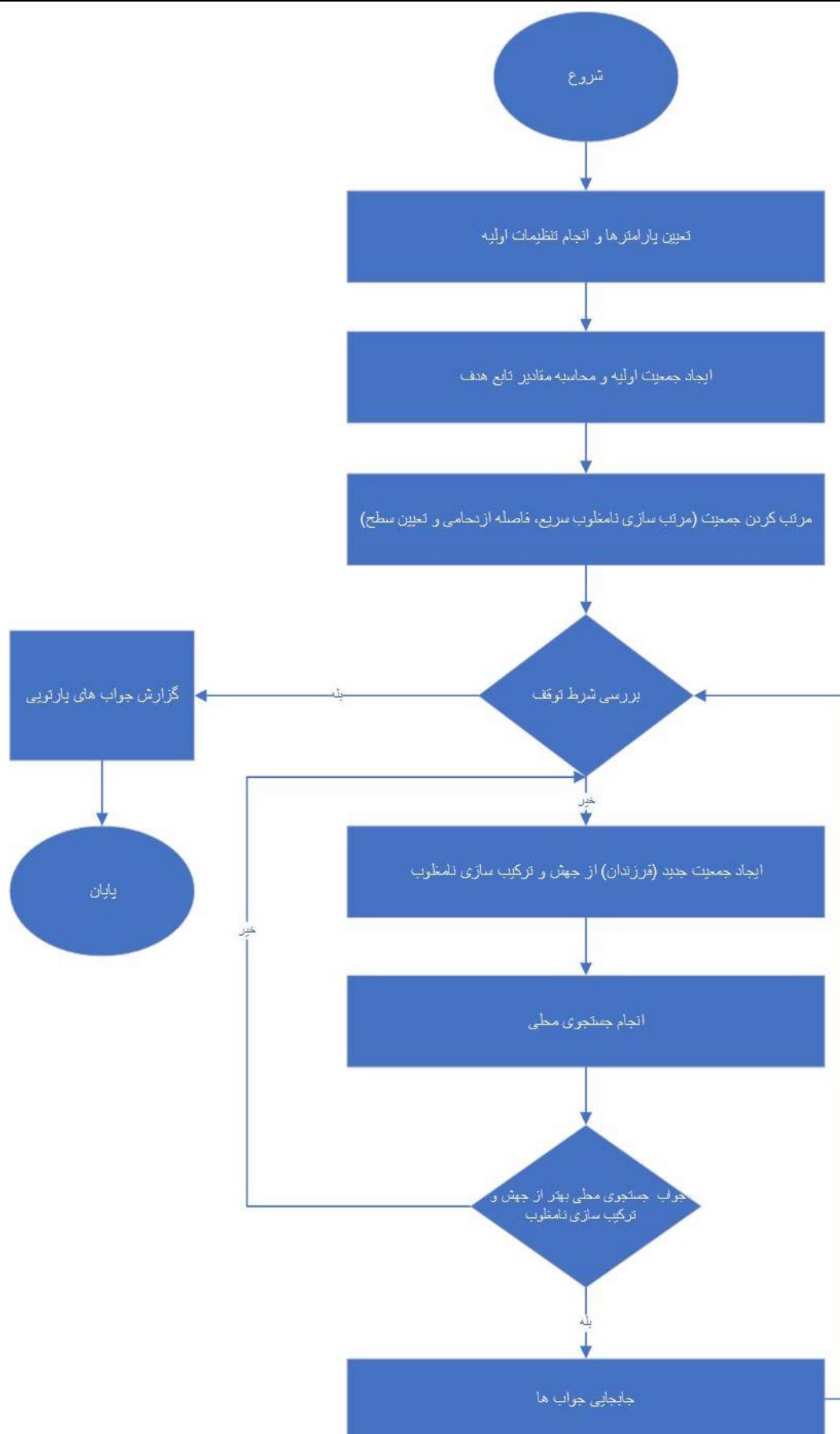
در نحوه انتخاب پارامترهای الگوریتم پیشنهادی توجه به یک نکته مهم حائز اهمیت است که، پارامترهای الگوریتم پیشنهادی (اندازه جمعیت، نرخ جهش، نرخ تقاطع و غیره) در این مطالعه با استفاده از رویکرد سعی و خطا تعیین گردیدند. هرچند این روش در بسیاری از پژوهش‌های مشابه به عنوان یک راهکار عملی برای تنظیم پارامترها در مسائل بزرگ مقیاس به کار رفته است، اما باید توجه داشت که این رویکرد فاقد پشتوانه آماری قوی است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی برای تنظیم دقیق‌تر پارامترهای الگوریتم از روش‌های علمی‌تر مانند طراحی آزمایش (DOE)، روش تاگوچی یا سایر تکنیک‌های مبتنی بر آنالیز حساسیت استفاده شود.

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب وضعیت مسیریابی و تخصیص منابع برای محصول اول و دوم را در سناریو شماره (۱) نمایش می‌دهند. در این شکل‌ها، گره‌های مربوط به تأمین‌کننده، خرده‌فروش و مشتری، و مقدار محصول حمل‌شده میان آن‌ها (براساس کروموزوم الگوریتم ژنتیک) نمایش داده شده‌اند.

هدف اصلی از انجام تحلیل حساسیت در این پژوهش، بررسی پایداری و رفتار مدل تحت تغییر پارامترهای کلیدی مانند شدت حادثه و ریسک حمل‌ونقل است. نتایج نشان داد که تغییر این پارامترها منجر به تغییر منطقی در توابع هدف (افزایش شدت حادثه $\rightarrow$ افزایش بیشینه ریسک) شده و با شرایط واقعی حمل‌ونقل مواد خطرناک همخوانی دارد. علاوه بر این، الگوی کلی جبهه پارتو تحت تغییرات پایدار باقی ماند. این امر نشان‌دهنده استحکام و اعتبار مدل پیشنهادی است و بیان می‌کند که نتایج به دست آمده صرفاً وابسته به یک مجموعه داده خاص نبوده، بلکه در شرایط مختلف نیز معتبر هستند.

۵. الگوریتم حل مسأله

از آنجاکه مدل مسأله چند هدفه و غیرخطی می‌باشد و زمان حل برای مسأله در ابعاد بزرگتر در نرم‌افزار گمز طولانی می‌باشد، روش‌های دقیق در شرایط فوق قادر به پیدا کردن جواب بهینه در زمان قابل قبولی نیستند، به همین دلیل به ارائه الگوریتم‌های فراابتکاری برای رسیدن به نتایج مطلوب‌تر می‌پردازیم. الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق، الگوریتم هیبرید ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (Hybrid NSGA-II) است که یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه بوده و سبب پیدا کردن بهترین جواب ممکن در زمان قابل قبول می‌شود.



شکل (۷). فلوچارت الگوریتم حل پیشنهادی

۵-۱. ساختار کروموزوم

می‌گردد. برای سایر وسیله نقلیه نیز بدین صورت است. در نتیجه در مراحل مختلف همه خرده‌فروش‌ها ملاقات شده‌اند. بخش دوم مربوط به مقدار محصول حمل‌شده از توزیع‌کننده به خرده‌فروش می‌باشد. این بخش به‌ازای هر وسیله نقلیه و هر سناریو یک ماتریس $Z \times J$ تشکیل می‌گردد که در آن J نشان‌دهنده خرده‌فروش‌ها و Z تنوع تعداد محصولاتی است که در نظر گرفته شده است. براساس ساختار کروموزوم در هر یک از سناریوهای ۱ و ۲ نشان داده می‌شود که چه مقدار محصول به هر خرده‌فروش و توسط چه وسیله از توزیع‌کننده ارسال می‌گردد. این بخش کروموزوم معادل متغیر Q_{zov}^S است. به این ترتیب اگر محصولی به خرده‌فروش منتقل شود Q_{zov}^S مقدار می‌گیرد، زمانی که این متغیر دارای مقدار باشد متغیر باینری مرتبط با آن (X_{v10j}^S) مقدار یک می‌گیرد. به همین ترتیب خرده‌فروش‌هایی که در مسیریابی قرار می‌گیرند مشخص می‌شوند. این ساختار کروموزوم محدودیت‌های ۴ و ۵ و ۷ و ۹ ارضا می‌شوند. جدول (۵)، نمونه ساختار این ماتریس‌ها در دو سناریو با ۱۰ خرده‌فروش و ۳ محصول توسط ۲ وسیله نقلیه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به ازای هر یک از مجموعه اندیس‌ها در متغیرهای موجود، مجموعه‌ای از ماتریس‌ها ایجاد می‌شود. همان‌طور که در جدول (۵) مشخص است وسیله نقلیه اول در سناریو اول فقط به خرده‌فروش ۹ محصول منتقل می‌کند. در واقع فقط این خرده‌فروش در مسیریابی وسیله نقلیه قرار گرفته‌اند.

جدول (۵). ساختار کروموزوم Q_{zov}^S
(وسیله نقلیه اول در سناریو اول)

J/Z	۱	۲	۳
۱	.	.	.
۲	.	.	.
۳	.	.	.
۴	.	.	.
۵	.	.	.
۶	.	.	.
۷	.	.	.
۸	.	.	.
۹	۲۲۹	۲۲۴	۲۲۵
۱۰	.	.	.

کروموزوم‌های جمعیت باید به‌طور مؤثر اطلاعات اساسی یک راه‌حل را منعکس کنند، یعنی ترتیب بازدید خرده‌فروش‌ها در هر تور، توزیع‌کننده یا خرده‌فروش ساختگی که تور از آنجا آغاز می‌شود و تعیین تکلیف وسایل نقلیه در هر تور. بر همین اساس ساختار کروموزوم در این الگوریتم سه بخشی است. در بخش اول مسیریابی وسیله نقلیه از توزیع‌کننده به خرده‌فروش، بخش دوم میزان محصول حمل‌شده از توزیع‌کننده به خرده‌فروش و بخش سوم از ساختار مرتبط به انتقال محصول از خرده‌فروش به مشتری می‌باشد.

بخش اول که مرتبط به مسیریابی می‌باشد به این صورت است که در ساختار کروموزومی اولین ژن در کروموزوم نشان‌دهنده انباری است که وسیله نقلیه در آن سفر خود را آغاز می‌کند. اگر وسیله نقلیه از توزیع‌کننده مرکزی شروع به کار کند، این سلول عدد ۰ را نشان می‌دهد در غیر این‌صورت، این سلول توسط یکی از خرده‌فروش‌ها به‌طور تصادفی پر می‌شود. بدین ترتیب با توجه به U_{jv1}^S متغیر کمکی حذف زیرتور و مقدار تقاضای مشخص شده، محدودیت‌های شماره ۱۵ و ۱۶ ارضا می‌شوند. این بخش از کروموزوم یک ماتریس است که به تعداد سناریوها دارای سطر و به تعداد $m + n - 1$ ستون است. برای به‌دست آوردن نتایج حاصل از ساختار الگوریتم در مسیریابی به این طریق عمل می‌کنیم که اگر تعداد وسایل نقلیه $n = 9$ و تعداد خرده‌فروش‌ها $m = 10$ باشد تعداد کروموزوم‌های حاصله طبق فرمول $m + n - 1$ برابر با $18 = 10 + 9 - 1$ خواهد بود. تعداد صفرها برابر ۸ مورد می‌باشد که نشان‌دهنده بازگشت وسیله نقلیه به توزیع‌کننده و تفکیک‌کننده تورها می‌باشد. تعدد اعداد برابر ۱۰ مورد بوده و نشان‌دهنده شماره هر یک از خرده‌فروش‌ها است. ساختار کروموزومی مسیریابی وسیله نقلیه از توزیع‌کننده به خرده‌فروش در ۲ سناریو در مسأله به‌صورت نمونه نشان داده شده است.

همان‌طور که از مثال بالا مشخص است؛ در سناریوی شماره ۱، وسیله نقلیه اول تنها خرده‌فروش ۹ را بازدید می‌کند، وسیله نقلیه دوم تنها خرده‌فروش ۱ را بازدید کرده و وسیله نقلیه سوم و چهارم انتخاب نشده‌اند و از انبار توزیع‌کننده خارج نمی‌شوند. وسیله نقلیه پنجم پس از خروج از توزیع‌کننده ابتدا خرده‌فروش ۳، سپس به ترتیب خرده‌فروش‌های ۱۰، ۷، ۲، ۶ را بازدید می‌کند و به محل مبدأ باز

9	0	1	0	0	0	3	10	7	2	6	0	0	8	5	0	0	4
---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

مسیریابی در سناریو ۱

0	6	4	0	8	0	0	7	10	0	1	0	2	3	0	0	9	5
---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---

مسیریابی در سناریو ۲

شماره خرده‌فروش

شکل (۸). ساختار کروموزوم برای سناریوهای ۱ و ۲

۵-۲. عملگرهای الگوریتم

عملگرهای الگوریتم به‌طور خلاصه به‌همراه توضیحات آن‌ها به شرح زیر است.

انتخاب^۱: در هر نسل تعدادی از عناصر جمعیت این فرصت را پیدا می‌کنند که تولیدمثل کنند. به این عناصر که از میان جمعیت انتخاب می‌شوند، والدین می‌گویند. عملگر انتخاب سبب سوق‌دادن جستجو به بخش‌هایی از فضا که امکان یافتن جواب‌های باکیفیت بالاتر وجود دارد و نسل جدیدی از راه‌حل‌ها را با انتخاب والدینی که بالاترین برازش را دارند تولید می‌کند.

تقاطع^۲: یک عملیات حیاتی در یک الگوریتم ژنتیک است. این عملگر دو کروموزم به‌نام "والدین" را برای تولید فرزندان ترکیب می‌کند. برای چندین وسیله نقلیه، یکی از والدین دریافت‌کننده و دیگری اهداکننده در نظر گرفته می‌شود. تقاطع برای تولید اولین فرزند استفاده می‌شود. متعاقباً برای ایجاد فرزند دوم نقش‌ها برعکس می‌شوند.

جهش^۳: برای به‌دست آوردن جمعیتی با ویژگی‌های جدید و در نتیجه گسترش منطقه جستجو، از دو عملیات تصادفی در مرحله جهش استفاده می‌شود؛ تبادل تصادفی: این عملگر دو مشتری را به‌طور تصادفی از دو تور مختلف انتخاب می‌کند و موقعیت‌های آن‌ها را ردوبدل می‌کند. به این صورت که مشتری از تور اول انتخاب می‌شود و در موقعیت دوم که به‌طور تصادفی انتخاب شده به تور دوم وارد می‌شود.

فرآیند تعمیر: پس از اعمال عملگرها ممکن است جواب‌های تولیدشده غیرموجه شود. برای این منظور فرآیند تعمیر جواب‌ها فعال می‌شود. محدودیت‌های که باعث غیرموجه بودن جواب می‌شود مانند حداکثر ظرفیت نگهداری موجودی توسط خرده‌فروش، محدودیت‌های ظرفیت و تقاضا بررسی می‌شود و در صورتی که هر یک از این محدودیت‌ها نقض شده باشد کروموزم اصلاح می‌شود و این اصلاح تازمانی ادامه پیدا می‌کند که محدودیت ارضاء شود.

۵-۳. جستجوی محلی

در این جستجو بعد از تعیین فرزندان جدید حاصل از جهش جستجوی محلی سعی در پیدا کردن جوابی بهتر از جواب ایجادشده از جهش می‌کند و در صورت یافتن جواب بهتر آن‌ها را جایگزین می‌کند. جستجوی محلی بر روی بخش اول کروموزم اعمال می‌گردد که مسیر حرکت وسایل نقلیه را بهبود ببخشد. برای این کار از چهار روش استفاده شده است که در ادامه به توضیحات آن‌ها اشاره می‌گردد.

- روش اول: در این روش دو خانه از کروموزم انتخاب شده و اعداد بین این دو خانه جابجا می‌شوند
- روش دوم: در این روش یک مسیر انتخاب شده و اولین بازدیدکننده تبدیل به آخرین بازدیدکننده می‌شود.
- روش سوم: در این روش آخرین بازدیدکننده به اول تور منتقل شده و تبدیل به اولین بازدیدکننده می‌شود.

در الگوریتم پیشنهادی، برای هر سناریو یک ساختار کروموزوم مستقل ایجاد می‌شود که شامل تصمیمات مربوط به مسیریابی، تخصیص محصولات از توزیع‌کننده به خرده‌فروش، و سپس از خرده‌فروش به مشتریان است. ساختار الگوریتم به‌گونه‌ای طراحی شده که برای هر سناریو، مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها و متغیرهای تصمیم مجزا تولید می‌شود. به منظور اختصار، فقط ساختار مربوط به سناریوی ۱ در مقاله نمایش داده شده، اما همین الگو برای سایر سناریوها نیز به‌صورت مشابه اجرا و ارزیابی می‌شود.

بخش آخر از ساختار کروموزوم‌ها مربوط به مقدار ارسال محصول از خرده‌فروش به مشتریان می‌باشد. در این ساختار همانند ساختار قبل یک ماتریس $Z \times K \times J$ تشکیل می‌گردد که J تعداد خرده‌فروش‌ها و K تعداد مشتریان و Z تعداد محصولات می‌باشد. تفاوت این ماتریس با ساختار ماتریس بخش قبل در این است که علاوه بر تعداد وسایل نقلیه و سناریوها که در تعداد ماتریس‌های تشکیلی نقش دارند، تعداد مشتریان نیز در تعیین تعداد ماتریس‌ها دخیل می‌باشند. این ساختار نیز به این صورت است که اگر محصولی از خرده‌فروش به مشتری توسط یک وسیله نقلیه منتقل شود Q_{zjkv}^S مقدار می‌گیرد و متغیر باینری مرتبط با آن (X_{jkv2}^S) مقدار یک می‌گیرد. به همین ترتیب ساختار کروموزم تکمیل می‌گردد و محدودیت‌های ۶ و ۱۰ و ۱۲ و ۱۳ ارضا می‌شوند. سایر متغیرهای تصمیم مانند I_{jz}^S و D_{jzs} و X_{jz}^S و X_{v1jz}^S مشخص می‌شوند و محدودیت‌های ۸ و ۱۱ و ۱۴ و ۱۷ و ۱۸ نیز به‌طور کامل ارضا شده و الگوریتم نیازمند در نظر گرفتن جریمه نمی‌شود. جدول (۶) زیر مقدار محصول حمل‌شده از خرده‌فروش به مشتری در ۲ سناریو با مشتریان مختلف را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در جدول (۶) مشتری اول در سناریو اول محصول ۱ را از خرده‌فروش‌های ۳ و ۴ و ۶ با وسیله نقلیه اول دریافت می‌کند و نیاز خود را برطرف می‌نماید.

جدول (۶). ساختار کروموزوم Q_{zojv}^S

(مشتری اول با وسیله نقلیه اول در سناریو اول)			
J/Z	۱	۲	۳
۱	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰
۶	۱۹	۰	۱۱
۷	۰	۰	۰
۸	۰	۰	۰
۹	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۰

- روش چهارم: از عملگر SWAP استفاده شده است. در این عملگر دو عنصر از جواب به تصادف انتخاب می‌شوند و با یکدیگر جابجا می‌شوند.

۴-۵. تنظیمات پارامترهای الگوریتم

کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری به‌طور وسیعی به انتخاب پارامترهای موردنیاز بستگی دارد. طراحی کامل پارامترها که تمام ترکیبات ممکن را آزمایش می‌کند روشی است که در بیشتر تحقیقات به‌کار گرفته می‌شود. اما وقتی که تعداد فاکتورها به‌طور عمده افزایش می‌یابد تأثیرگذار نمی‌باشد. در الگوریتم Hybrid NSGA-II روش‌های مختلفی برای تعیین پارامترهای اندازه جمعیت، حداکثر تعداد تکرار، احتمال رخداد تقاطع و احتمال رخداد جهش وجود دارد که در این تحقیق از روش سعی و خطا استفاده شده و پارامترها در سه سطح در جدول (۷) لیست شده است. بدین‌صورت که مقادیر یکی از پارامترها را تغییر داده و مقادیر سایر پارامترها را ثابت در نظر می‌گیریم. الگوریتم متاهیوریستیک ۹ بار در حالت‌های مختلف اجرا شده و میانگین اجراهای مختلف برای هر یک از پارامترها در جدول (۸) ذکر شده است.

جدول (۷). مقادیر پیشنهادی پارامترهای الگوریتم

سطوح مورد نظر	پارامترها
۰.۵، ۰.۷، ۰.۹	Pc
۰.۱، ۰.۳، ۰.۵	pm
۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰	Max IT
۷۰، ۵۰، ۳۰	Pop Size

جدول (۸). مقادیر بهینه پارامترها

سطوح مورد نظر	پارامترها
۰.۷	Pc
۰.۱	pm
۱۰۰	Max IT
۵۰	Pop Size

۵-۵. نتایج حل مسأله

در ادامه نتایج حاصل از حل مثال فرضی موردنظر با در نظر گرفتن پارامترهای موجود در جدول (۹) ارائه شده است.

شکل (۱۰) نشان‌دهنده مجموعه جواب‌های بهینه در فضای جواب توابع هدف اول و دوم هستند و از بین این نقاط، با توجه به اینکه هر دو تابع هدف اول و دوم مینیمم‌سازی هستند، نقاط آبی، نقاط بهینه کارایی ضعیف بوده و نقاط قرمز رنگ نقاط بهینه کارایی قوی یا همان جبهه پارتویی را نشان می‌دهند.

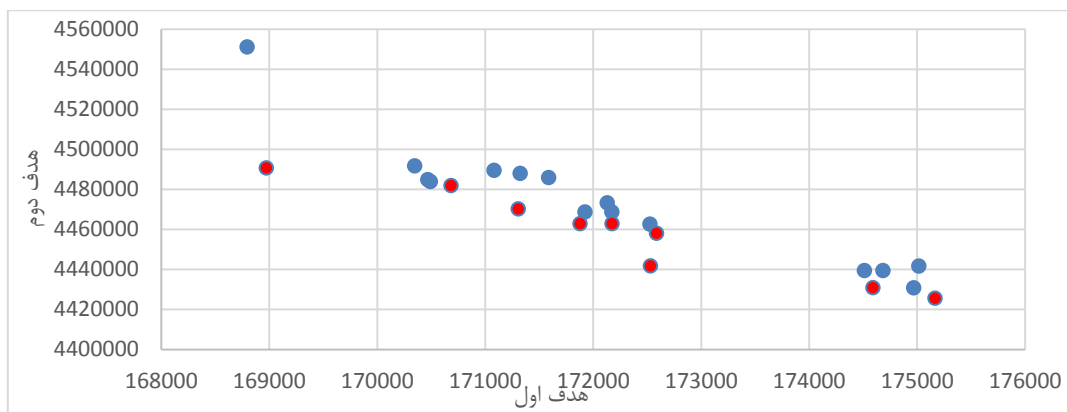
در شکل (۱۰) با افزایش میزان ریسک تصادف، میزان آلاینده‌ی شبکه نیز کاهش یافته و برعکس که این موضوع هم نشان‌دهنده تضاد این دو تابع هدف خواهد بود.

نقاط در شکل (۱۱) نشان‌دهنده کاهش در میزان انتشار شبکه با افزایش میزان هزینه‌ها همراه خواهد بود و برعکس که به معنای تضاد این دو تابع هدف است. این نمودارها با توجه به روش حل آن‌ها در مقایسه با نمودارهای جبهه پارتویی نقاط با کد گمز، نشان‌دهنده تمرکز بیشتر نقاط می‌باشد.

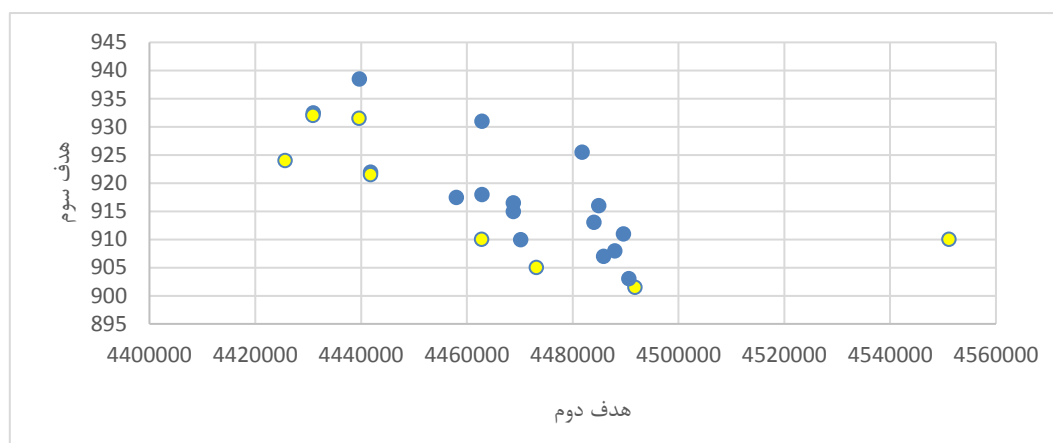
جدول (۹). مقادیر توابع هدف

هدف ۱	هدف ۲	هدف ۳
۱۷۴۵۱۱.۲	۴۴۳۹۶۴۳	۹۳۸.۵
۱۷۰۳۴۴.۶	۴۴۹۱۷۹۲	۹۰۱.۵
۱۶۸۷۹۵.۶	۴۵۵۱۱۳۴	۹۱۰
۱۷۵۱۶۷.۲	۴۴۲۵۶۶۵	۹۲۴
۱۷۰۶۸۴.۹	۴۴۸۱۸۲۷	۹۲۵.۵
۱۷۴۵۹۰.۵	۴۴۳۰۹۳۳	۹۳۲.۵
۱۶۸۹۷۴.۴	۴۴۹۰۶۶۱	۹۰۳
۱۷۲۱۳۰.۲	۴۴۷۳۱۸۳	۹۰۵
۱۷۱۳۰۵.۷	۴۴۷۰۱۴۰	۹۱۰
۱۷۲۵۸۷.۶	۴۴۵۸۰۱۴	۹۱۷.۵
۱۷۰۴۹۰.۳	۴۴۸۴۰۳۱	۹۱۳
۱۷۱۵۸۹.۶	۴۴۸۵۸۳۴	۹۰۷
۱۷۲۵۲۵.۱	۴۴۶۲۸۲۸	۹۳۱
۱۷۱۳۲۵.۹	۴۴۸۷۹۶۰	۹۰۸
۱۷۵۰۱۳.۵	۴۴۴۱۸۱۶	۹۲۱.۵
۱۷۲۱۷۱.۱	۴۴۶۸۷۸۷	۹۱۵
۱۷۱۸۸۰.۵	۴۴۶۲۸۳۲	۹۱۸
۱۷۴۹۶۵.۹	۴۴۳۰۹۳۳	۹۳۲
۱۷۴۶۸۲.۵	۴۴۳۹۶۴۳	۹۳۱.۵
۱۷۲۵۳۱.۹	۴۴۴۱۷۶۶	۹۲۲
۱۷۰۴۶۵.۵	۴۴۸۴۹۵۳	۹۱۶
۱۷۱۹۲۰.۹	۴۴۶۸۷۸۷	۹۱۶.۵
۱۷۲۱۷۴.۷	۴۴۶۲۸۳۲	۹۱۰
۱۷۱۰۷۹.۸	۴۴۸۹۶۰۱	۹۱۱

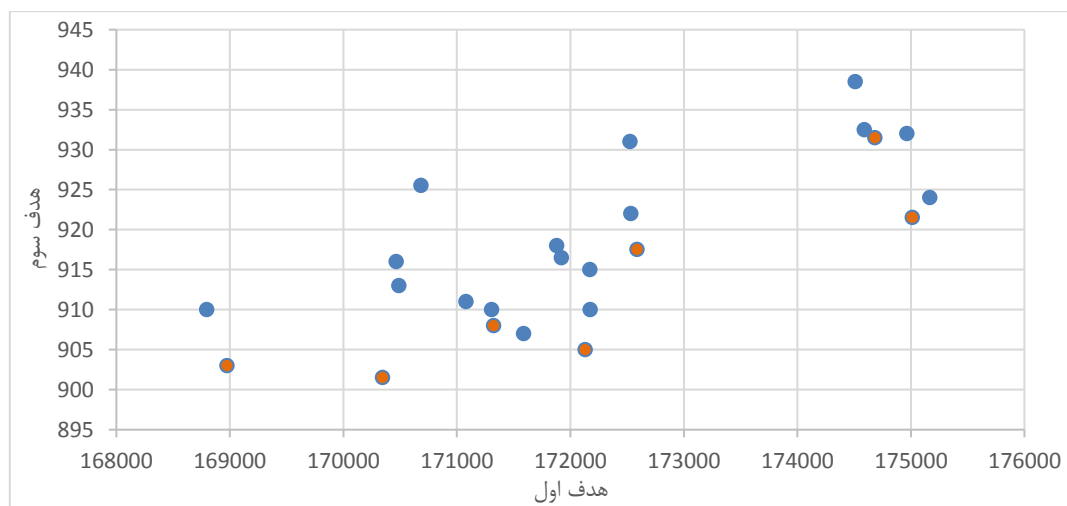
$$(j, k, z, v1, v2) = (10, 15, 3, 9, 4)$$



شکل (۹). جبهه پارتویی تابع هدف اول و دوم



شکل (۱۰). جبهه پارتویی تابع هدف دوم و سوم

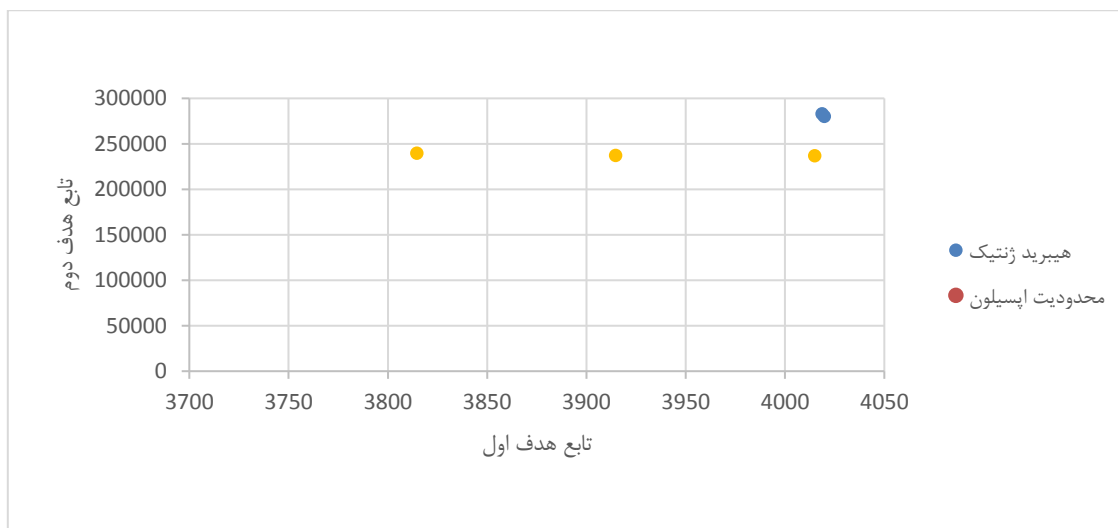


شکل (۱۱). جبهه پارتویی تابع هدف اول و سوم

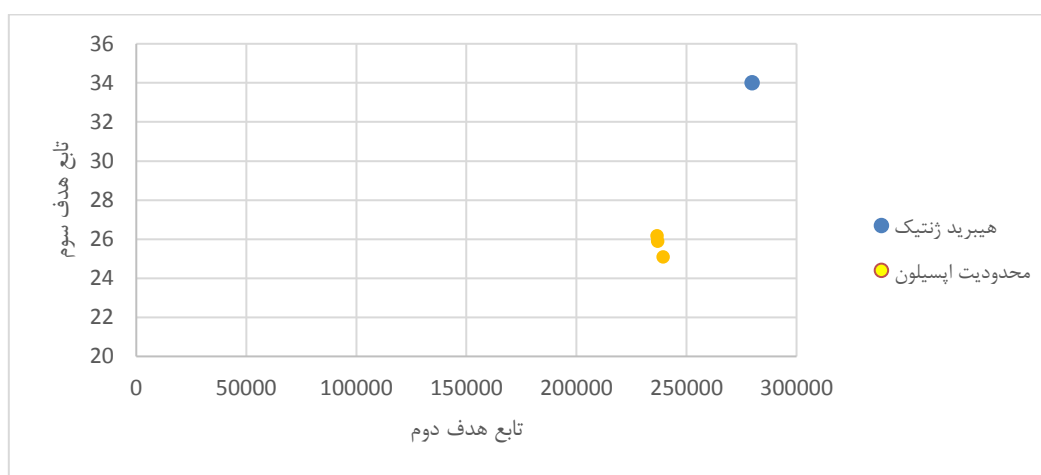
پارتویی به دست آمده از الگوریتم ژنتیک نمودار زرد رنگ جبهه پارتویی به دست آمده از کد گمز می‌باشد. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) با توجه به نقاط موجود برای نتایج حاصل شده از الگوریتم فقط دو نقطه نامغلوب است و نقاط دیگر مغلوب این دو نقطه می‌شوند (دو نقطه دارای مقایره نزدیک به هم بوده و تقریباً روی هم قرار دارند)، به عبارتی بهترین جوابی است که بیشینه ریسک و میزان آلاینده‌گی در آن کمترین مقدار را دارا می‌باشد.

نقاط در شکل (۱۱) نشان‌دهنده کاهش در میزان انتشار شبکه با افزایش میزان هزینه‌ها همراه بود و برعکس که به معنای تضاد این دو تابع هدف است. این نمودارها با توجه به روش حل آن‌ها در مقایسه با نمودارهای جبهه پارتویی نقاط با کد گمز، نشان‌دهنده تمرکز بیشتر نقاط می‌باشد.

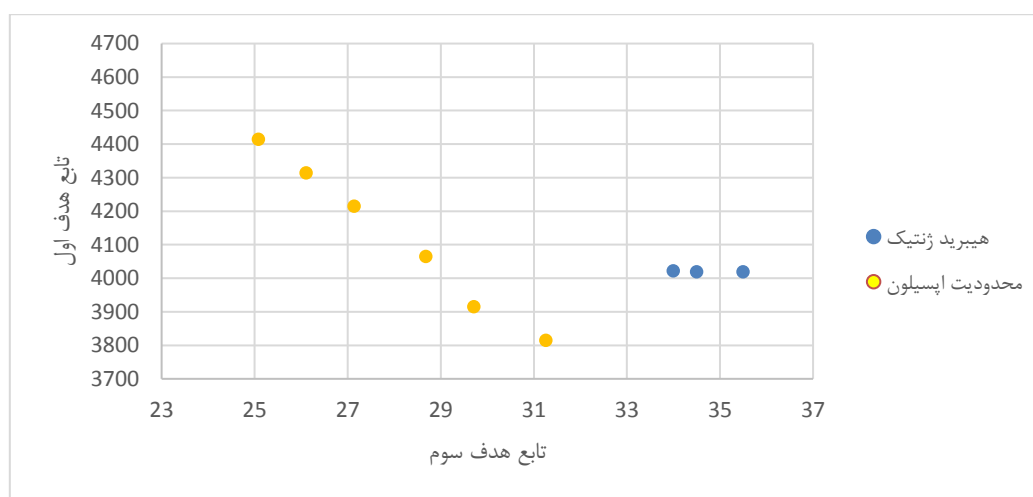
در ادامه به مقایسه جبهه پارتویی از حل یک مثال عددی در ابعاد کوچک با روش متاهیورستیک و روش ϵ -محدودیت در گمز می‌پردازیم. در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) نقاط آبی رنگ جبهه



شکل (۱۲). جبهه پارتویی تابع هدف اول و دوم در الگوریتم ژنتیک و روش ϵ - محدودیت



شکل (۱۳). جبهه پارتویی تابع هدف دوم و سوم در الگوریتم ژنتیک و روش ϵ - محدودیت



شکل (۱۴). جبهه پارتویی تابع هدف اول و سوم در الگوریتم ژنتیک و روش ϵ - محدودیت

۶. نتیجه گیری

حداقل سازی هزینه کل، کاهش ریسک حمل و نقل و کاهش انتشار گازهای آلاینده را دنبال می کند. نوآوری اصلی تحقیق، تمرکز بر مواد خطرناک پزشکی نظیر داروهای شیمی درمانی و پسماندهای

در این پژوهش یک مدل چند هدفه سناریو محور برای مسیریابی موجودی مواد خطرناک ارائه شد که به طور همزمان سه هدف

محیط‌زیست باشد.

۲-۶. پیشنهادهای عملی مبتنی بر یافته‌های پژوهش

نتایج این تحقیق نشان‌داد که با وجود تضاد میان سه معیار اصلی (هزینه، ریسک و آلاینده‌گی)، می‌توان از طریق رویکردهای چند هدفه به راه‌حل‌های کارآمد و متوازن دست یافت. بر این اساس، پیشنهادهای عملی زیر ارائه می‌شود:

(۱) اولویت‌بندی مسیرهای ایمن در مناطق پرجمعیت: یافته‌ها نشان دادند که افزایش شدت حادثه در مسیرهای پرجمعیت ریسک را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. بنابراین، لازم است مدیران حمل‌ونقل بیمارستانی در انتخاب مسیرها، ایمنی را بر هزینه صرف مقدم بدانند.

(۲) استفاده از ناوگان تفکیک‌شده و مناسب بار: مدل نشان داد که میزان بار وسیله نقلیه تأثیر مستقیم بر سطح ریسک دارد. لذا توصیه می‌شود ناوگان حمل مواد خطرناک پزشکی با ظرفیت‌های مختلف و استانداردهای ایمنی متناسب با نوع بار تجهیز شود.

(۳) توسعه سیستم‌های مدیریت سبز در لجستیک بیمارستانی: از آنجا که مدل نشان داد آلاینده‌گی می‌تواند با طراحی مسیر بهینه کاهش یابد، به‌کارگیری خودروهای کم‌مصرف یا برقی و پایش مستمر سوخت‌مصرفی پیشنهاد می‌شود.

(۴) برنامه‌ریزی سناریو محور برای مدیریت عدم قطعیت تقاضا: نتایج پژوهش تأیید کرد که سناریو محور بودن مدل باعث افزایش پایداری تصمیمات می‌شود. بنابراین، واحدهای لجستیک بیمارستانی باید در برنامه‌ریزی توزیع داروها و پسماندهای خطرناک، سناریوهای مختلف (افزایش تقاضا، تغییر مسیر، یا وقوع حادثه) را در نظر بگیرند.

(۵) یکپارچه‌سازی سیاست‌های ایمنی و محیط‌زیستی در زنجیره تأمین پزشکی: یافته‌ها نشان دادند که هزینه، ریسک و آلاینده‌گی قابل مدیریت همزمان هستند. لذا پیشنهاد می‌شود نهادهای نظارتی (مانند وزارت بهداشت و سازمان محیط زیست) سیاست‌های مشترکی برای حمل مواد خطرناک تدوین کنند تا هر سه معیار به‌صورت همزمان بهبود یابند.

(۶) آموزش و فرهنگ‌سازی در مراکز درمانی: نتایج مدل نشان‌داد حتی تغییر کوچک در شدت حادثه می‌تواند ریسک کلی شبکه را افزایش دهد. بنابراین، آموزش کارکنان درخصوص نحوه بسته‌بندی و بارگیری ایمن مواد خطرناک یک ضرورت عملی است.

۳-۶. محدودیت‌های پژوهش

ازجمله محدودیت‌های پژوهش حاضر، نبود داده‌های دقیق برای مطالعات میدانی در زمینه پسماندهای بیمارستانی و حمل مواد خطرناک بود. همچنین، به‌دلیل پیچیدگی بالای مدل سه هدفه عدم قطعیت، امکان حل مسائل استاندارد در ابعاد بسیار بزرگ و مقایسه عددی با تمامی پژوهش‌های پیشین فراهم نشد. هرچند، برای پوشش این محدودیت، یک الگوریتم ترکیبی NSGA-II همراه با جستجوی محلی توسعه داده شد که نشان داد مدل پیشنهادی قابلیت تعمیم به

بیمارستانی است که در ادبیات کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. مدل پیشنهادی علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و سطح ریسک، یک چارچوب یکپارچه برای ادغام این عوامل در تصمیمات مسیریابی و موجودی ارائه می‌دهد.

به منظور حل مدل در مقیاس‌های بزرگ، یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر NSGA-II و جستجوی محلی طراحی گردید که توانست جبهه‌های پارتوی با کیفیت و متنوعی تولید نماید. نتایج محاسباتی نشان داد که روش پیشنهادی از نظر کارایی محاسباتی و کیفیت جواب، بر روش‌های تک‌هدفه و حل‌کننده‌های دقیق در ابعاد بزرگ برتری دارد. از نظر سهم علمی، این تحقیق با (۱) توسعه مدلی یکپارچه برای مسیریابی موجودی مواد خطرناک پزشکی، (۲) ادغام عدم قطعیت تقاضا و سطح ریسک در چارچوب سناریو محور، و (۳) ارائه الگوریتم ترکیبی فراابتکاری کارآمد برای حل مسائل بزرگ مقیاس، می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در ارتقای ادبیات این حوزه مطرح شود.

۱-۶. کاربردهای عملی مدل پیشنهادی

مدل ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند در شرایط واقعی حوزه بهداشت و درمان به‌کار گرفته شود. به‌طور خاص، نمونه‌های کاربردی آن عبارت‌اند از:

(۱) مدیریت پسماندهای بیمارستانی: حمل سرنگ‌ها و سوزن‌های آلوده، کیسه‌های خون مصرف‌شده و سایر پسماندهای عفونی از بیمارستان‌ها به مراکز امحا. در این شرایط، مدل سه هدفه می‌تواند مسیرهایی پیشنهاد کند که ضمن کاهش هزینه حمل، خطرات ناشی از احتمال نشت یا تصادف را به حداقل برساند و اثرات آلاینده‌گی حمل‌ونقل را کنترل کند.

(۲) توزیع داروهای پرخطر: انتقال داروهای شیمی درمانی یا آنتی‌بیوتیک‌های تاریخ‌گذشته از مراکز پخش به بیمارستان‌ها و کلینیک‌ها. این داروها به‌دلیل سمیت بالا باید در کوتاه‌ترین زمان و با کمترین ریسک جابجا شوند؛ مدل پیشنهادی با توجه به تقاضای غیرقطعی بیمارستان‌ها، بهترین مسیرها و برنامه موجودی را ارائه می‌دهد.

(۳) حمل مواد شیمیایی ضد عفونی‌کننده: جابجایی موادی مانند فرمالین یا کلرین که به‌طور گسترده در مراکز درمانی استفاده می‌شوند و در صورت نشت می‌توانند تهدید زیست‌محیطی جدی ایجاد کنند. مدل حاضر می‌تواند مسیرها و وسایل نقلیه‌ای پیشنهاد دهد که ریسک در مناطق پرجمعیت را کاهش دهد.

(۴) شبکه‌های بهداشتی منطقه‌ای: در مقیاس بزرگ‌تر، مدل می‌تواند برای طراحی شبکه حمل‌ونقل در سطح استان یا کشور به‌کار رود؛ به‌گونه‌ای که چندین بیمارستان و مرکز درمانی تحت پوشش قرار گیرند و حمل مواد خطرناک پزشکی به‌صورت ایمن، اقتصادی و پایدار انجام گیرد.

این نمونه‌ها نشان می‌دهد مدل پیشنهادی نه‌تنها از منظر نظری بلکه از نظر عملی نیز قابلیت پیاده‌سازی در شبکه‌های واقعی را دارد و می‌تواند ابزار تصمیم‌گیری ارزشمندی برای مدیران حوزه سلامت و

- Rekik, Y., (2019). "Inventory routing problem for hazardous and deteriorating items in the presence of accident risk with transshipment option". *International journal of production economics*, 209: 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.018>
- [8] Sun, Y., Li, X., Liang, X., & Zhang, C., (2019). "A bi-objective fuzzy credibilistic chance-constrained programming approach for the hazardous materials road-rail multimodal routing problem under uncertainty and sustainability". *Sustainability (switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/su11092577>
- [9] Violi, A., Laganá, D., & Paradiso, R., (2020). "The inventory routing problem under uncertainty with perishable products: an application in the agri-food supply chain". *Soft computing*, 24(18): 13725–13740. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04497-z>
- [10] Hu, H., Li, J., Li, X., & Shang, C., (2020). "Modeling and Solving a Multi-Period Inventory Fulfilling and Routing Problem for Hazardous Materials". *Journal of systems science and complexity*, 33(3): 760–782. <https://doi.org/10.1007/s11424-019-8176-2>
- [11] Tavana, M., Tohidi, H., Alimohammadi, M., & Lesansalmasi, R., (2021). "A location-inventory-routing model for green supply chains with low-carbon emissions under uncertainty". *Environmental science and pollution research*, 28(36): 50636–50648. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13815-8>
- [12] Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A., Sadati-Keneti, Y., & Jafari, M. J., (2022). "A risk-based green location-inventory-routing problem for hazardous materials: NSGA II, MOSA, and multi-objective black widow optimization". *Environment, development and sustainability*, 24(2): 2804–2840. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01555-1>
- [13] Fattahi, P., & Tanhatalab, M., (2022). "Stochastic inventory-routing problem with lateral transshipment for perishable product". *Journal of modelling in management*, 17(2): 539–568. <https://doi.org/10.1108/jm2-09-2019-0230>
- [14] Foroozesh, N., Karimi, B., & Mousavi, S. M., (2022). "Green-resilient supply chain network design for perishable products considering route risk and horizontal collaboration under robust interval-valued type-2 fuzzy uncertainty: A case study in food industry". *Journal of environmental management*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114470>
- [15] Sadati-Keneti, Y., Sebt, M. V., Tavakkoli-Moghaddam, R., Rahbari, M., & Jafari, M. J., (2023). "Risk assessment in the supply chain of hazardous materials with carbon cap and trade mechanism: multi-objective red deer algorithm". *Annals of operations research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05531-y>
- [16] Pasandideh, S. H. R., Rahbari, M., & Sadati-Keneti, Y., (2023). "A Lagrangian relaxation algorithm and hybrid genetic algorithm-black widow optimization for perishable products supply chain with sustainable development goals consideration". *Annals of operations research*.
- مسائل بزرگتر را دارد و در مقایسه با روش دقیق (ε-محدودیت و BARON) می‌تواند در زمان کمتر، راه‌حلی با کیفیت مناسب ارائه کند.
- ۴-۶. پیشنهاد‌های پژوهش‌های آتی
- (۱) اعمال مدل‌های تخفیف برای افزایش تقاضا و جذب مشتریان جدید؛
- (۲) طراحی ساختار تدارکات و سفارش‌گذاری زمان‌بندی‌شده برای دستیابی به تحویل به‌موقع؛
- (۳) استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری (مانند MOEA/D, PSO و الگوریتم‌های هیبریدی جدید) برای افزایش دقت و کارایی حل در مقیاس‌های بزرگ‌تر؛
- (۴) تعمیم مدل به زنجیره تأمین معکوس و گسترش آن به مسیرهای حمل از تأمین‌کننده به توزیع‌کننده و سپس به خرده‌فروشان؛
- (۵) طراحی مسیرها و وسایل نقلیه مجزا برای حمل انواع مختلف مواد خطرناک، به‌ویژه در بخش بازگشت پسماندهای بیمارستانی به مراکز دفع؛
- (۶) استفاده از مجموعه داده‌های استاندارد یا داده‌های واقعی بیمارستانی جهت مقایسه مستقیم با پژوهش‌های پیشین و اعتبارسنجی مدل در ابعاد بزرگ‌تر.
- مراجع
- [1] Chopra, S., & Meindl, P., (2019). "Supply chain management and operation". XI Pearson (Vol. XI). https://books.google.com/books/about/Supply_Chain_Management.html?id=g2WvAEACAAJ
- [2] Alkaraan, F., Elmarzouky, M., Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Chiappetta Jabbour, C. J., & Gulko, N., (2025). "Maximising sustainable performance: Integrating servitisation innovation into green sustainable supply chain management under the influence of governance and Industry 4.0". *Journal of business research*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.115029>
- [3] Barbosa-Póvoa, A. P., da Silva, C., & Carvalho, A., (2018). "Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective". *European journal of operational research*, 268(2): 399–431. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036>
- [4] Robertson, M., (2022). "The History of Transportation". *Leland-West Insurance*. <https://www.lelandwest.com/planes-trains-automobiles-the-history-of-transportation.cfm>
- [5] Hu, H., Li, J., & Li, X., (2018). "A credibilistic goal programming model for inventory routing problem with hazardous materials". *Soft computing*, 22(17): 5803–5816. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2663-y>
- [6] Alinaghian, M., & Zamani, M., (2019). "A bi-objective fleet size and mix green inventory routing problem, model and solution method". *Soft computing*, 23(4): 1375–1391. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2866-2>
- [7] Timajchi, A., Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J., &

- of fuels". *RAIRO - operations research*.
<https://doi.org/10.1051/ro/2024162>
- [۲۱] نخعی نژاد، مهدی، محزون، محمد و سالکی، میلاد، (۱۴۰۳). «ارائه مدل زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن هزینه انتشار کربن در بخش‌های حمل‌ونقل و نگهداری در وسایل نقلیه ناهمگن». *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۱۲(۲۴)، ۷۷-۹۱.
- <https://doi.org/10.22084/ier.2024.29726.2179>
- [۲۲] دارستانی، حسین، جوادی، بابک، موسی‌زاده، محمد و ابدالی، محمدرضا، (۱۴۰۳). «طراحی مدل دوهدفه شبکه زنجیره تأمین گوشت با در نظر گرفتن قابلیت ارتجاعی تحت شرایط عدم قطعیت». *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۱۲(۲۴)، ۱۴۷-۱۶۵.
- <https://doi.org/10.22084/ier.2024.29296.2166> .۱۶۵-۱۴۷
- [23] Floudas, C. A., (1995). "Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications". Oxford University Press.
<https://academic.oup.com/book/407>
- <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05532-x>
- [17] Pérez-Lechuga, G., Martínez-Sánchez, J. F., Venegas-Martínez, F., & Madrid-Fernández, K. N., (2024). "A Routing Model for the Distribution of Perishable Food in a Green Cold Chain". *Mathematics*, 12(2).
<https://doi.org/10.3390/math12020332>
- [18] Delshad, M. M., Chobar, A. P., Ghasemi, P., & Jafari, D., (2024). "Efficient Humanitarian Logistics: Multi-Commodity Location– Inventory Model Incorporating Demand Probability and Consumption Coefficients". *Logistics*, 8(1).
<https://doi.org/10.3390/logistics8010009>
- [19] Abbasi, S., Ardeshir Nasabi, M., Vlachos, I., Eshghi, F., Hazrati, M., & Piryaee, S., (2024). "Designing a Sustainable Nonlinear Model Considering a Piecewise Function for Solving the Risk of Hazardous Material Routing-Locating Problem". *Sustainability (switzerland)*, 16(10).
<https://doi.org/10.3390/su16104112>
- [20] Alves da Silva Mundim, A., Oliveira dos Santos, M., & Morabito, R., (2024). "Sustainable solutions analysis of a bi-objective green inventory routing problem with heterogeneous fleet and different types

Designing a Sustainable Inventory Routing Model for Multi-Commodity Hazardous Materials Under Uncertainty

Mehrnaz Ghorbani¹, Alireza Eydi^{2*}, Maedeh GholamAzad³

¹ MSc in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

² Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

³ Postdoc Researcher, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025/06/26

Revised: 2025/09/06

Accepted: 2025/09/11

Keywords:

Supply Chain Management
Sustainability, Inventory Routing
Dangerous Goods
Scenario-Based Approach

ABSTRACT

This study aims to design a sustainable decision-making model for optimizing the inventory routing of hazardous materials in the supply chain. Hazardous materials such as medical waste, fuel, and flammable chemicals play an essential role in industries and healthcare systems; however, due to their toxic and flammable nature, they pose serious threats to human health, public safety, and the environment. The importance of this issue becomes more evident when considering that even a single accident during the transportation of such materials can cause severe human, financial, and environmental damages. Therefore, it is crucial to develop integrated models that simultaneously address economic, safety, and environmental dimensions. A multi-objective mathematical model was developed in this research to optimize three key criteria: total cost, maximum accident risk, and environmental emissions. To enhance realism, demand uncertainty and transportation risk were modeled using a scenario-based approach, ensuring that the solutions remain feasible under different operating conditions. For solving the model, exact methods were applied to small-scale instances, while a hybrid algorithm based on NSGA-II combined with a local search procedure was designed and implemented for large-scale problems, ensuring both scalability and solution quality. Numerical results revealed that considering both risk and uncertainty in the decision-making process significantly reduces transportation hazards, improves environmental performance, and increases the overall sustainability of the supply chain. Sensitivity analysis further demonstrated that an increase in accident severity directly leads to higher network risk, forcing decision-makers to balance between costs and safety levels. Moreover, the proposed hybrid algorithm generated high-quality solutions within shorter computational times compared to exact approaches in large-scale cases. By integrating multi-objective modeling, scenario-based uncertainty, and metaheuristic optimization, this research provides an effective framework for the sustainable management of hazardous material transportation. The findings can assist supply chain managers and policymakers in making more informed decisions that simultaneously minimize costs, enhance safety, and protect environmental resources.

* Corresponding author. A. Eydi

Tel.: 021-33660073; E-mail: Alireza.eydi@uok.ac.ir