

مکان‌یابی مسیریابی وسائل نقلیه با در نظر گرفتن کالاهای فسادپذیر و به‌کارگیری فناوری RFID تحت شرایط وجود انبار متقاطع و عدم قطعیت

منا پاکزاد^۱، هیوا فاروقی^{۲*}، امیرمحمد گل‌محمدی^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

خلاصه

فساد، به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم در بسیاری از محصولات دنیای واقعی باگذشت زمان رخ می‌دهد و نادیده گرفتن آن موجب افزایش هزینه‌ها و اختلال در تصمیم‌گیری‌های موجودی می‌شود. برای مقابله با این چالش، در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل تأمین‌کنندگان، انبارهای متقاطع و مشتریان، با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. مدل پیشنهادی چندمحصولی بوده و دارای دو تابع هدف است: اول، کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل، مکان‌یابی و مسیریابی، و دوم، حداقل‌سازی مجموع زمان تحویل. با توجه به نقش فزاینده اینترنت اشیاء در لجستیک، فرض شده است که محصولات و وسایل نقلیه مجهز به سیستم‌های RFID هستند تا دما و زمان ماندگاری اقلام فسادپذیر در هر مرحله کنترل شده و اطمینان لازم از ایمنی نگهداری و ارسال برای تولیدکنندگان و مشتریان فراهم گردد. به منظور حل مدل، از روش تریابی-هسینی جهت تک‌هدفه‌سازی و از رویکرد بهینه‌سازی استوار مولوی جهت مواجهه با عدم قطعیت استفاده شده است. در نهایت، تحلیل حساسیت روی پارامترها انجام و نتایج مدل قطعی و استوار مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه استفاده از RFID در مدل قطعی زمان تحویل را کاهش می‌دهد، اما در مدل استوار با افزایش هزینه و زمان همراه است. با این حال، مدل استوار دارای انعطاف‌پذیری بالاتری در شرایط عدم قطعیت بوده و به‌ویژه برای زنجیره‌های تأمین محصولات حساس به زمان، باوجود هزینه بالاتر، توصیه می‌شود. علاوه بر این، این مدل می‌تواند در شرایط واقعی به‌عنوان ابزاری کارآمد به کار رود چراکه مشکلات معمول مدل‌های غیرقطعی، نظیر غیرقابل قبول بودن یا عدم بهینگی را ندارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین

محصولات فاسدشدنی

مسأله مکان‌یابی-مسیریابی

عدم قطعیت

بهینه‌سازی استوار

۱. مقدمه

اخلاقی برای ایجاد یک اکوسیستم کارآمدتر، پایدارتر و مقاوم‌تر نیز می‌باشد. کالاهای با عمر کوتاه و به‌خصوص مواد غذایی مواردی هستند که بیشترین چالش‌ها را برای مدیریت زنجیره تأمین به‌وجود می‌آورند. بنابراین، یکی از مسائل بنیادی در این زمینه توجه به تحویل به‌موقع، کیفیت و تازگی محصولات است. بسیاری از انواع مواد غذایی، دارویی،

زنجیره تأمین درخصوص کالاهای با عمر کوتاه و فاسدشدنی همواره یکی از با اهمیت‌ترین و چالش‌برانگیزترین مباحث مدیریتی در زمان‌های مختلف بوده است. مدیریت مؤثر کالاهای فاسدشدنی در زنجیره تأمین نه تنها یک ضرورت کسب‌وکار است، بلکه یک وظیفه

* نویسنده مسئول: هیوا فاروقی

تلفن: ۰۷۳-۳۳۶۶۰۰۸۷؛ پست الکترونیکی: h.farughi@uok.ac.ir

بهینه‌سازی چنین سیستم پیچیده‌ای انجام شده است.

ساختار مقاله به شرح مقابل است: در بخش ۲، پیشینه تحقیق و مدل‌های مرتبط بررسی شده است. در بخش ۳، مدل ریاضی مسئله معرفی و فرضیات آن تشریح می‌شود. در بخش ۴، روش حل و تحلیل حساسیت ارائه می‌گردد و در بخش ۵، نتایج، بینش‌های مدیریتی و پیشنهاد های پژوهشی و کاربردی ارائه شده است.

۲. پیشینه تحقیق

حمل‌ونقل کالا به‌علت تأثیر مستقیمی که در قیمت، دسترسی، کیفیت و موجودی محصول می‌گذارد، دارای نقش کلیدی در شبکه‌های توزیع است [۶۵]. گویندان و همکاران ۲۰۱۳، یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی چند وسیله نقلیه دوسطحی با پنجره‌های زمانی برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی فاسدشدنی ارائه کردند [۵۶]. یانگ لیو و همکاران ۲۰۱۴، مدل و الگوریتم مسئله مکان‌یابی-مسیریابی مطمئن برای کالاهای فاسدشدنی را ارائه کردند و با توجه به ویژگی کالاهای فاسدشدنی، چارچوب برنامه‌ریزی فرصت-محدودیت را برای بهینه‌سازی مکان‌های انبار و مسیریابی خودروها تدوین کردند [۵۷]. خلیلی و همکاران ۲۰۱۵، یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوهدفه جدید برای توزیع محصولات فاسدشدنی ارائه کردند و با الگوریتم فراابتکاری به حل آن پرداختند [۲۴]. ربانی و همکاران ۲۰۱۶، یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با در نظر گرفتن انبارهای چندمرکزی برای تحویل مواد غذایی فاسدشدنی را ارائه کردند. در این مقاله، یک فرمول جدید برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با چندانبار، چند انبار میانی و یک انبار مبدأ و با مسائل مربوط به تازگی برای کالاهای فاسدشدنی ارائه شده است [۲۶].

هیاسات و همکاران ۲۰۱۷، یک رویکرد الگوریتم ژنتیک برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی با محصولات فاسدشدنی ارائه کردند. مدل توصیف شده در این مقاله سه سطح تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین را با افزودن یک جزء سطح استراتژیک به یک مدل مسیریابی موجودی ادغام می‌کند [۲۷]. رفیعی مجد و همکاران ۲۰۱۸، به مدل‌سازی و حل مسئله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی یکپارچه در زنجیره تأمین محصول چند دوره‌ای و فاسدشدنی با عدم قطعیت و حل با استفاده از الگوریتم آزادسازی لاگرانژی پرداختند [۲۸]. یعقوبی و اکرمی ۲۰۱۹، مدلی جدید برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی تأمین‌کنندگان مواد اولیه فاسدشدنی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه کردند. این مقاله یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن محدودیت فسادپذیری مواد فاسدشدنی ارائه می‌دهد که در دسته مسائل NP-hard قرار دارد. برای حل مدل پیشنهادی، از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است [۲۹]. لی و همکاران ۲۰۱۹، مسئله مکان‌یابی-مسیریابی ظرفیت‌دار دوهدفه برای چندین کالای فاسدشدنی را ارائه کردند. در ساخت مدل دوهدفه با کمترین زمان توزیع کل و کمترین هزینه کل، ضرایب وزن هدف با توجه به حساسیت

شیمیایی، خون و ... از جمله محصولات فسادپذیر هستند. در واقع فساد به انواع آسیب‌دیدگی، ضایعات، خشک شدن و یا تبخیر اشاره دارد و به‌این معناست که کالا از عملکرد مورد انتظار خود انحراف داشته باشد. در دهه‌های اخیر تقاضا برای محصولات فاسدشدنی در بازارهای مختلف افزایش چشم‌گیری داشته است. در عین حال مشتریان در کشورهای مختلف بیش از پیش نگران تازگی این محصولات شده‌اند. مسئله جهانی ضایعات مواد غذایی به‌ویژه در ایالات متحده شدید است، به‌طوری‌که تقریباً ۱۵٪ از محصولات فاسدشدنی در طول حمل‌ونقل و فروش هرساله فاسد می‌شوند [۴۱]. علاوه بر این، فروش محصولات فاسدشدنی نیمی از کل صنعت خرده فروشی را تشکیل می‌دهد، در حالی‌که حدود ۱۰ درصد از کالاهای فاسدشدنی قبل از خرید توسط مشتریان هدر می‌رود [۴۷]. برای مقابله با این چالش‌ها، اجرای کنترل موجودی مؤثر، بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل و افزایش کارایی عملیاتی در زنجیره تأمین محصول فاسدشدنی بسیار مهم است. انبار متقاطع به‌عنوان یک استراتژی نوآورانه، نقش کلیدی در بهینه‌سازی هزینه‌ها، مدیریت موجودی و ارتقای سطح خدمات به مشتریان ایفا می‌کند. انبارهای متقاطع برای صنایع مختلف ضروری است و شامل جابجایی کالا از تأمین‌کنندگان به مشتریان از طریق یک انبار مرکزی بدون نیاز به ذخیره‌سازی طولانی مدت است [۶۶]. همچنین به‌عنوان یکی از تسهیل‌کننده‌های مهم زنجیره تأمین اینترنت اشیا، سیستم‌های RFID^۱ نیز نقش مهمی در نظارت و ردیابی محصولات در مدیریت زنجیره تأمین ایفا می‌کنند. قابلیت RFID در شناسایی، ردیابی و مکان‌یابی اشیاء انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای فراهم می‌کند [۵۲]. ازجمله مباحث قابل توجه در بخش لجستیک زنجیره تأمین، مسئله برنامه‌ریزی مسیرهای توزیع کالا می‌باشد. این امر درمورد کالاهای فاسدشدنی اهمیت بیشتری می‌یابد. کالاهای فسادپذیر از طرفی دارای دوره عمر بسیار محدودی بوده و ازسوی دیگر به‌دلیل شرایط ناپایدار و متغیر نگهداری درضمن فرایند حمل، در معرض کاهش کیفیت و ارزش و یا حتی فساد کامل قرار دارند. نسبت تلفات کالاهای فاسدشدنی ناشی از حمل‌ونقل در بسیاری از کشورها به ۳۰ درصد می‌رسد و در سایر مناطق کمتر توسعه‌یافته شدیدتر است. حساسیت بالای پخش این دسته از اقلام، به‌کارگیری مدلی را برای برنامه‌ریزی و تعیین مسیرهای توزیع بهینه کالاها بین مشتریان، به منظور اطمینان از حداکثر کیفیت در زمان تحویل الزامی می‌سازد.

با توجه به افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان از سلامتی، اهمیت کیفیت غذای تازه در زندگی روزمره برجسته شده است. نوسانات زیاد تقاضا و قیمت غذای تازه و نگرانی شدید مشتریان درمورد ایمنی غذای تازه نیز دلایلی برای چالش زنجیره تأمین غذای تازه است.

با وجود مطالعات گسترده در حوزه زنجیره تأمین، کمبود پژوهشی که به‌طور همزمان به مسئله کالاهای فاسدشدنی، انبار متقاطع، فناوری RFID و شرایط عدم قطعیت بپردازد، احساس می‌شود. این تحقیق باهدف پرکردن این شکاف و ارائه یک مدل یکپارچه و استوار برای

محصولات فاسدشدنی را با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی ارائه کردند. در این تحقیق، یک مسأله مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی برای شبکه زنجیره‌تأمین محصولات فاسدشدنی چند سطحی، چند محصولی و چند دوره‌ای پیشنهاد شد. برای حل مسأله NP-hard، دو الگوریتم فراابتکاری ترکیبی،^۵ HGA-VNS و^۶ HMPGA-VNS، استفاده شده است [۴۷]. لینینگ و همکاران ۲۰۲۳، یک رویکرد یکپارچه برای بهینه‌سازی مسأله مکان‌یابی-موجودی و مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی برای محصولات فاسدشدنی ارائه کردند. در این پژوهش، یک زنجیره‌تأمین سه سطحی شامل تأمین‌کنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان ساختار یافته است، با تأثیرات اینکه آیا اجازه ارسال مستقیم از تأمین‌کننده به خرده‌فروش را در نظر می‌گیرد یا خیر و دو مسأله تصمیم‌گیری^۷ LIP و^۸ LIRP حل می‌شود [۴۸]. دی‌مایو و همکاران ۲۰۲۳، به بررسی تصمیم‌گیری بی‌طرفانه در مسائل مکان‌یابی مسیریابی با خواسته‌های نامشخص مشتری پرداختند [۵۰]. در این مطالعه یک مسأله مکان‌یابی مسیریابی^۹ (LRP) با هدف مکان‌یابی یک انبار سردخانه در صنایع لبنی در نظر گرفته شده است.

در دنیای صنعتی امروز واحدهای تولیدی و تأمین‌کنندگان سعی دارند با مکان‌یابی مناسب و همچنین مسیریابی وسایل نقلیه هزینه‌های خود را کاهش دهند. مسأله مکان‌یابی-مسیریابی به‌طور اساسی مربوط به تصمیم‌های استراتژیک مکان‌یابی تسهیل است. این مسائل به منظور پیدا کردن مکان و تعداد مناسب تسهیلات و نیز مسیرهای توزیع و برنامه زمان‌بندی وسایل نقلیه تعریف شده‌اند. اولین کار بر روی مسائل مکان‌یابی توسط جی ام نامبیر ۱۹۷۹، در حوزه مسأله مکان‌یابی-تخصیص در صنعت لاستیک طبیعی، تحقیقاتی انجام شد. این تحقیق به بهبود جمع‌آوری، پردازش و بازاریابی لاستیک مالکان کوچک در مالزی پرداخت [۷]. در سال ۱۹۸۱، Laporte و Nobert اولین الگوریتم دقیق برای LRP عمومی را معرفی کردند. در این مقاله یک انبار واحد انتخاب و از تعداد ثابت خودرو استفاده شد. راه‌حل اولیه با محدود کردن محدودیت‌های زیر تور ایجاد شد، سپس از شاخه‌وکران برای اعمال یکپارچگی استفاده شده است. در نهایت، محدودیت‌های زیر تور به‌صورت تکراری اضافه شده‌اند [۸]. جوزف پرل و مارک اس داسکین ۱۹۸۵، مسأله مکان‌یابی-مسیریابی انبار^{۱۰} (WLRP) را معرفی کردند. آن‌ها کل مسأله را به سه مسأله فرعی تجزیه کرده و در سه مرحله حل می‌کنند. در مرحله اول، با استفاده از رویکرد اکتشافی، مسأله فرعی^{۱۱} MDVRP حل می‌شود [۹]. در مرحله دوم،^{۱۲} FLP در نظر گرفته شده و بهینه حل می‌شود. در نهایت، راه‌حل در مرحله سوم با استفاده از رویکرد ابتکاری بهبود می‌یابد. تای-هسی وو و همکاران ۲۰۰۲، راه‌حل‌های ابتکاری برای مسائل مکان‌یابی-مسیریابی

کالاهای فاسدشدنی مختلف به زمان و هزینه تنظیم می‌شود و انواع حساس هر کالا مورد بحث قرار گرفته است [۳۰]. رهبری و همکاران (۲۰۱۹)، مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسیله نقلیه با انبار متقاطع برای محصولات فاسدشدنی تحت عدم قطعیت را با دو مدل دو هدفه قوی ارائه کردند. زمانی که زمان سفر وسایل نقلیه خروجی و عمر تازگی محصولات نامشخص باشد، دو مدل قوی توسعه می‌یابند. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر عدم قطعیت ظاهری در زمان سفر بر زوال اهداف، بیشتر از تأثیر تازگی-عمر محصولات است و با استفاده از مدل پیشنهادی، به‌طور متوسط بدون افزایش هزینه توزیع، تازگی محصولات تحویل شده ۷۴/۱۴ درصد افزایش می‌یابد که می‌تواند ضایعات را کاهش دهد [۳۱]. یینگ جی و همکاران ۲۰۲۰، برای حل مسأله مسیریابی موجودی محصولات فاسدشدنی با محدودیت‌های پنجره زمانی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱ (MILP) را ارائه دادند تا هزینه کل را به حداقل برسانند [۳۲]. تی سانگ و همکاران ۲۰۲۰، یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا و برنامه‌ریزی تحویل چنددمایی برای لجستیک تجارت الکترونیک مواد غذایی فاسدشدنی را ارائه کردند. این مقاله یک سیستم برنامه‌ریزی تحویل چنددمایی مبتنی بر اینترنت اشیا^۲ (IoT – MTDPS) را پیشنهاد می‌کند، که یک بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک دومرحله‌ای چندهدفه^۳ (2PMGAO) را تعبیه می‌کند [۳۴]. درودی و همکاران ۲۰۲۱، حداقل تأخیر در مسأله مکان‌یابی مسیریابی موجودی فازی برای مواد چند محصول فاسدشدنی را ارائه کردند. در این مقاله یک مدل چنددوره‌ای با سه وظیفه اصلی طراحی شد که شامل حداقل هزینه کل زنجیره‌تأمین، به حداقل رساندن زمان شبکه‌ها و به حداقل رساندن میزان آلودگی ناشی از فعالیت‌های زنجیره‌ای می‌شود [۳۸].

وی داز و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی امکانات پیاده‌سازی فناوری RFID در حمل‌ونقل کالاهای فاسدشدنی پرداختند [۴۰]. شهابی شه‌میری و همکاران ۲۰۲۱، تحقیقی را تحت عنوان مسأله مسیریابی و زمان‌بندی برای شبکه‌های انبار متقاطع با محصولات فاسدشدنی، وسایل نقلیه ناهمگن و تحویل جداگانه انجام دادند. این مقاله برای برطرف کردن شکاف‌ها و پرداختن به موقعیت‌های واقعی زندگی، یک مدل MILP سه‌منظوره را برای برنامه‌ریزی و مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن در یک سیستم انبار چندگانه مورد مطالعه قرار داده است [۵۸]. ذبیحیان بیشه و همکاران ۲۰۲۲، مسأله مکان‌یابی مسیریابی سبز با ظرفیت چندانباری با در نظر گرفتن عدم قطعیت و صف در تسهیلات را ارائه کردند. این تحقیق^۴ MGCLRP را با پنجره‌های زمانی تحت عدم قطعیت و صف درون تسهیلات در نظر گرفته است [۴۲]. پان و همکاران ۲۰۲۳، بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین

7. Location-Inventory Problem
8. Location-Inventory-Routing Problem
9. Location-Routing Problem
10. Warehouse Location-Routing Problem
11. Multi-Depot Vehicle Routing Problem
12. Fuzzy Linear Programming

1. Mixed-Integer Linear Programming
2. Internet of Things-Based Multi-Temperature Delivery Planning System
3. Two-Phase Multi-Objective Genetic Algorithm Optimizer
4. Multi-Depot Green Capacitated Location Routing Problem
5. Hybrid Genetic Algorithm-Variable Neighborhood Search
6. Hybrid Multiple Population Genetic Algorithm-Variable Neighborhood Search

نزدیک به بهینه جهانی پیشنهاد می‌شود. خلیل‌زاده و همکاران ۲۰۲۲، مسأله مکان‌یابی مسیریابی دوسطحی پایدار را با در نظر گرفتن ترکیب مسیرهای باز و بسته تحت عدم قطعیت ارائه کردند. در این پژوهش، هر دو مسیر باز و بسته در مسأله در نظر گرفته شده است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه (MILP) شامل به حداقل رساندن هزینه‌ها و انتشار CO₂ و به حداکثر رساندن مسئولیت اجتماعی برای مسأله توسعه داده شد [۴۶]. با توجه به NP-Hardness، الگوریتم‌های فراابتکاری بانام‌های NSGA-II^۷ و MOSFS^۸ از طریق نرم‌افزار MATLAB برای حل مسائل با اندازه بزرگ و به دست آوردن راه‌حل‌های پارتو مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. عشقی و همکاران ۲۰۲۲، یک مدل‌سازی ریاضی قوی چندهدفه امداد اضطراری در فاجعه، را تحت عدم قطعیت انجام دادند. در این تحقیق، یک مسأله لجستیکی چند هدفه، چند کالایی، چند وسیله نقلیه و چندسطحی در یک وضعیت فاجعه بار تحت عدم قطعیت ارائه شد. برای مقابله با عدم قطعیت، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط قوی ارائه شد. هدف این مدل به حداکثر رساندن خدمات عادلانه برای افراد آسیب‌دیده، به حداکثر رساندن عادلانه بودن توزیع کالا و به حداقل رساندن هزینه کل شبکه بود. عباسی و همکاران ۲۰۲۳، پژوهشی با عنوان طراحی مسأله مکان‌یابی-مسیریابی برای یک زنجیره تأمین سرد با توجه به فاجعه COVID-19^۹ ارائه کردند [۴۹]. در این مطالعه، یک مدل مسأله مکان‌یابی مسیریابی (LRP) برای شبکه توزیع چندین اقلام غذایی فاسدشدنی در یک زنجیره تأمین سرد^{۱۰} (CSC) در نظر گرفته شد که در آن وسایل نقلیه می‌توانند در هنگام فاجعه COVID-19 در پمپ بنزین‌ها سوخت‌گیری کنند. این مسأله به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای کاهش تولید دی اکسید کربن (CO₂) فرموله شد. قاسمی و همکاران ۲۰۲۳، یک مدل چند هدفه و چند سطحی برای مسأله مکان‌یابی مسیریابی در زنجیره تأمین براساس پنجره زمانی مشتری ارائه کردند [۵۱]. در این پژوهش با در نظر گرفتن زمان سفر احتمالی و پنجره زمانی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای TLRP^{۱۱} ارائه شد. این مدل باهدف دستیابی به دو هدف، یعنی به حداقل رساندن هزینه‌ها و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان مشتری که شامل تحویل به موقع به مشتریان و رضایت کامل آن‌ها است، می‌باشد. مدل ریاضی پیشنهادی در ابعاد کوچک و متوسط با رویکرد محدودیت اِپسیلون و در ابعاد بزرگ با الگوریتم NSGA-II توسعه داده شده است (جدول (۱)).

چندانبار را ارائه کردند. هدف اصلی این تحقیق توسعه یک رویکرد کارآمد برای حل MDLRP^۱ و انواع آن بوده است [۱۱]. کریستین پرینز و همکاران ۲۰۰۶، حل مسأله مکان‌یابی-مسیریابی ظرفیت توسط GRASP^۲ تکمیل شده با یک فرآیند یادگیری و یک مسیر پیوند مجدد را ارائه کردند [۱۳]. در این مقاله، یک روش فراابتکاری جدید برای LRP با انبارهای ظرفیت‌دار و وسایل نقلیه ارائه شده است. گوئرا و همکاران (۲۰۰۷) از روش یکسان برای تقسیم مسأله در دو مرحله استفاده می‌کنند: مرحله تخصیص مکان و مرحله مسیریابی وسیله نقلیه. در مرحله اول، راه‌حل مجموعه‌ای از انبارها است که براساس اختصاص مشتریان به نزدیکترین انبار انتخاب می‌شوند. سپس، در مرحله دوم، یک مسأله فروشنده دوره گرد (TSP) بدون محدودیت ظرفیت برای وسایل نقلیه حل می‌شود، سپس همان TSP برای در نظر گرفتن ظرفیت وسیله نقلیه اصلاح می‌شود [۱۶]. این روش برای حل مسائل LRP با چندین انبار و چندین مشتری کاربردی دارد. با استفاده از این روش، می‌توان به صورت بهینه مسأله مکان‌یابی-مسیریابی ظرفیت‌دار را حل کرد.

در ادامه به بررسی پژوهش‌هایی که در سال‌های اخیر بر روی مسائل مکان‌یابی مسیریابی صورت گرفته است، پرداخته می‌شود. آیچون لیو^۳ و همکاران ۲۰۲۱، برای مدیریت زنجیره تأمین پایدار محصولات فاسدشدنی در بازارهای در حال ظهور، یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی یکپارچه را ارائه کردند [۴۱]. صداقت و همکاران ۲۰۲۲، یک مسأله مکان‌یابی-مسیریابی-موجودی حمل‌ونقل پایدار^۴ (TLIRP) را مورد مطالعه قرار دادند. برای مفهوم پایداری سه تابع هدف شامل، کاهش هزینه‌های اقتصادی، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و کاهش اثرات منفی اجتماعی در نظر گرفته شد. برای حل مدل از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کردند [۴۳]. یو و همکاران ۲۰۲۲، مسأله مکان‌یابی مسیریابی منطقه‌ای برای جمع‌آوری زباله با استفاده از بازپخت شبیه‌سازی شده و الگوریتم ژنتیک ترکیبی را ارائه کردند [۴۴]. جی و همکاران ۲۰۲۲، مطالعه بر روی مسأله ترکیبی مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی پایدار^۵ (CLIRP) براساس پیش‌بینی تقاضا انجام دادند [۴۵]. براساس ساخت یک مدل پیش‌بینی تقاضای چند سطحی، پنج بخش از کل هزینه‌های لجستیک شامل: هزینه‌های حمل‌ونقل و حمل‌ونقل منطقه‌ای، هزینه‌های ثابت ساخت مرکز توزیع، هزینه‌های نگهداری موجودی، هزینه‌های کمبود و نجات، به طور جامع در نظر گرفته شده است. مدل CLIRP با حداقل هزینه کل لجستیک به عنوان تابع هدف ایجاد می‌شود. راه‌حل اولیه توسط یک الگوریتم اکتشافی ارائه می‌شود و سپس یک الگوریتم HH-TS-SA^۶ برای یافتن راه‌حل

7. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
8. Multi-Objective Stochastic Fractal Search
9. Coronavirus Disease
10. Cold Supply Chain
11. Transportation Location-Routing Problem

1. Multi-Depot Location-Routing Problem
2. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
3. Travelling Salesman Problem
4. Transportation Location Inventory Routing Problem
5. Combined Location-Inventory-Routing Problem
6. Hybrid Heuristic-Combining Tabu Search-Simulated Annealing

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	روش حل			عدم قطعیت	چند محصولی	پنجره زمانی	وسیله نقلیه		مکان یابی		تابع هدف	نوع مسأله	روش حل
			ابتکاری	فرا ابتکاری	همگن				ناهمگن	مسیریابی	RFID	تک هدفه			
۱	Jay M. Nambiar	۱۹۷۹	✓					✓					✓	LAP	LAP
۲	Laporte et al.	۱۹۸۱											✓	LRP	branch and bound
۳	Perl and Mark s. Daskin	۱۹۸۵	✓						✓				✓	LRP	MILP
۴	Tuzun and I. Burke	۱۹۹۸	✓										✓	LRP	Tabu search
۵	Wu et al.	۲۰۰۲	✓					✓					✓	LRP	Simulated annealing
۶	Max Shen et al.	۲۰۰۳				✓							✓	LIP	MILNP
۷	Prins et al.	۲۰۰۶		✓										LRP	GRASP
۸	Lin and Kwok	۲۰۰۶	✓						✓				✓	LRP	Tabu search and simulated annealing
۹	Berger et al.	۲۰۰۷	✓					✓					✓	LRP	Branch-and-price
۱۰	Guerra et al.	۲۰۰۷	✓					✓					✓	LRP	TSP-VRP
۱۱	V. Ukkusuri and F. Yushimito	۲۰۰۸				✓		✓					✓	LRP	LRP
۱۲	Nik Bakhsh and Zagordi	۲۰۱۰	✓				✓	✓					✓	LRP	Or – opt
۱۳	Karaoglan et al.	۲۰۱۱	✓					✓					✓	LRP	Branch-and-Cut
۱۴	Belenguer et al.	۲۰۱۱											✓	LRP	Branch-and-Cut
۱۵	Hamidi and Farahmand	۲۰۱۲		✓										LRP	Tabu GRASP search
۱۶	Escobar et al.	۲۰۱۳	✓										✓	CLRP	Granular tabu search
۱۷	Govindan et al.	۲۰۱۳	✓					✓		✓			✓	LRP	MOPSO AMOVNS
۱۸	liue et al.	۲۰۱۴													Nsga – II
۱۹	sue and kue	۲۰۱۵	✓			✓			✓				✓	VRP	Priority-based heuristic
۲۰	Khalili-Damghani et al.	۲۰۱۵						✓					✓	LRP	Nsga – II
۲۱	Li-ying and Yuan-bin	۲۰۱۵	✓					✓					✓	LRP	Tabu AVNS
۲۲	Rabbani et al.	۲۰۱۶	✓					✓					✓	VRP	GA
۲۳	Hiassat et al.	۲۰۱۷	✓				✓						✓	LIRP	GA
۲۴	Rafie-Majd et al.	۲۰۱۸	✓				✓	✓					✓	ILRP	MINLP
۲۵	Hosni Guderzi et al	۲۰۱۸	✓							✓				MOICA	Nsga-II, PAES
۲۶	Yaghoubi and Akrami	۲۰۱۹	✓										✓	LRP	PSO & ACO
۲۷	Li et al.	۲۰۱۹					✓						✓	LRP	Branch and bound
۲۸	Bakhtdari et al.	۲۰۱۹						✓					✓	LRP	GA, RO
۲۹	Rahbari et al.	۲۰۱۹							✓				✓	VRSP	Metric ۱L
۳۰	Ji et al.	۲۰۲۰						✓					✓	IRP	MIRP
۳۱	Zhao et al.	۲۰۲۰					✓	✓					✓	TRP	ACO
۳۲	Y. P. Tsang et al.	۲۰۲۰							✓				✓	VRP	2PMGAO
۳۳	Manouchehri et al.	۲۰۲۰													

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	روش حل	عدم قطعیت	چند محصولی	تجزیه زمانی	وسیله نقلیه		مکان‌یابی مسیریابی		تابع هدف		نوع مسأله	روش حل
							همگن	ناهمگن	انتقال متقاطع	RFID	تک هدفه	چند هدفه		
۳۵	Shui et al.	۲۰۲۱	✓				✓					✓	VRP	GA
۳۶	Daroudi et al.	۲۰۲۱	✓	✓							✓		LIRP	PESA II nsga II
۳۷	Abbasi et al.	۲۰۲۱						✓					RS	SD
۳۸	V Daz et al.	۲۰۲۱						✓	✓	✓			RFID	RFID
۳۹	Shahabi-Shahmiri et al.	۲۰۲۱	✓		✓			✓	✓		✓		RSP	MILP
۴۰	Liu et al.	۲۰۲۱	✓				✓				✓		LIRP	YALMIP
HLH- NSGA-III														
۴۱	Zabihian-Bisheh et al.	۲۰۲۲	✓	✓	✓	✓						✓	MGCLRP	LTH- NSGA-III
۴۲	Sedaghat et al.	۲۰۲۲	✓			✓						✓	TLIRP	NSGA-III NSGA-II, MOPSO
۴۳	Yu et al.	۲۰۲۲	✓				✓				✓		RLRP, MRLRP	GA, SA
۴۴	Ji, T et al.	۲۰۲۲	✓	✓			✓				✓		CLIRP	HH, TS, SA
۴۵	khalilzadeh et al.	۲۰۲۲	✓	✓			✓				✓		MILP	NSGA-II, MOSFS
۴۶	Eshghi et al.	۲۰۲۲	✓	✓				✓			✓		LAP	NSGA-II
۴۷	Pan et al.	۲۰۲۳	✓		✓			✓			✓		LIRP	GA, MPGA
۴۸	Liang, X et al.	۲۰۲۳	✓				✓				✓		LIRP, LIP	SA
۴۹	Abbasi et al.	۲۰۲۳	✓		✓			✓			✓		LRP	GA, SA
۵۰	De Maio et al.	۲۰۲۳	✓	✓			✓				✓		LRP	Indifference zone
۵۱	Ghasemi et al.	۲۰۲۳	✓		✓		✓				✓		TLRP	NSGA-II
۵۲	Ding et al.	۲۰۲۴							✓				RFID	LCA
۵۳	I.khan et al.	۲۰۲۴							✓				RFID	RFID
۵۴	Komijani et al.	۲۰۲۴	✓		✓						✓		MILP	PSOSA
۵۵	Zijoodi et al.	۲۰۲۵		✓									HLP	Review
۵۶	Farughi et al.	۲۰۲۵		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	LRP	Robust & TH

فناوری RFID و عدم قطعیت در یک مدل چند هدفه، به شکاف موجود در ادبیات تحقیق پاسخ می‌دهد. این شکاف تحقیق اهمیت دارد؛ زیرا مشکلات عدم قطعیت در تقاضا و زمان تحویل می‌تواند به هزینه‌های اضافی، هدررفت مواد و خسارت‌های اقتصادی منجر شود. روش حل ترکیبی بهینه‌سازی استوار و روش تریابی-هسینی از دیگر نوآوری‌های این مطالعه محسوب می‌شود.

۳. شرح مسأله

امروزه مدیریت کارای فعالیت‌های لجستیکی به‌عنوان یک منبع مهم خلق مزیت رقابتی برای سازمان‌ها محسوب می‌شود چون می‌تواند موجب رضایت مشتریان و پاسخ‌گوی نیاز خاص آن‌ها در کوتاه‌ترین زمان با کمترین هزینه و کیفیتی بالا باشد. بنابراین مکان تسهیلات، فاصله بین آن‌ها و سیستم حمل‌ونقل اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. انتخاب نامناسب مراکز توزیع باعث ایجاد مشکلاتی در مسیریابی وسایل نقلیه، حمل‌ونقل و همچنین حجم کار نامتعادل مراکز می‌شود.

همان‌طور که مشخص است تحقیقات به‌عمل آمده تنها به بررسی مسائل به منظور حمل کالا پرداخته و کمتر پژوهشی به بررسی همزمان مسائل فاسدشدنی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و استفاده از انبارهای متقاطع و به‌کارگیری فناوری RFID پرداخته است، در این مقاله این موارد مورد بررسی قرار گرفته و مسأله مکان‌یابی-مسیریابی برای کالاهای فسادپذیر تحت شرایط انبار متقاطع و به‌کارگیری فناوری RFID تحت عدم قطعیت تقاضا و زمان تحویل ارائه شده است. شبکه طراحی شده باید توانایی برآورده کردن تقاضاها و تحویل در کوتاه‌ترین زمان را با توجه به اختلالات موجود داشته باشد. هدف از این تحقیق معرفی و بررسی مسأله مکان‌یابی-مسیریابی برای محصولات فاسدشدنی به منظور مکان‌یابی مناسب انبارهای تحویل، کاهش هزینه‌ها، مسافت حمل و نیز تحویل به‌موقع و با حفظ کیفیت محصولات می‌باشد.

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، پژوهش حاضر با در نظر گیری همزمان معیارهای محصول فاسدشدنی، انبار متقاطع،

موقتی کالا در انبار متقاطع نامحدود است. بنابراین، هر تعداد ممکن از کالاها می‌توانند در انبار نگهداری شوند.

مدل ریاضی این تحقیق براساس کار [۶۴] توسعه یافته است. تفاوت‌های کلیدی عبارتند از:

- دوهدفه بودن: این مدل علاوه بر هزینه، زمان تحویل را نیز بهینه می‌کند که برای کالاها فاسدشدنی حیاتی است.
- مدیریت کالاها فاسدشدنی: محدودیت‌های تاریخ انقضا و زمان تحویل در این مدل گنجانده شده است این توسعه برای صنایع حساس مانند مواد غذایی و دارویی که زمان تحویل نقش حیاتی دارد، کاربرد مستقیم دارد.
- روش استوار مولوی: این روش انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با عدم قطعیت‌های تقاضا و زمان تحویل ارائه می‌دهد و تضمین می‌کند که راه‌حل‌ها حتی در بدترین سناریوها نیز قابل اجرا باشند [۶۱].
- کاربرد عملی در انبارهای متقاطع: مدل پیشنهادی به‌طور خاص برای شبکه‌های دارای انبار متقاطع طراحی شده است. این معماری برای کاهش هزینه‌های ذخیره‌سازی و تسریع در تحویل کالاها بهینه شده است.

در این مدل افق زمانی یک سال و هر سال هم یک دوره زمانی در نظر گرفته شده است. از آنجایی که عدم قطعیت تقاضا تأثیر مهمی بر توزیع دارد، ضروری است که اطلاعات بین وسایل نقلیه و انبار بسیار سریع منتقل شود. برای این منظور، هروسيله نقلیه دارای یک برچسب RFID برای تشخیص زنجیره تأمین است و همچنین دارای ارتباط از راه دور با انبارها است.

۳-۱. مدل‌سازی ریاضی

این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) را برای مکان‌یابی-مسیریابی وسایل نقلیه در حضور کالاها فسادپذیر و انبار متقاطع ارائه می‌دهد. انتخاب MILP به دلیل توانایی آن در مدل‌سازی همزمان تصمیم‌های استراتژیک مکان‌یابی و تصمیم‌های عملیاتی مسیریابی، و نیز امکان در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت، زمان و فسادپذیری کالاها است.

مفروضات مدل:

- این مسأله شامل حمل‌ونقل کالا از تأمین‌کنندگان به مشتریان در یک انبار متقاطع است. لذا ارسال مستقیم از تأمین‌کننده به خرده‌فروش مجاز نیست.
- عدم قطعیت در مقدار تقاضای مشتری و همچنین زمان تحویل تقاضا وجود دارد.
- مدل چندمحصولی است.
- کمبود مجاز نیست.
- تعداد و مکان تسهیلات کاندید از قبل مشخص است.
- کالاها فسادپذیر بوده و تاریخ انقضاء دارند.
- وسایل حمل‌ونقل ناهمگن هستند.
- ظرفیت نگهداری موقتی کالا در انبار متقاطع و تأمین‌کننده

با توجه به اینکه هزینه‌های موجودی به‌طور غیرقابل‌انکاری ارتباط مستقیم با موقعیت و محل قرارگیری تسهیلات دارند، انتخاب نامناسب مکان تسهیلات موجب افزایش هزینه‌های موجودی می‌شود. زمان تحویل کالا هم که به دلیل دوره عمر کوتاه این کالاها مهم‌ترین فاکتور در فرآیند توزیع است، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این پژوهش استفاده از تکنیک انبار متقاطع و فناوری RFID را برای توزیع سریع محصولات تازه و در نتیجه بهبود سطح کیفیت محصولات تحویلی پیشنهاد می‌کند. در مواردی که کیفیت محصولات به‌طور قابل توجهی در طول زمان کاهش می‌یابد و عمر تازگی محصولات بسیار کوتاه است، استفاده از انبار متقاطع و فناوری RFID می‌تواند مزایای بیشتری برای حفظ تازگی اقلام در طول زمان داشته باشد.

مسأله مورد بررسی در این تحقیق از یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل تأمین‌کنندگان، مراکز انبار متقاطع و مشتریان تشکیل شده است. در این مسأله، حمل‌ونقل مستقیم از تأمین‌کننده به خرده‌فروش مجاز نیست و به دلیل وجود انبار متقاطع، کالاها باید ابتدا به انبار منتقل و سپس به مشتریان ارسال شوند. براساس طرح، خودروهای ورودی به انبار می‌رسند و در درب‌های دریافتی مشخص پردازش می‌شوند. محصولات تخلیه شده را می‌توان مستقیماً برای فرآیند بارگیری به منطقه خروجی ارسال کرد یا می‌توان آن‌ها را در منطقه ذخیره‌سازی میانی در انتظار ادغام با سایر سفارش‌های دریافتی ذخیره کرد. در سمت دیگر انبار، منطقه خروجی، سفارشات تلفیقی براساس ترتیب و برنامه مشخص شده توسط طرح بر روی وسایل نقلیه خروجی بارگیری می‌شوند. پس از بارگیری کلیه سفارشات مربوط به یک وسیله نقلیه خروجی، وسیله نقلیه از انبار خارج شده و براساس توالی مسیریابی مشخص شده توسط طرح، از مشتریان بازدید می‌کند. خودروهای خروجی سفارشات را به مشتریان تحویل می‌دهند و در نهایت به انبار باز می‌گردند. همچنین در این مسأله، تقاضای مشتریان قابل پیش‌بینی نیست و زمان تحویل تقاضا به مشتریان نیز متغیر است. زمان‌های تحویل نامشخص به دلایل مختلفی از جمله مشکلات زمان‌بندی و مشکلات کیفیت رخ می‌دهد. این امر باعث می‌شود که برنامه‌ریزی حمل‌ونقل کالا برای تأمین کردن تقاضا و تعادل بین عرضه و تقاضا، چالش برانگیز باشد.

در این مسأله، با یک مدل چندمحصولی سروکار داریم و باید به‌طور هوشمندانه‌ای، تأمین و حمل‌ونقل این محصولات را به منظور برآورده کردن تقاضا و جلوگیری از کمبودها در بازار، برنامه‌ریزی کنیم. کمبود مجاز نیست، یعنی تأمین‌کنندگان باید قادر به تأمین کلیه محصولات مورد نیاز مشتریان باشند. تعداد و مکان تسهیلات بارگیری و تخلیه مشخص است؛ بنابراین برای استفاده بهینه از آن‌ها باید برنامه‌ریزی صورت بگیرد. علاوه بر این، کالاها فسادپذیر و دارای تاریخ انقضاء هستند. لذا باید اطمینان حاصل شود که هر کالای حمل شده در حین رسیدن به مشتریان، همچنان قابل استفاده و فروش باشد، از آنجایی که محصولات دارای برچسب RFID می‌باشند این مشکل برطرف شده است. همچنین وسایل حمل‌ونقل ناهمگن هستند. ظرفیت نگهداری

نامحدود فرض شده‌است. اگر v وسیله نقلیه با استفاده از سیستم $RFID$ باشد f

u_{vf}

۱، در غیر این صورت •

at_{jv} زمان رسیدن وسیله نقلیه v به مشتری j (زمان تحویل)

مدل ریاضی مسأله:

$$\min Z_1 = \alpha \left(\sum_i \sum_l \sum_v C_{il} X_{ilvp} + \sum_l \sum_j \sum_v g_{lj} X'_{ljvp} \right) + \sum_l F_l O_l + \sum_i a_i w_i + \sum_v \sum_f k_{vf} u_{vf} \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_j \sum_v at_{jv} \quad (2)$$

$$\sum_i X_{ilvp} = 1, \quad \forall l, v, p \quad (3)$$

$$\sum_l X'_{ljvp} = 1, \quad \forall j, v, p \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{l \in \eta \\ l \neq i}} X_{ilvp} = \sum_{\substack{l \in \eta \\ l \neq i}} X''_{livp}, \quad \forall i \in n, v, p \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{l \in \eta \\ l \neq l}} X_{ilvp} = \sum_{\substack{l \in \eta \\ l \neq l}} X''_{livp}, \quad \forall l \in n, v, p \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{l \in \eta \\ l \neq j}} X_{ljvp} = \sum_{\substack{l \in \eta \\ l \neq j}} X'_{jlvp}, \quad \forall j \in n, v, p \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_l D_{lp} X_{ilvp} \leq Cap_{vp}, \quad \forall v, p \quad (8)$$

$$\sum_l \sum_j h_{jp} X'_{ljvp} \leq Cap_{vp}, \quad \forall v, p \quad (9)$$

$$\sum_l \sum_p Y_{ilp} \leq M w_i, \quad \forall i \quad (10)$$

$$\sum_j \sum_p Y'_{ljp} \leq M O_l, \quad \forall l \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_l te_{ilp} X_{ilvp} \leq T_{maxf} u_{vf}, \quad \forall v, f, p \quad (12)$$

$$\sum_l \sum_j tr_{ljp} X'_{ljvp} \leq T_{maxf} u_{vf}, \quad \forall v, f, p \quad (13)$$

$$\sum_{i \in s} \sum_{l \in s} X_{ilvp} \leq |s| - 1, \quad \forall s \subseteq l, v, p \quad (14)$$

$$\sum_{l \in s} \sum_{j \in s} X'_{ljvp} \leq |s| - 1, \quad \forall s \subseteq j, v, p \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_l Y_{ilp} = u_{vf}, \quad \forall v, f, p \quad (16)$$

$$\sum_l \sum_j Y'_{ljp} = u_{vf}, \quad \forall v, f, p \quad (17)$$

$$at_{jv} + te_{ilp} X_{ilvp} + tr_{ljp} X'_{ljvp} \leq at_{jv}, \quad \forall i, l, j, p, v \quad (18)$$

$$at_{jv} \leq ex_{jp}, \quad \forall j, p, v \quad (19)$$

$$at_{iv} = 0, \quad \forall i, v \quad (20)$$

تعداد سکوهای بارگیری و تخلیه در هر یک از تسهیلات این پژوهش نامحدود فرض شده‌است. مجموعه‌ها و پارامترها:

i	مجموعه تأمین‌کنندگان
l	مجموعه نقاط کاندید برای احداث انبار متقاطع
j	مجموعه مشتریان
P	مجموعه محصولات
V	مجموعه وسایل نقلیه
n	مجموعه همه گره‌ها
S	یک زیرمجموعه‌ی دلخواه از گره‌ها
f	شاخص نوع سیستم $RFID$
D_{lp}	تقاضای انبار l برای محصول p
h_{jp}	تقاضای غیرقطعی مشتری j برای محصول p
F_l	هزینه احداث انبار متقاطع l
a_i	هزینه احداث تأمین‌کننده i
C_{il}	فاصله بین گره‌های i و l
g_{lj}	فاصله بین گره‌های l و j
k_{vf}	هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه v با سیستم $RFID$
f	ظرفیت وسیله نقلیه v برای محصول p
Cap_{vp}	ظرفیت وسیله نقلیه v برای محصول p
te_{ilp}	زمان سفر بین گره‌های i و l
tr_{ljp}	زمان سفر بین گره‌های l و j
T_{maxf}	حداکثر زمان در دسترس بودن وسایل نقلیه با استفاده از سیستم $RFID$
e_{jp}	تاریخ انقضاء محصول
b	حداکثر تعداد انباری که می‌تواند باز شود
M	یک عدد بزرگ
α	ضریب تبدیل فاصله بر حدود فاصله مجاز

متغیرهای تصمیم‌گیری:

O_l	اگر مرکز l احداث شود ۱، در غیر این صورت ۰
w_i	اگر تأمین‌کننده i احداث شود ۱، در غیر این صورت ۰
X_{ilvp}	اگر وسیله نقلیه v از گره i به گره l سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
X'_{ljvp}	اگر وسیله نقلیه v از گره l به گره j سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
X''_{livp}	اگر وسیله نقلیه v از گره l به گره i سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
X'''_{jlvp}	اگر وسیله نقلیه v از گره j به گره l سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
Y_{ilp}	اگر انبار l به تأمین‌کننده i تخصیص داده شود ۱، در غیر این صورت ۰
Y'_{ljp}	اگر مشتری j به انبار l تخصیص داده شود ۱، در غیر این صورت ۰

(۱) بهینه‌سازی استوار نسبت به رویکرد احتمالی از لحاظ حل مدل راحت‌تر است.

(۲) دانش واضحی از توزیع احتمالی از داده‌های دارای عدم قطعیت نیاز نیست و از داده‌های تاریخی و تجربه‌های تصمیم‌گیرنده می‌توان در بعضی موارد برای استنتاج بازه‌ی دارای عدم قطعیت استفاده کرد.

در این تحقیق از روش استوار مولوی استفاده شده است. روش مولوی اولین بار توسط مولوی و وندربی^۴ (۱۹۹۵) ارائه شد [۶۱]. در این روش، داده‌های ورودی مسئله به صورت مجموعه‌ای از سناریوها که براساس روش برنامه‌ریزی آرمانی فرمول‌بندی شده‌اند، معرفی می‌شوند و جواب‌های به دست آمده استوار می‌باشند. استواری دارای دو مفهوم به صورت زیر است:

استواری در مدل: استواری مدل نسبت شدنی بودن مسئله تحت وقوع هر کدام از سناریوها است. به عبارت دیگر جواب مسئله به ازای هر مقدار از داده‌های ورودی، همچنان شدنی باقی می‌ماند.

استواری در جواب: استواری جواب نسبت بهینگی مسئله تحت وقوع هر کدام از سناریوها است. به عبارت دیگر مقدار تابع هدف به ازای هر مقدار از داده‌های ورودی، نزدیک به مقدار بهینه باشد.

در این تحقیق از روش استوار مولوی [۶۱] برای مدیریت عدم قطعیت در تقاضا و زمان تحویل استفاده شده است. این روش با تعریف سناریوهای مختلف (کاهش/افزایش تقاضا و زمان تحویل) و جریمه کردن نقض محدودیت‌ها، جواب‌هایی مقاوم و قابل اجرا در شرایط واقعی تولید می‌کند. دو مفهوم استواری مدل (حفظ امکان‌پذیری تحت تمام سناریوها) و استواری جواب (حفظ بهینگی تحت تغییرات) پایه این روش هستند. دلیل انتخاب این رویکرد آن است که:

(۱) برخلاف مدل‌های احتمالاتی، نیازی به دانستن توزیع احتمالی داده‌ها ندارد.

(۲) قابلیت ارائه راه‌حل‌های شدنی و قابل اطمینان حتی در بدترین سناریوها را دارد.

(۳) سادگی پیاده‌سازی و انعطاف‌پذیری بالایی در مواجهه با داده‌های دنیای واقعی دارد.

در این روش، به منظور حداقل کردن تابع هدف، واریانس تغییرات تابع سود سناریوهای مختلف اضافه می‌شود، به این دلیل که بالا بودن میزان واریانس نشان‌دهنده حساس بودن خروجی مسئله نسبت به ورودی‌های آن می‌باشد. در این نوع بهینه‌سازی جنس داده‌ها از نوع سناریو می‌باشد. مولوی و همکارانش مدل بهینگی استوار را با در نظر گرفتن تحلیل هزینه فایده بین استواری راه‌حل و استواری مدل ارائه می‌دهند. بهینه‌سازی استوار شامل دو محدودیت متفاوت است محدودیت کنترل و محدودیت ساختاری. محدودیت‌های کنترل تحت تأثیر داده‌های ورودی هستند درحالی‌که محدودیت‌های ساختاری

$$\sum_l O_l \leq b. \quad (21)$$

$$X_{ilvp} \leq w_i. \quad \forall i, l, v, p \quad (22)$$

$$X'_{ljvp} \leq O_{cd}. \quad \forall j, l, v, p \quad (23)$$

$$O_l, w_i, X_{ilvp}, X'_{ljvp}, X''_{livp}, X'''_{ljvp}, Y_{ilp}, Y'_{ljp}, u_{vf} \in \{0,1\}. \quad (24)$$

$$at_{jv} \geq 0. \quad \forall j, v \quad (25)$$

تابع هدف (۱) هزینه‌های شبکه را به حداقل می‌رساند. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های سفر وسایل نقلیه، برقراری انبار و تأمین‌کننده و استفاده از وسایل نقلیه می‌باشد. تابع هدف (۲) مجموع زمان تحویل را کاهش می‌دهد. محدودیت‌های (۳) و (۴) به ترتیب لزوم وجود ارتباط انبار با تمام تأمین‌کنندگان و مشتریان را نشان می‌دهند. محدودیت‌های (۵) و (۶) و (۷) (تبادل جریان) نشان می‌دهند که جریان‌های داخلی برای همه گره‌ها در داخل شبکه برابر با جریان‌های خارجی می‌باشد. محدودیت‌های (۸) و (۹) مربوط به ظرفیت وسیله نقلیه می‌باشند. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد که هر انبار فقط در صورتی به یک تأمین‌کننده اختصاص داده می‌شود که تأمین‌کننده مربوطه قبلاً تأسیس شده باشد. به همین ترتیب محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد که هر مشتری فقط در صورتی به یک انبار اختصاص داده می‌شود که انبار مربوطه قبلاً تأسیس شده باشد. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به در نظر گرفتن حداکثر زمان استفاده قابل قبول وسایل نقلیه مربوط هستند. در این محدودیت‌ها سیستم RFID انتخابی برای هر نوع وسیله نقلیه می‌تواند زمان استفاده هر وسیله نقلیه را تحت تأثیر قرار دهد. محدودیت‌های (۱۴) و (۱۵) محدودیت‌های حذف زیرتور می‌باشند. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که تمامی وسایل نقلیه برای انتقال بار از تأمین‌کننده به انبار استفاده می‌شوند. محدودیت (۱۷) نیز تضمین می‌کند که تمامی وسایل نقلیه برای انتقال بار از انبار به مشتری استفاده می‌شوند. محدودیت‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) نشان می‌دهند که زمان تحویل محصول p از انبار l به مشتری j توسط وسیله نقلیه v باید قبل از تاریخ انقضاء محصول باشد. محدودیت (۲۱) حداکثر تعداد انباری که می‌تواند باز شود را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) تضمین می‌کنند که انتقال کالا از تأمین‌کننده به انبار و از انبار به مشتری تنها زمانی امکان‌پذیر است که آن مرکز باز باشد. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) ماهیت متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

۳-۲. روش استوار مولوی^۱

در برنامه‌ریزی ریاضی معمولاً مسائل با پیش فرض قطعی بودن داده‌ها حل می‌شوند؛ در حالی‌که در دنیای واقعی بیشتر داده‌ها دارای عدم قطعیت هستند. رویکرد استوار برای حل مسائل بهینه‌سازی با عدم قطعیت داده‌ها در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ پیشنهاد شد. دو محقق به نام‌های داگلاس خوزه الم^۲ و رینالدو مورابیتو^۳ دو دلیل را برای استفاده از بهینه‌سازی استوار ذکر کردند:

3. Reynaldo Murabito

4. Vanderbei

1. Mulvey

2. Douglas Jose Alma

وجود دارد که این محاسبات را دشوار می‌کند. یو و لی^۱ به جای عبارت درجه دوم از یک عبارت قدر مطلق استفاده کردند که در زیر نشان داده شده است:

$$\sigma(0) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} |\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'}| \quad (29)$$

برای حداقل کردن عبارت یو و لی (۲۰۰۰) روشی کارآمد ارائه کرده‌اند. این روش را ابتدا لی (۱۹۹۶) ارائه داده است که فرمولاسیون‌های متعددی برای حل مسائل برنامه‌ریزی ارائه کرده است. چارچوب مدل یو و لی برای به حداقل رساندن تابع هدف در زیر آورده شده است.

$$\min \sigma(0) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} [(\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'}) + 2\vartheta_{\theta}] \quad (30)$$

$$\text{s.t.} \quad \xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'} + \vartheta_{\theta} \geq 0 \quad \forall \theta \in \Omega$$

متغیر ϑ_{θ} برای تبدیل عبارت قدرمطلق در تابع هدف به عبارت خطی است. دومین عبارت در تابع هدف تابع جریمه‌ی عملی نبودن است که برای جریمه کردن تخطی از محدودیت‌های کنترل تعدادی از سناریوها استفاده می‌شود تا از نقض شدن محدودیت‌ها در سناریوها جلوگیری و استواری مدل را تضمین کند. تخطی از محدودیت‌های کنترل بدین معناست که راه‌حل‌های غیرعملی برای یک مسئله در شرایط برخی از سناریوها به دست آمده است [۶۱]. ضریب ω نیز برای ارتباط بین استواری جواب و استواری مدل به کار می‌رود و مقدار آن را تصمیم‌گیر و مدل‌ساز تعیین می‌کند؛ بنابراین مدل نهایی به شکل زیر می‌باشد.

$$\min \sigma(0) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} [(\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'}) + 2\vartheta_{\theta}] + \omega \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \delta_{\theta}^T \delta_{\theta} \quad (31)$$

۳-۳. استوارسازی مدل مسئله

مجموعه‌ها و پارامترها:

تقاضای غیرقطعی مشتری j برای محصول p تحت سناریوی θ	$h_{jp\theta}$
ظرفیت وسیله نقلیه v برای محصول p در سناریوی θ	$Cap_{vp\theta}$
زمان سفر بین گره‌های i و l تحت سناریوی θ	$te_{ilp\theta}$
زمان سفر بین گره‌های l و j تحت سناریوی θ	$tr_{ljp\theta}$
حداکثر زمان در دسترس بودن وسایل نقلیه با استفاده از سیستم RFID تحت سناریوی θ	$T_{maxf\theta}$
تاریخ انقضاء محصول در سناریوی θ	$e_{jp\theta}$
احتمال رخداد هر سناریو	π_{θ}

به دنبال مفهوم برنامه‌ریزی خطی بوده و داده‌های ورودی آن‌ها بدون هرگونه تغییری می‌باشد. فرم کلی مدل استوار به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \min \quad & C^T x + d^T y \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & Bx + Cy = e \\ & x, y \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

در این مدل $x \in R^{n_1}$ برداری از متغیرهای طراحی و $y \in R^{n_2}$ برداری از متغیرهای کنترل است. محدودیت $Ax = b$ محدودیت ساختاری و ضرایب آن ثابت و بدون تغییر است؛ در حالی که معادله‌ی $Bx + Cy = e$ محدودیت کنترلی است و ضرایب آن در معرض تغییر قرار دارند. محدودیت $x, y \geq 0$ غیرمنفی بودن بردارها را برآورده می‌کند. مجموعه سناریوها عبارت است از $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$. در شرایط هر سناریو $\theta \in \Omega$ ضرایب مرتبط با محدودیت‌های کنترل با احتمال ثابت π_{θ} (که نشان‌دهنده‌ی احتمالی است که سناریو θ اتفاق می‌افتد و $\sum_{\theta=1}^N \pi_{\theta} = 1$ به $\{d_{\theta}, B_{\theta}, C_{\theta}, e_{\theta}\}$ تبدیل خواهد شد.

احتمال بسیار کمی وجود دارد که هر پاسخ به دست آمده از مدل بالا برای کلیه‌ی سناریوها عملی و موجه باشد؛ بنابراین لازم است مقداری برای تبادل میان پایداری مدل و پاسخ، در نظر گرفته شود. در مدل پیشنهادی مولوی امکان این تبادل منظور شده است. بردار δ_{θ} غیرعملی بودن مجاز را در محدودیت‌های کنترلی، در شرایط سناریوی θ اندازه‌گیری می‌کند. سپس، یک مدل بهینه‌سازی استوار براساس مسئله برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده‌ی بالا به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sigma(x, y_1, \dots, y_{\theta}) + \omega \rho(\delta_1, \dots, \delta_{\theta}) \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & B_{\theta} x + C_{\theta} y_{\theta} + \delta_{\theta} = e \quad \forall \theta \in \Omega \\ & x \geq 0, y_{\theta} \geq 0 \quad \forall \theta \in \Omega \end{aligned} \quad (27)$$

نخستین عبارت تابع هدف استواری جواب و عبارت دوم استواری مدل را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن چندین سناریوی مختلف، تابع هدف $\xi = C^T x + d^T y$ ، به یک متغیر تصادفی تبدیل می‌شود که در شرایط سناریو $\theta \in \Omega$ با احتمال π_{θ} دارای ارزشی معادل $\xi_{\theta} = C^T x + d_{\theta}^T y_{\theta}$ می‌شود؛ بنابراین، دیگر یک گزینه برای تابع هدف وجود ندارد. در فرمول برنامه‌ریزی خطی تصادفی مقدار متوسط $\sigma(0) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta}$ استفاده شده است. برای دستیابی به یک جواب نزدیک به بهینه‌ی استوار، می‌توان عبارت نخست تابع هدف را به امید ریاضی و واریانس تبدیل کرد. به عبارت دیگر می‌توان مقدار موردانتظار تابع هدف را در یک سناریو بهینه کرد و با حداقل کردن واریانس تابع هدف در سناریوهای مختلف، درجه‌ی ریسک مدل را کم کرد تا جواب به دست آمده استوار باشد. در این صورت می‌توان آن را به شکل زیر به امید ریاضی و واریانس تبدیل کرد.

$$\sigma(0) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} (\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'})^2 \quad (28)$$

در رابطه‌ی فوق λ درجه‌ی ریسک‌پذیری مدل‌ساز را نشان می‌دهد. هرچه λ افزایش یابد راه‌حل نسبت به تغییرات داده‌ها در شرایط همه‌ی سناریوها کمتر حساس است. یک عبارت درجه‌ی دو در محدودیت

$\sum_{\substack{l \in n \\ l \neq i}} X_{ilvp\theta} = \sum_{\substack{l \in n \\ l \neq i}} X'_{ilvp\theta} \cdot \quad \forall i \in n.v.p.\theta \quad (37)$	متغیرهای تصمیم‌گیری:
$\sum_{\substack{l \in n \\ l \neq l}} X_{ilvp\theta} = \sum_{\substack{l \in n \\ l \neq l}} X'_{ilvp\theta} \cdot \quad \forall l \in n.v.p.\theta \quad (38)$	اگر وسیله نقلیه v تحت سناریوی θ از گره i به گره l سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
$\sum_{\substack{l \in n \\ l \neq j}} X_{ljvp\theta} = \sum_{\substack{l \in n \\ l \neq j}} X'_{ljvp\theta} \cdot \quad \forall j \in n.v.p.\theta \quad (39)$	اگر وسیله نقلیه v تحت سناریوی θ از گره l به گره j سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
$\sum_i \sum_l D_{lp} X_{ilvp\theta} \leq Cap_{vp\theta} \cdot \quad \forall v.p.\theta \quad (40)$	اگر وسیله نقلیه v تحت سناریوی θ از گره l به گره i سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
$\sum_l \sum_j h_{jp\theta} X'_{ljvp\theta} \leq Cap_{vp\theta} + \delta_{1jp\theta} \cdot \quad \forall v.p.\theta \quad (41)$	اگر وسیله نقلیه v تحت سناریوی θ از گره j به گره l سفر کند ۱، در غیر این صورت ۰
$\sum_l \sum_p Y_{ilp} \leq Mw_i \cdot \quad \forall i \quad (42)$	اگر $RFID$ باشد ۱، در غیر این صورت ۰
$\sum_j \sum_p Y'_{lj p} \leq MO_l \cdot \quad \forall l \quad (43)$	زمان رسیدن وسیله نقلیه v به مشتری j (زمان تحویل) تحت سناریوی θ
$\sum_i \sum_l te_{ilp\theta} X_{ilvp\theta} \leq T_{max f\theta} u_{vf\theta} \cdot \quad \forall v.f.p.\theta \quad (44)$	میزان نشدنی بودن محدودیت کنترل تقاضا در سناریوی θ
$\sum_l \sum_j tr_{lj p\theta} X'_{ljvp\theta} \leq T_{max f\theta} u_{vf\theta} \cdot \quad \forall v.f.p.\theta \quad (45)$	میزان نشدنی بودن محدودیت کنترل زمان تحویل در سناریوی θ
$\sum_{i \in s} \sum_{l \in s} X_{ilvp\theta} \leq s - 1 \cdot \quad \forall s \subseteq l.v.p.\theta \quad (46)$	$\min Z_1 = \alpha (\sum_i \sum_l \sum_v C_{il} X_{ilvp\theta} + \sum_l \sum_j \sum_v g_{lj} X'_{ljvp\theta}) + \sum_l F_l O_l + \sum_i a_i w_i + \sum_v \sum_f k_{vf} u_{vf\theta}$
$\sum_{i \in s} \sum_{j \in s} X'_{ljvp\theta} \leq s - 1 \cdot \quad \forall s \subseteq j.v.p.\theta \quad (47)$	(32)
$\sum_i \sum_l Y_{ilp\theta} = \sum_v \cdot \sum_f u_{vf\theta} \cdot \quad \forall p \quad (48)$	$Z_{2\theta} = \sum_j \sum_v at_{jv\theta}$
$\sum_l \sum_j Y'_{lj p\theta} = \sum_v \cdot \sum_f u_{vf\theta} \cdot \quad \forall p \quad (49)$	$\min Z'_{2\theta} = \sum_{\theta} \pi_{\theta} (\sum_j \sum_v at_{jv\theta}) + \lambda \sum_{\theta} \pi_{\theta} [(\sum_j \sum_v at_{jv\theta}) - \sum_{\theta'} \pi_{\theta'} (\sum_j \sum_v at_{jv\theta'}) + 2\vartheta_{\theta}] + \omega \sum_{\theta} \pi_{\theta} (\sum_j \sum_v \delta_{2jv\theta})$
$at_{iv\theta} + te_{ilp\theta} X_{ilvp\theta} + tr_{lj p\theta} X'_{ljvp\theta} \leq at_{jv\theta} + \delta_{2jv\theta} \cdot \quad \forall i.l.j.p.v.\theta \quad (50)$	(33)
$at_{jv\theta} + \delta_{2jv\theta} \leq e_{jp\theta} \cdot \quad \forall j.p.v.\theta \quad (51)$	$\sum_j \sum_v at_{jv\theta} - \sum_{\theta'} \pi_{\theta'} (\sum_j \sum_v at_{jv\theta'}) + \vartheta_{2\theta} \geq 0 \cdot \quad \vartheta_{2\theta} \geq 0 \cdot \quad \forall \theta \in \Omega \quad (34)$
$at_{iv} = 0 \cdot \quad \forall i.v \quad (52)$	$\sum_i X_{ilvp\theta} = 1 \cdot \quad \forall l.v.p.\theta \quad (35)$
$\sum_l O_l \leq b \cdot \quad (53)$	$\sum_l X'_{ljvp\theta} = 1 \cdot \quad \forall j.v.p.\theta \quad (36)$
$X_{ilvp\theta} \leq w_i \cdot \quad \forall i.l.v.p.\theta \quad (54)$	
$X'_{ljvp\theta} \leq O_l \cdot \quad \forall j.l.v.p.\theta \quad (55)$	
$O_l \cdot w_i \cdot X_{ilvp\theta} \cdot X'_{ljvp\theta} \cdot X'_{ilvp\theta} \cdot X'_{ljvp\theta} \cdot Y_{ilp} \cdot Y'_{lj p} \cdot u_{vf\theta} \cdot \in \{0.1\} \cdot \quad \forall i.l.j.v.p.\theta \quad (56)$	
$at_{jv\theta} \cdot \delta_{2jv\theta} \cdot \delta_{1jp\theta} \geq 0 \cdot \quad \forall j.p.v.\theta \quad (57)$	

۴-۳. روش ترابی - هسینی^۱

این روش در سال ۲۰۰۸ توسط ترابی و هسینی ارائه گردید که یک روش جدید برای حل مسائل چند هدفه می‌باشد. برای استفاده از این

هشتم بررسی شده است همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌کنید در این مسأله از ۳ انبار بالقوه هر ۳ انبار و از ۴ تأمین‌کننده تنها ۲ مرکز آن تأسیس شده‌اند که نشان دهنده کارایی مدل در انتخاب گزینه‌های بهینه است.

جدول (۲). اندازه مسائل

شماره مسأله	تعداد سناریوها	وسایل نقلیه	محصولات	مشتریان	انبار متقاطع	تأمین‌کنندگان
۱	۵	۲	۲	۲	۱	۲
۲	۵	۳	۳	۳	۲	۲
۳	۵	۳	۳	۳	۲	۳
۴	۵	۳	۳	۴	۲	۳
۵	۵	۳	۳	۵	۳	۳
۶	۵	۴	۴	۶	۳	۴
۷	۵	۴	۵	۷	۳	۴
۸	۵	۴	۵	۸	۳	۴

جدول (۳). اطلاعات عددی پارامترها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
D_{lp}	Uniform (۳۰,۶۰) kg	Cap_{vp}	Uniform (۳۰۰۰,۵۰۰۰) kg
h_{jp}	Uniform (۳۰,۵۰) kg	te_{ilp}	Uniform (۱,۲) hour
F_l	۱۰۰۰۰۰\$	tr_{ljp}	Uniform (۱.۱۵,۱.۴۵) h
FC'_i	۵۰۰۰۰\$	T_{maxf}	۲۰h
C_{il}	Uniform (۳۰,۷۰) km	e_{jp}	Uniform (۵,۱۰) day
g_{lj}	Uniform (۳۵,۷۰) km	B	۴
k_{vf}	۱۰۸۰	α	۱۰
λ	۵.۹	ω	۲۸

جدول (۴). تخصیص محصولات به انبار و تأمین‌کننده

تأمین‌کننده ۱							تأمین‌کننده ۲
تعداد محصولات							
انبار ۱	انبار ۲	انبار ۳	انبار ۱	انبار ۲	انبار ۳	انبار ۱	انبار ۲
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

با توجه به جدول (۴) تأمین‌کنندگان ۱ و ۲ به هر ۳ انبار تخصیص یافته‌اند، به‌عنوان مثال تأمین‌کننده ۱ به انبار یک برای هر ۵ نوع محصول تخصیص پیدا کرده است که حاکی از انعطاف‌پذیری مدل در توزیع محصولات است.

۴-۱. پارامتر غیرقطعی تقاضا

سناریوهای مربوط به پارامتر تقاضای محصول توسط مشتری به‌صورت زیر در جدول (۵) در نظر گرفته شده‌است. سناریو ۱: تقاضا ۲۰٪ از میانگین مقدار پیش‌بینی شده کمتر است.

روش، علاوه‌بر کسب بهترین مقدار هر تابع هدف از روش بهینه‌سازی انفرادی، نیاز به بدترین مقدار هر تابع هدف نیز می‌باشد. هدف این روش کمینه کردن فاصله بین توابع هدف از مقدار ایده‌آلشان است. مراحل این روش به‌صورت زیر می‌باشد:

مرحله ۱. به‌دست آوردن بهترین و بدترین مقدار هر تابع هدف

$$f_p^{NIS} = f_p(x_g^{PIS}). \quad \forall g.p \quad g \neq p \quad (58)$$

مرحله ۲. تعیین یک تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف

$$\mu_{p(x)} = \begin{cases} 1 & \text{if } f_p < f_p^{PIS} \\ \frac{f_p - f_p^{PIS}}{f_p^{NIS} - f_p^{PIS}} & \text{if } f_p^{PIS} \leq f_p \leq f_p^{NIS} \\ 0 & \text{if } f_p > f_p^{NIS} \end{cases} \quad \forall p \quad (59)$$

مرحله ۳. استفاده از رابطه زیر برای یکپارچه کردن توابع هدف

$$\text{Min } \vartheta(x) = \varphi \vartheta_o + (1 - \varphi) \sum_{p=1}^P w_p \mu_p(x) \quad (60)$$

s.t.

$$\vartheta_o \leq \mu_p(x). \quad \forall p$$

$$x \in F(x). \quad \vartheta_o \text{ and } \vartheta \in [0,1]$$

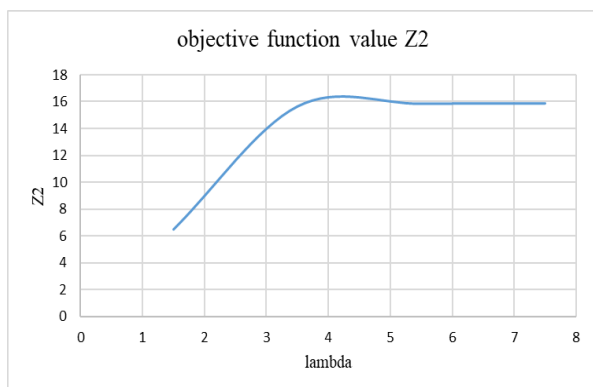
w_p اهمیت نسبی و φ برابر با ضریب جبران توابع هدف و μ نشان‌دهنده درجه اثربخشی p امین تابع هدف می‌باشد و مجموع اوزان توابع هدف نیز بایستی برابر یک گردد. پارامترهای w_p توسط تصمیم‌گیرنده و براساس ترجیحات او تعیین می‌شود به‌طوری‌که $\sum_p w_p = 1$ و $w_p > 0$. همچنین میزان سازش بین اهداف را به‌طور ضمنی کنترل می‌کند. به این معنا که فرمول پیشنهادی می‌تواند راه‌حل‌های نامتعادل و متوازن را برای یک مثال معین براساس ترجیحات تصمیم‌گیرنده از طریق تنظیم مقدار پارامتر ارائه دهد.

این روش به‌دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری در تعیین اولویت‌ها و سازگاری با بهینه‌سازی استوار، انتخاب شده است. با تبدیل اهداف چندگانه به یک تابع ترکیبی خطی، مدل قادر است تعادل عملی بین هزینه و زمان تحویل را باکمترین پیچیدگی محاسباتی فراهم کند و نسبت به روش‌های دیگر (مانند E-محدودیت) ساده‌تر و قابل درک‌تر است.

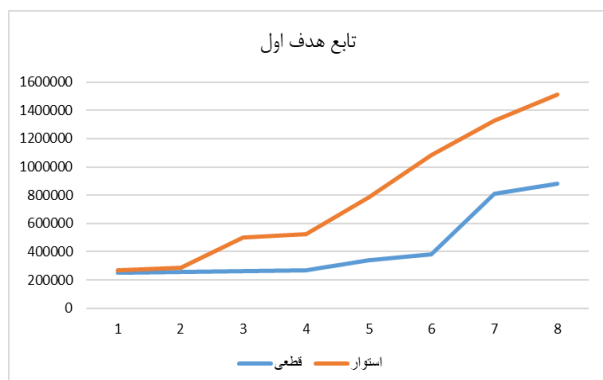
۴. حل مسأله

این مدل در نرم‌افزار GAMS کدگذاری و برای ۸ مسأله که اندازه آن در جدول (۲) ارائه شده به‌صورت تصادفی اجرا شده است. مقادیر پارامترهای ورودی به‌طور ثابت و تصادفی نزدیک به مقادیر موجود در دنیای واقعی با توزیع ثابت و یکنواخت که در جدول (۲) ارائه شده است، تولید می‌شوند. نتایج به‌دست آمده از مدل قطعی و قوی که به‌طور بهینه با حل‌کننده BARON حل شده‌اند در جداول (۸) تا (۱۱) آورده شده است.

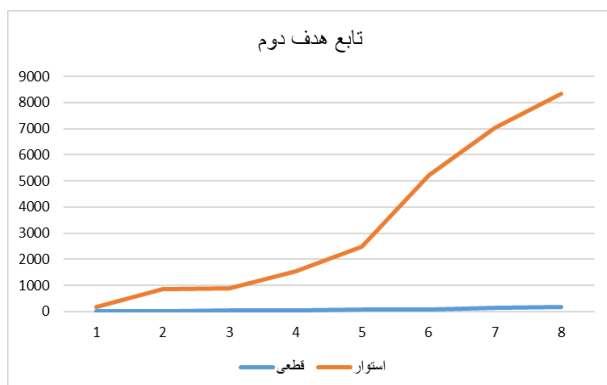
به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده متغیرهای مسأله برای مسأله



شکل (۳). آنالیز حساسیت ضریب استواری راه حل



شکل (۴). نمودار مقادیر تابع هدف اول در دو حالت قطعی و استوار



شکل (۵). نمودار مقادیر تابع هدف دوم در دو حالت قطعی و استوار

نمودار مربوط به مقادیر توابع هدف در دو حالت قطعی و استوار در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. برای هر مسئله مقادیر تابع هدف اول و دوم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر مسئله مقدار تابع هدف اول در حالت قطعی کمتر از حالت غیرقطعی می‌باشد. این نشان می‌دهد که در حالت قطعی تابع هدف با توجه به مینیمم بودن آن مقدار کمتری می‌گیرد. مقدار تابع هدف دوم نیز در دو حالت قطعی و استوار در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که حالت استوار تابع هدف روال افزایشی داشته که نشان‌دهنده بهتر بودن جواب در حالت قطعی نسبت به استوار می‌باشد. جواب‌های استوار به دلیل در نظر گرفتن بدترین حالت‌های ممکن (سناریوهای با تقاضای بالا و زمان تحویل طولانی)، هزینه و زمان بالاتری دارند. این رویکرد تضمین می‌کند که مدل در

سناریو ۲: تقاضا ۵٪ از میانگین مقدار پیش‌بینی شده کمتر است.

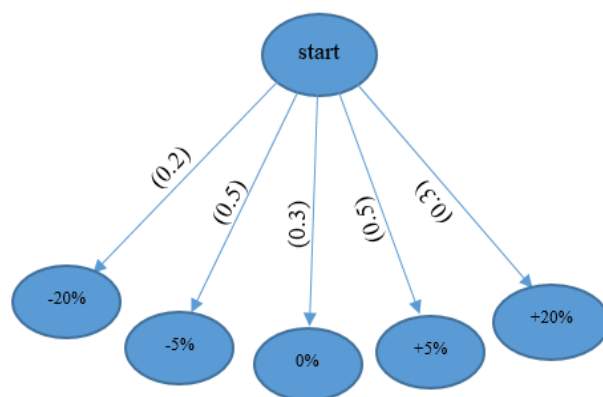
سناریو ۳: میانگین تقاضای پیش‌بینی شده

سناریو ۴: تقاضا ۵٪ از میانگین مقدار پیش‌بینی شده بیشتر است.

سناریو ۵: تقاضا ۲۰٪ از میانگین مقدار پیش‌بینی شده بیشتر است.

جدول (۵). سناریوهای تقاضای مسئله

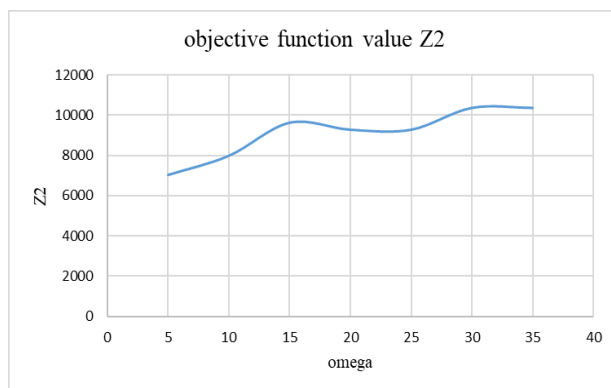
سناریو	پارامتر تقاضا	احتمال رخداد
۱	$D'_{jp\theta} = (1 - 0.20)D'_{jp\theta=3}$	۰/۲
۲	$D'_{jp\theta} = (1 - 0.05)D'_{jp\theta=3}$	۰/۵
۳	$D'_{jp\theta=3} = 50$	۰/۳
۴	$D'_{jp\theta} = (1 + 0.05)D'_{jp\theta=3}$	۰/۵
۵	$D'_{jp\theta} = (1 + 0.20)D'_{jp\theta=3}$	۰/۳



شکل (۱). درخت سناریو

درخت سناریو در شکل (۱) نشان‌دهنده پنج سناریوی مختلف برای تقاضا و زمان تحویل است. هر شاخه با احتمالات مربوطه (۰/۲، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۳) وزن‌دهی شده است. این سناریوها طیف وسیعی از شرایط ممکن را پوشش می‌دهند تا مدل در برابر عدم قطعیت مقاوم باشد.

نتایج برای هشت مسئله آزمایشی با مقایسه مدل مسئله در دو حالت قطعی و غیرقطعی در جدول (۱۲) ارائه شده است. با توجه به مقادیر تابع هدف راه‌حل مدل با در نظر گرفتن ω ، ۲۸ و $\frac{1}{9}$ ، ۵/۹ تحلیل می‌شود. نتایج محاسباتی در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است.



شکل (۲). آنالیز حساسیت ضریب استواری مدل

سناریوهای ۱ و ۲ با توجه به در نظر گرفتن کاهش تقاضا نسبت به مقدار پیش‌بینی شده، انتظار می‌رود که با کاهش تقاضا هزینه‌ها و زمان تحویل نیز کاهش یابد؛ زیرا با کم شدن میزان تقاضا، هزینه‌های مربوط به حمل و نقل بین نقاط کاهش یافته و در نتیجه منجر به کاهش تابع هزینه کل و زمان تحویل می‌گردد. در سناریوی ۳ میانگین تقاضا در نظر گرفته شده است و نشان‌دهنده متوسط تقاضا می‌باشد و در نهایت در سناریوی ۴ و ۵ با توجه به میزان افزایشی که نسبت به مقدار پیش‌بینی شده در نظر گرفته شده، همان‌طور که در جدول (۷) نشان داده شده است افزایش هزینه و زمان تحویل را داریم. همان‌طور که مشخص است تقاضا تأثیر مستقیمی بر هزینه و زمان تحویل دارد.

جدول (۷). تحلیل تقاضا و زمان تحویل

احتمال سناریو	تقاضا	هزینه	زمان تحویل
۱	$D'_{jp\theta} = (1 - 0.20)D_{jp\theta=3}$	۴۶۰۸۶۵/۹۶۸	۷۲/۷۸۶
۲	$D'_{jp\theta} = (1 - 0.05)D_{jp\theta=3}$	۴۶۱۷۵۷/۴۵۷	۸۷/۷۶۱
۳	$D'_{jp\theta=3} = 50$	۴۶۲۰۱۲/۱۶۸	۱۱۶/۵۹۲
۴	$D'_{jp\theta} = (1 + 0.05)D_{jp\theta=3}$	۴۶۲۰۱۲/۳۵۸	۲۱۷/۴۵۳
۵	$D'_{jp\theta} = (1 + 0.20)D_{jp\theta=3}$	۴۶۲۷۴۵/۲۶۶	۳۱۱/۳۰۶

نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده برتری مدل استوار مولوی در بررسی پارامترهای دارای عدم قطعیت و استواری راه‌حل به‌دست آمده در مقایسه با مدل قطعی می‌باشد. در این مدل، مشکلاتی که در مسائل غیرقطعی باعث به‌وجود آمدن جواب‌های نشدنی می‌شود وجود نداشته و قابل پیاده‌سازی برای مسائل واقعی می‌باشد. از این جهت پیاده‌سازی جواب مدل‌های استوار دارای ریسک به‌مراتب پایین‌تری نسبت به مدل‌های قطعی می‌باشد. همچنین با افزایش سطح عدم قطعیت نیز جواب‌های حاصل بدتر می‌شود.

تحلیل حساسیت با تغییر پارامترهای کلیدی مانند تقاضا و زمان تحویل انجام شد. نتایج نشان داد که مدل در تمام سناریوها پایدار است و تغییرات کمتر از ۱۰٪ در توابع هدف دارد. برای مسائل بزرگ‌تر، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند NSGA-II در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

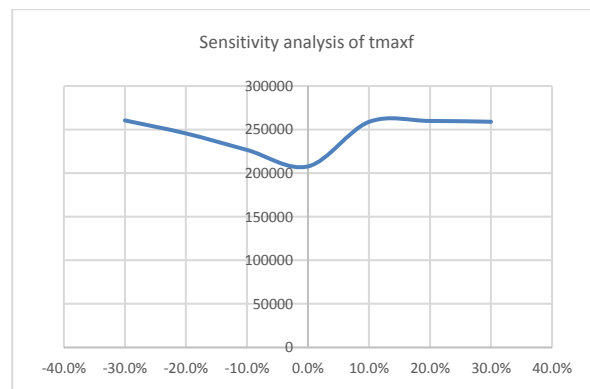
در ادامه شکل نمودار جواب‌های پارتو حاصل از حل مسأله در حالت‌های قطعی و غیرقطعی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش هزینه‌ها کاهش زمان تحویل را داریم.

شکل‌های (۷) تا (۱۴) جبهه پارتو حاصل از حل مدل در حالت قطعی و شکل‌های (۱۵) تا (۲۲) جبهه پارتو حاصل از حل مدل در حالت غیرقطعی می‌باشد.

شرایط واقعی که عدم قطعیت وجود دارد، همچنان قابل اجرا و بهینه باشد.

۴-۲. تحلیل حساسیت حداکثر زمان در دسترس بودن وسایل نقلیه

همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود مقادیر تابع هدف به‌طور قابل توجهی با تغییر حداکثر زمان در دسترس برای وسایل نقلیه تغییر می‌کند. هرچه زمان در دسترس بودن وسایل نقلیه را کاهش دهیم تابع هدف افزایش پیدا می‌کند. در واقع به این دلیل است که با کاهش زمان در دسترس بودن، باید از وسیله نقلیه بیشتری استفاده کرد.



شکل (۶). نمودار حداکثر زمان در دسترس بودن وسایل نقلیه

۴-۳. تحلیل حساسیت RFID

تحلیل نتایج (جدول (۶)) نشان می‌دهد سیستم RFID در مدل قطعی موجب کاهش ۳۸/۲٪ زمان تحویل می‌شود، اما در مدل استوار منجر به افزایش زمان همراه با رشد هزینه می‌گردد. این یافته‌ها حاکی از آن است که:

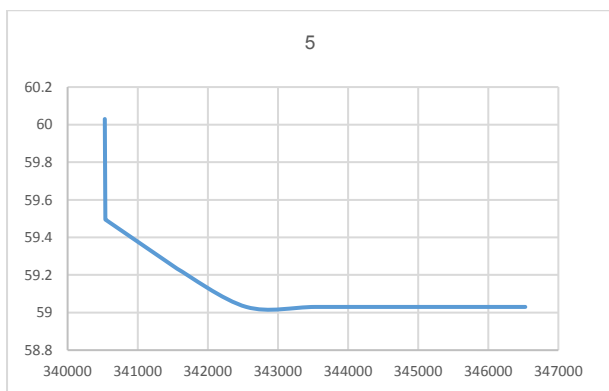
- (۱) RFID در محیط‌های قطعی می‌تواند کارایی سیستم را بهبود بخشد.
- (۲) در شرایط عدم قطعیت، پیاده‌سازی RFID بدون بهینه‌سازی مکانیزم‌های کنترلی ممکن است نتایج معکوس داشته باشد.
- (۳) استفاده از این فناوری در مدل‌های استوار نیازمند مطالعات هزینه-فایده دقیق‌تر است.

جدول (۶). تحلیل RFID

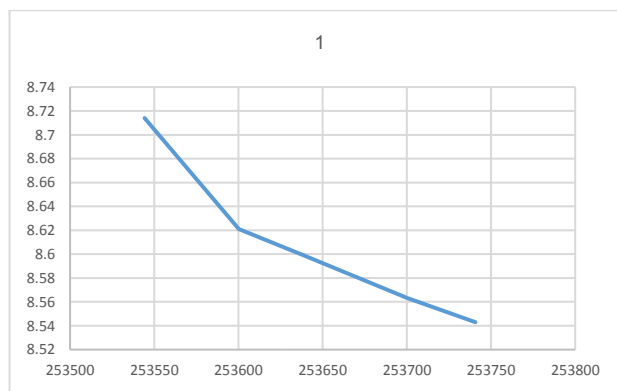
مدل	Z_1	Z_2
قطعی بدون RFID	۱۹۴/۲۵۱	۹۷/۰۶
استوار بدون RFID	۱۹۴/۷۹۱	۱۱۵۹/۷۵
قطعی با RFID	۳۴۰/۵۳۰	۶۰/۰۳
استوار با RFID	۷۸۴/۱۶۰	۲۴۸۳/۲۸

۴-۴. تحلیل حساسیت تقاضا و زمان تحویل

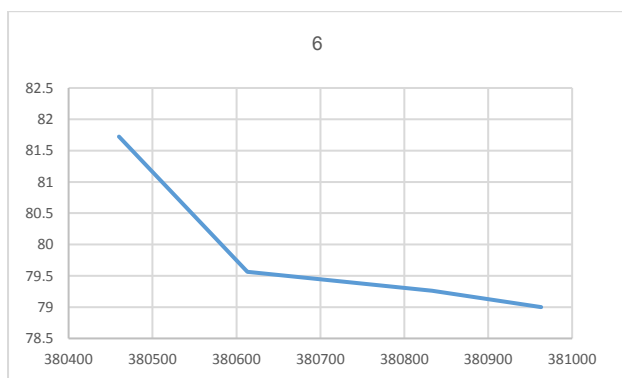
در این قسمت یک نمونه از مسأله را به منظور تعیین نقش سناریوهای تقاضا بر هزینه و زمان تحویل مورد بررسی قرار داده‌ایم (جدول (۷)).



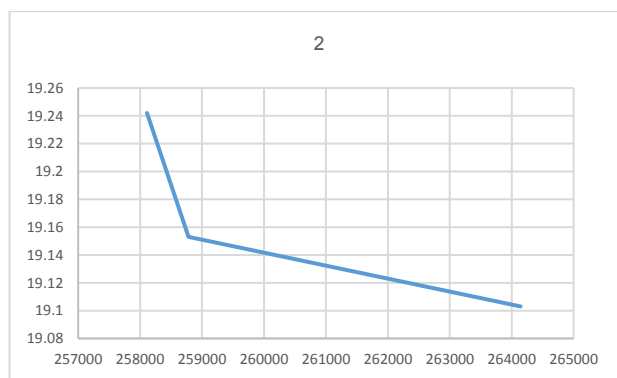
شکل (۱۱). جبهه پارتو مسأله ۵ (قطعی)



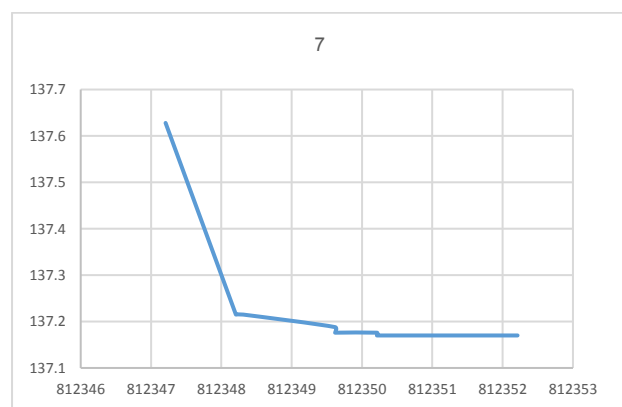
شکل (۷). جبهه پارتو مسأله ۱ (قطعی)



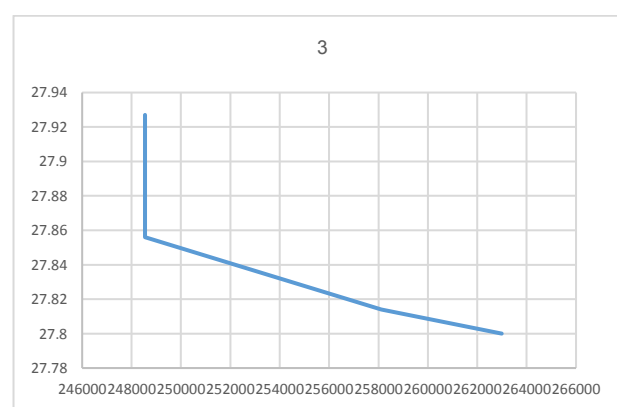
شکل (۱۲). جبهه پارتو مسأله ۶ (قطعی)



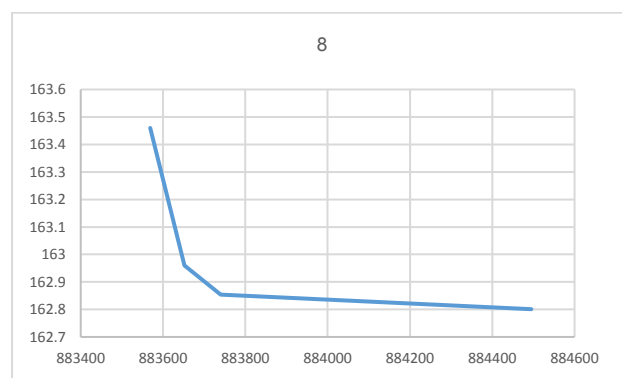
شکل (۸). جبهه پارتو مسأله ۲ (قطعی)



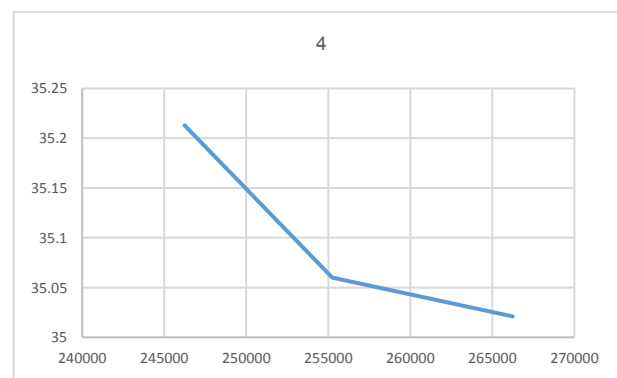
شکل (۱۳). جبهه پارتو مسأله ۷ (قطعی)



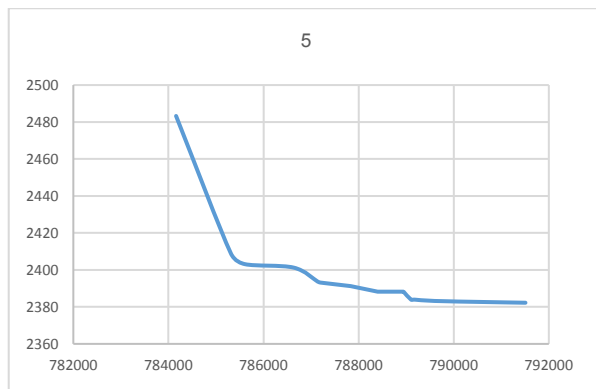
شکل (۹). جبهه پارتو مسأله ۳ (قطعی)



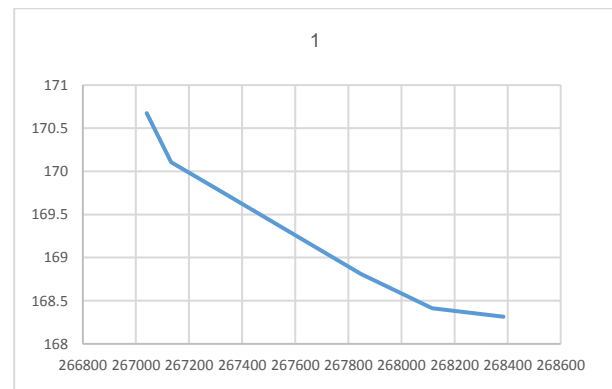
شکل (۱۴). جبهه پارتو مسأله ۸ (قطعی)



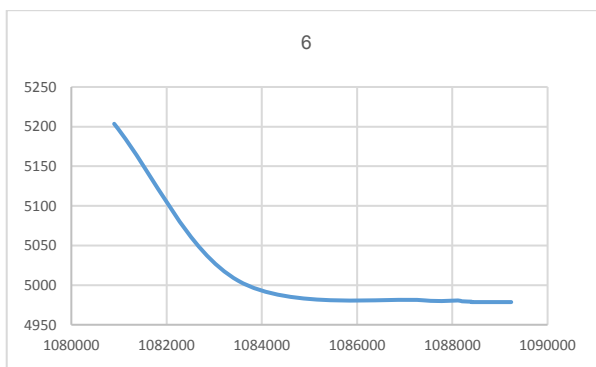
شکل (۱۰). جبهه پارتو مسأله ۴ (قطعی)



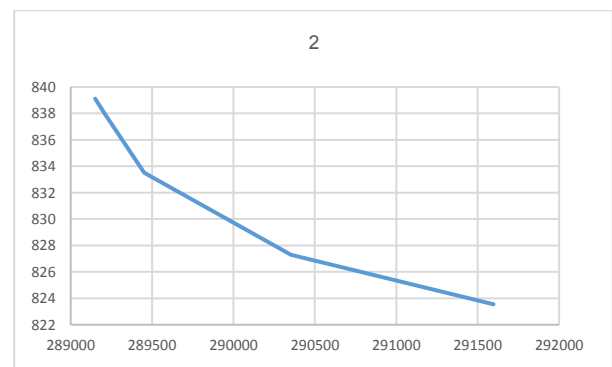
شکل (۱۹). جبهه پارتو مسأله ۵ (استوار)



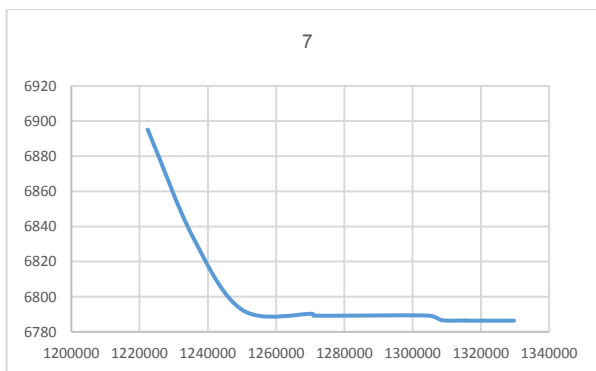
شکل (۱۵). جبهه پارتو مسأله ۱ (استوار)



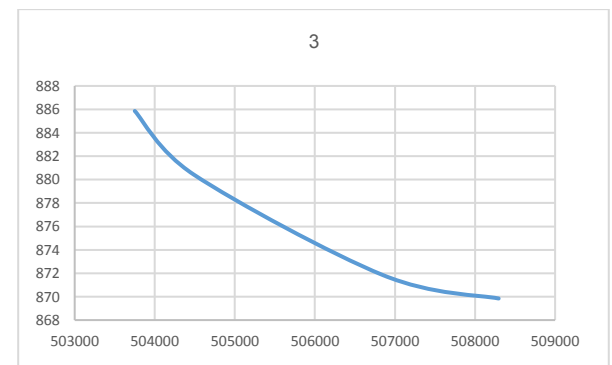
شکل (۲۰). جبهه پارتو مسأله ۶ (استوار)



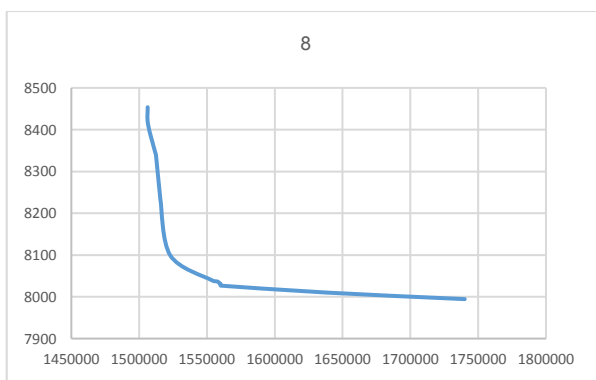
شکل (۱۶). جبهه پارتو مسأله ۲ (استوار)



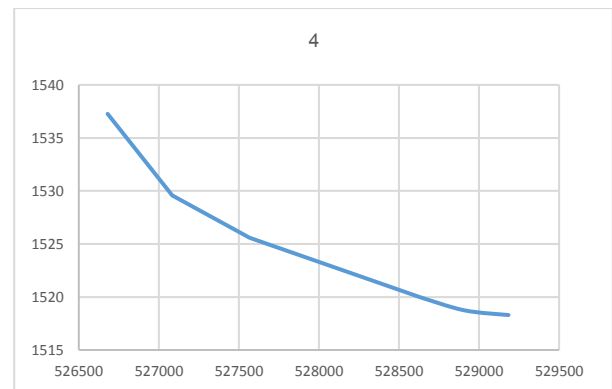
شکل (۲۱). جبهه پارتو مسأله ۷ (استوار)



شکل (۱۷). جبهه پارتو مسأله ۳ (استوار)



شکل (۲۲). جبهه پارتو مسأله ۸ (استوار)



شکل (۱۸). جبهه پارتو مسأله ۴ (استوار)

جدول (۸). مقادیر ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی به‌دست آمده در روش ترابی هسینی (حالت قطعی)

شماره مسأله	بهترین مقدار Z_1			بهترین مقدار Z_2		
	Z_1 (PIS) ایده‌آل مثبت	Z_2 (NIS) ایده‌آل منفی	T	Z_1 (NIS) ایده‌آل منفی	Z_2 (PIS) ایده‌آل مثبت	T
۱	۲۵۳۵۴۰	۸/۷۱۴	۰/۱۹۳	۲۵۳۷۵۰	۸/۵۴۳	۰/۲۰۰
۲	۲۵۸۱۱۰	۱۹/۷۲۴	۰/۱۹۳	۲۵۹۵۰۰	۱۹/۲۴۲	۰/۲۵۰
۳	۲۶۲۹۹۰	۲۷/۹۲۷	۰/۲۱۳	۲۸۴۳۸۰	۲۷/۸۰۰	۰/۲۵۲
۴	۲۶۶۲۴۰	۳۵/۲۱۳	۰/۲۹۸	۲۸۶۲۴۰	۳۵/۰۲۱	۰/۲۶۶
۵	۲۹۱۶۳۰	۶۰/۷۴۶	۰/۳۱۱	۳۶۰۵۳۰	۶۰/۰۳۰	۰/۲۸۷
۶	۳۲۵۱۱۰	۸۶/۸۱۳	۰/۴۷۰	۴۱۰۰۵۰	۸۱/۷۲۴	۰/۳۲۶
۷	۳۶۱۱۸۰	۱۳۷/۳۵۲	۶/۸۳۸	۱۱۳۵۵۰۰	۱۳۶/۸۹۴	۰/۳۶۲
۸	۸۸۳۰۰۰	۱۸۰/۱۰۵	۷/۱۴۷	۱۱۹۲۴۰۰	۱۵۷/۸۱۷	۰/۳۹۳

جدول (۹): جواب کارای مدل از روش ترابی هسینی (حالت قطعی)

شماره مسأله	بهترین مقدار Z_1 و Z_2			بهترین مقدار Z_1 و Z_2 (۲۰ تکرار)		
	Z_1	Z_2	T	Z_1	Z_2	T
۱	۲۵۳۷۴۰	۸/۷۱۴	۰/۱۹۳	۲۵۳۷۴۵/۷۱۵	۸/۵۴۳	۲/۸۷۷
۲	۲۵۸۱۱۰	۱۹/۷۲۴	۰/۱۹۳	۲۵۸۷۸۱/۹۶۲	۱۹/۴۵۳	۳/۳۲۶
۳	۲۶۲۹۹۰	۲۷/۹۲۷	۰/۲۱۳	۲۶۳۹۱۵/۳۸۴	۲۷/۸۰۰	۳/۵۷۴
۴	۲۶۶۲۴۰	۳۵/۲۱۳	۰/۲۹۸	۲۶۶۲۳۵/۴۸۶	۳۵/۰۲۱	۳/۶۵۴
۵	۳۴۰۵۳۰	۶۰/۷۴۶	۰/۳۱۱	۳۴۰۵۲۸/۷۲۰	۶۰/۰۳۰	۳/۶۷۸
۶	۳۸۰۴۶۰	۸۱/۷۲۴	۱/۴۰۱	۳۸۰۴۶۳/۰۵۹	۸۱/۷۲۴	۲۵/۲۹۶
۷	۸۱۲۳۵۰	۱۳۷/۱۷۶	۱/۴۵۵	۸۱۲۳۴۷/۲۰۷	۱۳۶/۸۹۴	۲۶/۳۵۰
۸	۸۸۳۷۴۰	۱۶۲/۸۵۴	۱/۸۶۶	۸۸۳۵۶۸/۸۹۰	۱۵۷/۸۱۷	۲۶/۹۱۲

جدول (۱۰). مقادیر ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی به‌دست آمده در روش ترابی هسینی (حالت غیرقطعی)

شماره مسأله	بهترین مقدار Z_1			بهترین مقدار Z_2		
	Z_1 (PIS) ایده‌آل مثبت	Z_2 (NIS) ایده‌آل منفی	T	Z_1 (NIS) ایده‌آل منفی	Z_2 (PIS) ایده‌آل مثبت	T
۱	۲۶۷۰۴۰	۱۸۲/۷۳۷	۰/۲۹۷	۲۶۸۳۸۰	۱۶۸/۱۶۵	۰/۳۹۲
۲	۲۸۹۱۵۰	۸۴۷/۲۸۲	۰/۴۵۷	۲۸۹۶۵۶	۸۳۹/۱۱۷	۰/۴۷۷
۳	۵۰۳۵۸۰	۸۹۴/۱۸۹	۰/۴۵۹	۶۲۳۵۸۰	۸۸۵/۸۶۲	۰/۴۹۶
۴	۵۲۶۶۸۰	۱۵۵۱/۶۹۷	۰/۴۶۵	۶۴۶۶۸۰	۱۵۳۷/۲۶۴	۰/۵۶۳
۵	۷۸۴۱۲۰	۲۴۸۴/۴۷۵	۰/۴۸۳	۱۰۱۲۷۰۰	۲۴۸۳/۲۷۶	۰/۵۶۵
۶	۱۰۶۶۱۰۰	۵۲۳۸/۱۰۱	۱/۱۷۷	۱۴۳۱۸۰۰	۵۲۰۳/۵۶۱	۰/۵۶۹
۷	۱۲۹۹۵۰۰	۷۱۱۵/۳۸۸	۱/۲۳۵	۱۵۷۸۸۰۰	۷۰۳۴/۶۰۰	۰/۸۳۲
۸	۱۴۷۹۱۰۰	۸۵۴۳/۸۰۷	۱/۳۸۱	۱۸۶۵۶۰۰	۷۹۵۲/۹۶۷	۵/۵۱۷

جدول (۱۱). جواب کارای مدل از روش ترابی هسینی (حالت غیرقطعی)

شماره مسأله	بهترین مقدار Z_1 و Z_2			بهترین مقدار Z_1 و Z_2 (۲۰ تکرار)		
	Z_1	Z_2	T	Z_1	Z_2	T
۱	۲۶۷۰۴۰	۱۷۰/۶۷۴	۰/۷۸۰	۲۶۷۰۴۱/۵۲۸	۱۷۰/۶۷۴	۴/۱۹۶
۲	۲۸۹۱۵۰	۸۳۹/۱۱۷	۰/۷۹۲	۲۸۹۱۵۲/۳۶۴	۸۳۹/۱۱۷	۲:۴۷:۵۵/۴۴۹
۳	۵۰۳۷۵۰	۸۸۵/۸۶۲	۰/۸۷۲	۵۰۳۵۷۵/۶۷۸	۸۸۵/۸۶۲	۳:۲۶:۱۱/۰۳۲
۴	۵۲۶۶۸۰	۱۵۳۷/۲۶۴	۰/۹۴۱	۵۴۱۴۴۰/۱۴۳	۱۴۷۶/۱۱۶	۷:۳۹:۴۱/۴۳۷
۵	۷۸۴۱۶۰	۲۴۸۳/۲۷۶	۱:۲۳/۵۳۲	۷۸۷۲۰۰/۳۲۹	۲۳۹۱/۴۲۸	۸:۲۱:۱۹/۷۳۱
۶	۱۰۸۰۹۰۰	۵۲۰۳/۵۶۱	۱:۴۳/۲۶۸	۱۰۸۸۴۰/۱۸۰۹	۴۹۷۸/۵۹۷	۸:۳۲:۳۵/۷۴۹
۷	۱۳۲۹۷۰۰	۷۰۳۴/۶۰۰	۱:۵۱/۸۴۸	۱۲۲۴۶۴۴/۷۲۲	۶۷۸۳/۰۷۷	۸:۳۲:۴۷/۳۰۰
۸	۱۵۱۲۴۰۰	۸۳۳۹/۲۲۹	۱:۵۳/۲۹۶	۱۵۵۹۹۴۶/۶۲۴	۸۰۱۰/۷۹۸	۸:۳۹:۳۶/۲۹۵

جدول (۱۲). مقایسه جواب‌ها در حالت قطعی و استوار

شماره مسأله	استوار		قطعی	
	Z ₁	Z ₂	Z ₁	Z ₂
۱	۲۶۷۰۴۰	۱۷۰/۶۷۴	۲۵۳۷۴۰	۸/۵۴۳
۲	۲۸۹۱۵۰	۸۳۹/۱۱۷	۲۵۸۱۱۰	۱۹/۲۴۲
۳	۵۰۳۷۵۰	۸۸۵/۸۶۲	۲۶۲۹۹۰	۲۷/۸۰۰
۴	۵۲۶۶۸۰	۱۵۳۷/۲۶۴	۲۶۶۲۴۰	۳۵/۰۲۱
۵	۷۸۴۱۶۰	۲۴۸۳/۲۷۶	۳۴۰۵۳۰	۶۰/۰۳۰
۶	۱۰۸۰۹۰۰	۵۲۰۳/۵۶۱	۳۸۰۴۶۰	۸۱/۷۲۴
۷	۱۳۲۹۷۰۰	۷۰۳۴/۶۰۰	۸۱۲۳۵۰	۱۳۷/۱۷۶
۸	۱۵۱۲۴۰۰	۸۳۳۹/۲۲۹	۸۸۳۷۴۰	۱۶۲/۸۵۴

۵. نتیجه و جمع‌بندی

در این پژوهش به بررسی مسأله‌ی مکان‌یابی مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن کالاهای فسادپذیر تحت شرایط وجود انبار متقاطع و به‌کارگیری فناوری RFID در حالت دوهدفه، چند محصولی و تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا و زمان تحویل پرداخته شد. برای محصولات فاسدشدنی، زمان تحویل به مشتری از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا مستقیماً بر کیفیت و قابلیت فروش محصول تأثیر می‌گذارد. در مقابل، زمان تولید معمولاً در محیط‌های کنترل‌شده ثابت است و تأثیر کمتری بر زنجیره تأمین دارد. بنابراین، بهینه‌سازی زمان تحویل به‌عنوان تابع هدف دوم انتخاب شده است. مسأله به‌عنوان یک مدل MILP فرموله شد. با توجه به اهمیت روزافزون کاربردهای اینترنت اشیا در سیستم‌های لجستیک، محصولات و وسایل نقلیه مجهز به سیستم‌های RFID در نظر گرفته شدند. تحلیل حساسیت‌ها نشان داد که مدل مولوی در مواجهه با تغییرات در پارامترها به‌خوبی عمل کرده و قابلیت تطابق با سناریوهای مختلف را دارد. استحکام مدل، تعادلی را بین استواری راه‌حل و قابلیت تطبیق مدل با شرایط مختلف محیطی فراهم می‌آورد. این تعادل توسط ضریب ریسک‌گریزی کنترل می‌شود که بهینه‌سازی جواب مدل در مقابل عدم قطعیت را تضمین می‌کند. از نظر تابع هدف، تغییرات در مقدار زمان تحویل و هزینه کل به‌طور قابل توجهی با تغییر در زمان در دسترس بودن وسایل نقلیه همراه است. با کاهش زمان در دسترس بودن، تابع هدف افزایش پیدا کرده و این امر به این معناست که با افزایش تقاضا باید از وسیله نقلیه بیشتری استفاده شود. همچنین، نقض محدودیت کنترل به‌عنوان یک عامل جریمه‌ای در تابع هدف جایگزین شده و نقض محدودیت‌ها را جریمه می‌کند. این جریمه به‌ویژه در سناریوهایی که راه‌حل غیرقابل اجرا به‌دست می‌آید، تأثیر آشکاری دارد.

در ادامه با توجه به دوهدفه بودن مدل پیشنهادی، برای تک‌هدفه کردن آن از روش ترابی‌هسینی و برای رفع عدم قطعیت آن، از رویکرد استوار مولوی استفاده شده است. مدل پیشنهادی به دو صورت قطعی و استوار مورد بررسی قرار گرفت که مشاهده شد مقادیر توابع هدف در حالت استوار در مقایسه با حالت قطعی، بدتر می‌باشند؛ زیرا در بهینه‌سازی استوار بدترین حالات ممکن در نظر گرفته می‌شوند

جدول‌های (۶) تا (۱۰). مدل استوار با افزایش در مقدار تابع هدف، می‌تواند عدم قطعیت در پارامترهای ورودی را مدیریت کند. در مدل استوار در واقع، مشکلات مدل‌های غیرقطعی که باعث نشدنی و بهینه نشدن مسأله می‌شوند، وجود نداشته در نتیجه می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب در مسائل دنیای واقعی مورد استفاده قرار بگیرد. این رویکرد می‌تواند به مدیران کمک کند تا جواب‌های استوار به تغییرات را جهت انتخاب مناسب در شرایط ریسک به‌دست آورند و با تغییر پارامترهای تحت کنترل خود، بهترین جواب را از بین جواب‌های ممکن برگزینند. از طرف دیگر داشتن عدم قطعیت در تقاضا و زمان تحویل سبب تحمیل هزینه‌های بسیاری می‌گردد که در افق برنامه‌ریزی طولانی‌تر شرکت‌ها، تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان می‌بایستی با انجام تدابیر لازم عدم قطعیت‌هایی که وجود دارد را برطرف کنند. از جمله این تدابیر استفاده از پهنادهای حمل بار می‌باشد که می‌توانند زمان تحویل محصولات فاسدشدنی به مشتریان را کاهش دهند.

۵-۱. بینش‌های مدیریتی

مدل پیشنهادی در این پژوهش، قابلیت اجرا در حوزه‌های زیر را دارا می‌باشد:

- مدیریت زنجیره تأمین محصولات حساس
- توزیع کالاهای حیاتی مانند دارو، واکسن، خون، لبنیات و گوشت منجمد.
- توزیع محصولات اورژانسی در شرایط بحران (همچون همه‌گیری کرونا و یا وقوع بلایای طبیعی) که زمان و قابلیت ردیابی و زمان تحویل محصولات حیاتی و حائز اهمیت هستند.
- بهبود سیستم‌های لجستیک
- نصب برچسب‌های RFID بر روی تمام محصولات و وسایل نقلیه، برای کاهش تأخیر و بهبود دقت ردیابی کالا.
- انتخاب مکان‌های استراتژیک (مانند احداث انبار در نواحی با تقاضای بالا) به منظور کاهش زمان انتقال و بهینه‌سازی هزینه‌های کلی توزیع.
- توسعه منابع انسانی
- آموزش کارکنان در به‌کارگیری سیستم‌های RFID و نظارت بر عملکرد آن‌ها.

<https://sid.ir/paper/166479/fa>

[۶] قهرمانی نهر، جاوید، نوری، فرامرز (۱۳۹۷). راهنمای نرم‌افزار GAMS مدل‌سازی شبکه‌های زنجیره تأمین.

<https://db.ketab.ir/bookview.aspx?bookid=2250031>

[7] Nambiar, J. M., Gelders, L. F., Van Wassenhove, L. N. (1979). A large scale location-allocation problem in the natural rubber industry, *European Journal of Operational Research*, 6(2), 183-189.

[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90205-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90205-8)

[8] Laporte, G., Nobert, Y., Pelletier, P. (1981). Hamiltonian location problems, *European Journal of Operational Research*, 12(1), 82-89.

[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90182-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90182-0)

[9] Perl, J., Daskin, M. S. (1985). A warehouse location-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 19(5), 381-396.

[https://doi.org/10.1016/0191-2615\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0191-2615(85)90052-9)

[10] Tuzun, D., Burke, L. I. (1998). A two-phase tabu search approach to the location routing problem. *European journal of operational research*, 116(1), 87-99.

[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00107-6)

[11] Tai-His, W. (2002). Heuristics solutions to multi-depot location-routing problems, *Computers & Operations Research*, 29, 1393-1415.

[https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00038-7)

[12] Shen, Z. J. M., Coullard, C., Daskin, M. S. (2003). A joint location-inventory model, *Transportation science*, 37(1), 40-55.

<https://doi.org/10.1287/trsc.37.1.40.12823>

[13] Prins, C., Prodhon, C., Calvo, R. W. (2006). Solving the capacitated location-routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking, *4or*, 4, 221-238.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10288-006-0001-9>

[14] Lin, C. K. Y., Kwok, R. C. W. (2006). Multi-objective metaheuristics for a location-routing problem with multiple use of vehicles on real data and simulated data. *European journal of operational research*, 175(3), 1833-1849.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.10.032>

[15] Berger, R. T., Coullard, C. R., & Daskin, M. S. (2007). Location-routing problems with distance constraints, *Transportation Science*, 41(1), 29-43.

<https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0156>

[16] Guerra, L., Murino, T., Romano, E. (2007). A heuristic algorithm for the constrained location-routing problem. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 1(4), 146-154.

<https://www.naun.org/main/UPress/saed/saed-20.pdf>

[17] Ukkusuri, S. V., Yushimito, W. F. (2008). Location routing approach for the humanitarian prepositioning problem, *Transportation research record*, 2089(1), 18-25.

<https://doi.org/10.3141/2089-03>

[18] Zegordi, S. H., Nikbakhsh, E. (2010). A heuristic algorithm and a lower bound for the two-echelon location-routing problem with soft time window

• شبیه‌سازی سناریوهای اضطرابی در محیط واقعی برای افزایش تاب‌آوری عملیاتی.

• بهینه‌سازی ناوگان حمل‌ونقل

• استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت بهینه، به‌جای استفاده بیش‌ازحد از خودروهای کوچک، به منظور کاهش هزینه‌ها.

پیشنهادهای آتی

موارد ذیل به‌عنوان پیشنهادهای آتی برای این تحقیق ارائه می‌گردد:

• استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل در مقیاس بزرگ‌تر و پیچیده‌تر.

• بررسی مدل به‌صورت تک‌هدفه یا با توابع هدف بیشتر دیگر و استفاده از سایر رویکردها برای رفع عدم قطعیت.

• استفاده از پنجره‌های زمانی با در نظر گرفتن رضایت مشتریان و پیاده‌سازی مدل برای مسائل دنیای واقعی در شبکه زنجیره تأمین کالاهای فاسدشدنی.

• بررسی سایر فناوری‌های اینترنت اشیا در کنار RFID (مانند حسگرهای هوشمند یا بلاکچین) برای افزایش امنیت و شفافیت.

• توسعه مدل برای در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی.

• بررسی شرایط پویای بازار مانند تغییرات تقاضا در طول زمان یا وقوع بحران‌هایی مثل همه‌گیری‌ها.

• پیاده‌سازی سیستم ارسال اطلاعات به مشتریان درباره وضعیت مرسولات و زمان تحویل به‌صورت لحظه‌ای.

مراجع

[۱] یحیی‌زاده اندواری، یلدا، الفت، لعیا، امیری، مقصود (۱۳۹۵).

رویکرد بهینه‌سازی استوار در انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص

سفارش، مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۴(۴۰)، ۵۲-۲۵.

<https://doi.org/10.22054/jims.2016.3909>

[۲] خیری، بهرام، ذوالفقاری، ثمینه (۱۳۸۹). بررسی تاثیر تکنولوژی

سیستم شناسایی از طریق امواج رادیویی بر کارایی زنجیره تأمین

با تاکید بر صنایع غذایی، مدیریت بازاریابی، ۵(۸)، ۱۴۰-۱۱۵.

<https://www.magiran.com/p930010>

[۳] افشارپور، بهنام، ربانی، مسعود (۱۴۰۰). مسأله‌ی مسیریابی

خودرو باز با انبار متقاطع و تحویل‌های دوگانه. نشریه پژوهش‌های

مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۸(۱۷)، ۳۱۹-۳۱۱.

<https://doi.org/10.22084/IER.2021.3928>

[۴] نیکجو، نوید، جوادیان، نیکبخش (۱۳۹۸). ارائه یک مدل

لجستیک چندهدفه استوار برای مسأله مکان‌یابی-مسیریابی،

چندسطحی - چندمحصولی در زمان بحران در شرایط

عدم قطعیت، چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۸(۴)، ۱۴۷-۱۲۱.

https://jimp.sbu.ac.ir/article_87161.html

[۵] کهنی اردکانی، عاطفه، سید حسینی، سید محمد، توکلی مقدم،

رضا (۱۳۹۶). مسائل مکان‌یابی-مسیریابی: مروری بر مفاهیم،

مدل‌ها، روش‌های حل، کاربردها و شکاف‌های تحقیقاتی، نشریه

تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۵۱، شماره ۲، ۲۲۳-۲۵۰.

- <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.013>
- [29] Yaghoubi, A., Akrami, F. (2019). Proposing a new model for location-routing problem of perishable raw material suppliers with using meta-heuristic algorithms, *Heliyon*, 5(12).
<http://doi.org/10.22084/ier.2020.21281.1953>
- [30] Li, P., Lan, H., Saldanha-Da-Gama, F. (2019). A bi-objective capacitated location-routing problem for multiple perishable commodities. *IEEE access*, 7, 136729-136742.
<http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941363>
- [31] Rahbari, A., Nasiri, M. M., Werner, F., Musavi, M., & Jolai, F. (2019). The vehicle routing and scheduling problem with cross-docking for perishable products under uncertainty: Two robust bi-objective models, *Applied Mathematical Modelling*, 70, 605-625.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.01.047>
- [32] Ji, Y., Du, J., Han, X., Wu, X., Huang, R., Wang, S., Liu, Z. (2020). A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products, *Physica a: statistical mechanics and its applications*, 548, 124481.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>
- [33] Zhao, Z., Li, X., Zhou, X. (2020). Optimization of transportation routing problem for fresh food in time-varying road network: Considering both food safety reliability and temperature control, *PloS one*, 15(7), e0235950.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235950>
- [34] Tsang, Y. P., Wu, C. H., Lam, H. Y., Choy, K. L., Ho, G. T. (2020). Integrating Internet of Things and multi-temperature delivery planning for perishable food E-commerce logistics: a model and application, *International Journal of Production Research*, 59(5), 1534-1556.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1841315>
- [35] Manouchehri, F., Nookabadi, A. S., Kadivar, M. (2020). Production routing in perishable and quality degradable supply chains, *Heliyon*, 6(2).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03376>
- [۳۶] رفیعی مجد، زهرا، پسندیده، حمیدرضا (۱۳۹۹). بررسی مسأله موجودی-مکان‌یابی-مسیریابی چندهدفه برای کالاهای فاسدشدنی و در شرایط وجود چند تأمین‌کننده، با استفاده از رویکرد سناریو محور، مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۸(۵۶)، ۱۷۱-۲۰۷
<https://doi.org/10.22054/jims.2017.24916.1859>
- [37] Shui, W., Zhao, H., Li, M. (2021). Integrated thermal insulation packing and vehicle routing for perishable products in community group purchase, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021(1), 6673555.
<https://doi.org/10.1155/2021/6673555>
- [38] Daroudi, S., Kazemipoor, H., Najafi, E., Fallah, M. (2021). The minimum latency in location routing fuzzy inventory problem for perishable multi-product materials, *Applied Soft Computing*, 110, 107543. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107543>
- [39] Abbasi-Tavallali, P., Feylizadeh, M. R., Amindoust, A. (2021). A system dynamics model for routing and scheduling of cross-dock and transportation in constraints, *Scientia Iranica*, 17(1).
https://scientiainiranica.sharif.edu/article_3323.html
- [19] Karaoglan, I., Altiparmak, F., Kara, I., & Dengiz, B. (2011). A branch and cut algorithm for the location-routing problem with simultaneous pickup and delivery. *European Journal of Operational Research*, 211(2), 318-332.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.003>
- [20] Belenguer, J. M., Benavent, E., Prins, C., Prodhon, C., Calvo, R. W. (2011). A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem, *Computers & Operations Research*, 38(6), 931-941.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.019>
- [21] Hamidi, M., Farahmand, K., Reza Sajjadi, S., Nygard, K. E. (2012). A hybrid GRASP-tabu search metaheuristic for a four-layer location-routing problem, *International Journal of Logistics Systems and Management*, 12(3), 267-287.
<https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.047602>
- [22] Escobar, J. W., Linfati, R., Toth, P. (2013). A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem, *Computers & operations research*, 40(1), 70-79.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.05.008>
- [23] Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., Devika, K. (2013). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food, *International journal of production economics*, 152, 9-28.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>
- [24] Khalili-Damghani, K., Abtahi, A. R., Ghasemi, A. (2015). A new bi-objective location-routing problem for distribution of perishable products: evolutionary computation approach. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*, 14, 287-312.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10852-015-9274-3>
- [25] Li-ying, W., Yuan-bin, S. (2015). Multiple charging station location-routing problem with time window of electric vehicle, *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 8(5).
<https://www.jestr.org/downloads/Volume8Issue5/fulltext85242015.pdf>
- [26] Rabbani, M., Farshbaf-Geranmayeh, A., Haghjoo, N. (2016). Vehicle routing problem with considering multi-middle depots for perishable food delivery, *Uncertain Supply Chain Management*, 4(3), 171-182.
<https://doi.org/10.5267/j.uscm.2016.3.001>
- [27] Hiassat, A., Diabat, A., Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products, *Journal of manufacturing systems*, 42, 93-103.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.10.004>
- [28] Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S. H. R., Naderi, B. (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm, *Computers & chemical engineering*, 109, 9-22.

- <https://doi.org/10.3390/su152115490>
- [50] De Maio, A., Musmanno, R., Vocaturo, F. (2023). Unbiased decision making in location-routing problems with uncertain customer demands, *Soft Computing*, 27(18), 12883-12893. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-06785-7>
- [51] Ghasemi, P., Hemmaty, H., Pourghader Chobar, A., Heidari, M. R., Keramati, M. (2023). A multi-objective and multi-level model for location-routing problem in the supply chain based on the customer's time window, *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 10(3), 412-426. <https://doi.org/10.22105/jarie.2022.321454.1414>
- [52] Ding, S., Cucurachi, S., Tukker, A., Ward, H. (2024). The environmental benefits and burdens of RFID systems in Li-ion battery supply chains—An ex-ante LCA approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 209, 107829. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107829>
- [53] Khan, S. I., Ray, B. R., Karmakar, N. C. (2024). Rfid localization in construction with iot and security integration, *Automation in Construction*, 159, 105249. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105249>
- [54] Komijani, M., Sajadieh, M. S. (2024). An integrated planning approach for perishable goods with stochastic lifespan: Production, inventory, and routing, *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 12, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100163>
- [55] Zijoodi, A., Sadjadi, S., Tayefeh, M. (2025). The strategies of hub facility location and its utilization in managing the supply chain of perishable products for sustainability and uncertainty mitigation: A literature review, *Journal of Future Sustainability*, 5(2), 127-140. <https://doi.org/10.5267/j.jfs.2025.4.003>
- [56] Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food, *International journal of production economics*, 152, 9-28. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>
- [57] Liu, Y., Yuan, Y., Chen, Y. (2014). Model and Algorithm of Reliable Location-Routing Problem for Perishable Goods, *Journal of Logistics, Informatics and Service Science*, 1(1), 59-69. https://www.aasmr.org/liss/Vol.1%20No.1/JLISS-VOL1_NO1_6.pdf
- [58] Shahabi-Shahmiri, R., Asian, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousavi, S. M., Rajabzadeh, M. (2021). A routing and scheduling problem for cross-docking networks with perishable products, heterogeneous vehicles and split delivery, *Computers & industrial engineering*, 157, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107299>
- [۵۹] غایب لو، سیماء، فتحی‌پور، فریبا، ترکمانی، نگار (۱۴۰۰). ارائه یک مدل ریاضی استوار امکانی به منظور مسیریابی، زمان‌بندی و توزیع منابع در عملیات کمک‌رسانی پس از زلزله با درنظر گرفتن reverse logistics network of perishable goods, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(6), 10417-10433. <https://doi.org/10.3233/JIFS-200610>
- [40] Dose, V., Wallenhorst, A., Tijan, E., Jović, M. (2021, September). Implementation of RFID technology in perishable goods transport. In 2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO) (pp. 1454-1459), IEEE. <https://doi.org/10.23919/MIPRO52101.2021.9597038>
- [41] Liu, A., Zhu, Q., Xu, L., Lu, Q., Fan, Y. (2021). Sustainable supply chain management for perishable products in emerging markets: An integrated location-inventory-routing model, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150, 102319. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102319>
- [42] Zabihiyan-Bisheh, A., Pourrezaie-Khaligh, P., Farrokhi-Asl, H., Lim, S. F. W., Rabbani, M., Khamechian, M. (2022). Multi-depot green capacitated location routing problem considering uncertainty and in-facility queuing, *Cleaner Waste Systems*, 2, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100011>
- [43] Sedaghat, A., Rabbani, M., Farrokhi-Asl, H. (2022). A sustainable transportation location inventory routing problem, *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)*, 8(3). <https://doi.org/10.52547/crpase.8.3.2813>
- [44] Yu, V. F., Aloina, G., Susanto, H., Effendi, M. K., Lin, S. W. (2022). Regional Location Routing Problem for Waste Collection Using Hybrid Genetic Algorithm-Simulated Annealing, *Mathematics*, 10(12), 2131. <https://doi.org/10.3390/math10122131>
- [45] Ji, T., Ji, S., Ji, Y., Liu, H. (2022). Study on Sustainable Combined Location-Inventory-Routing Problem Based on Demand Forecasting, *Sustainability*, 14(23), 16279. <https://doi.org/10.3390/su142316279>
- [46] Eshghi, A. A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Ebrahimnejad, S., Ghezavati, V. R. (2022). Multi-objective robust mathematical modeling of emergency relief in disaster under uncertainty, *Scientia Iranica*, 29(5), 2670-2695. <https://doi.org/10.24200/SCI.2020.54485.3770>
- [47] Pan, L., Shan, M., Li, L. (2023). Optimizing Perishable Product Supply Chain Network Using Hybrid Metaheuristic Algorithms, *Sustainability*, 15(13), 10711. <https://doi.org/10.3390/su151310711>
- [48] Liang, X., Wang, N., Zhang, M., Jiang, B. (2023). Bi-objective multi-period vehicle routing for perishable goods delivery considering customer satisfaction, *Expert Systems with Applications*, 220, 119712. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119712>
- [49] Abbasi, S., Moosivand, M., Vlachos, I., Talooni, M. (2023). Designing the Location-Routing Problem for a Cold Supply Chain Considering the COVID-19 Disaster, *Sustainability*, 15(21), 15490.

- [64] Tirkolaee, E. B., Goli, A., Weber, G. W. (2020). A robust two-echelon periodic multi-commodity RFID-Based location routing problem to design petroleum logistics networks: A case study, In International Conference on Logistics and Supply Chain Management (pp. 3-23), Cham: Springer International Publishing.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-89743-7_1
- [۶۵] صالحی سربیزن، مرتضی، بهنامیان، جواد (۱۴۰۲). الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل مسأله مسیریابی وسیله نقلیه تغذیه‌کننده چندناوگانی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۰(۲۱)، ۳۳-۱۹.
<https://doi.org/10.22084/IER.2023.27033.2097>
- [۶۶] قربانی، علی، موسوی، سید میثم (۱۴۰۴). تصمیم‌گیری انتخاب انبار متقاطع پایدار با توسعه یک چارچوب جدید مبتنی بر یادگیری ماشین و مجموعه نوتروسوفیک تکارزشی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۲(۲۵)، ۴۷-۶۱.
<https://doi.org/10.22084/IER.2025.30115.2185>
- اختلال در توزیع در شرایط عدم قطعیت، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۸(۱۷)، ۲۹۳-۲۷۵.
<https://doi.org/10.22084/IER.2021.22420.1985>
- [60] Song, L., Wu, Z. (2023). An integrated approach for optimizing location-inventory and location-inventory-routing problem for perishable products, International Journal of Transportation Science and Technology, 12(1), 148-172.
<https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.02.002>
- [61] Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems, Operations research, 43(2), 264-281.
<https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264>
- [62] Khalilzadeh, M., Hajghani, M., Forghani, M. A., Heidari, A., & Kebriyaii, O. (2022). The sustainable two-echelon location-routing problem considering combined open and closed routes under uncertainty.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1438220/v1>
- [63] Baghalian, A., Rezapour, S., Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case, European journal of operational research, 227(1), 199-215.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.017>



DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2025.30650.2204>

Vehicle Routing Location Problem with Consideration of Perishable Goods and Use of RFID Technology Subject to Cross-Docking

Mona Pakzad¹, Hiwa Farughi^{2*}, Amir-Mohammad Golmohammadi³

¹ M.A., 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 Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025/05/04

Revised: 2025/09/01

Accepted: 2025/09/08

Keywords:

Supply Chain
Perishable Products
Location-Routing Problem
Uncertainty
Robust Optimization

ABSTRACT

Spoilage is a common phenomenon affecting many real-world products over time, if ignored, it imposes additional costs on inventory systems and can disrupt the decision-making process. Therefore, improving the supply chain system can significantly reduce costs and increase efficiency. This study develops a multi-product, three-echelon mixed-integer linear programming model under uncertainty, involving suppliers, cross-docks, and customers. A bi-objective model is considered: the first objective minimizes transportation, location, and routing costs, while the second aims to minimize total delivery time. Given the growing importance of the Internet of Things in logistics systems, both products and vehicles are assumed to be equipped with RFID technology. This allows the monitoring of temperature and shelf-life of perishable items at each stage of the supply chain, ensuring safe storage and delivery conditions for producers and consumers. To solve the model, the Torabi- Hassini method is employed to convert the bi-objective model into a single-objective one, and the Molaei robust optimization approach is applied to handle uncertainty. A sensitivity analysis is conducted, and the results of the deterministic and robust models are compared. Findings reveal that while RFID reduces delivery time in the deterministic model, it leads to increased cost and time in the robust model. However, the robust model with RFID offers greater flexibility under uncertainty and is recommended for time-sensitive supply chains despite its higher cost. Moreover, the robust model avoids feasibility and optimality issues commonly encountered in non-robust models, making it a practical tool for real-world applications.

* Corresponding author. H. Farughi
Tel.: 087-33660073; E-mail: h.farughi@uok.ac.ir