



Route Planning Under Cooperative Metro-Truck Distribution Considering Variable Requests

Humira Kord, Javad Behnamian* 

*Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

(Received: 24/08/2024, Revised: 16/11/2024, Accepted: 16/04/2025, Published: 20/06/2025)

DOR: 20.1001.1.20089198.1404.27.86.2.4

ABSTRACT

With the introduction of freight transportation into the passenger transit network, underground urban logistics is regarded as a desirable alternative to address the challenges caused by truck movements in urban freight transport. In fact, the integration of surface and underground transportation resources can create a win-win cooperation between high-speed and metro companies by effectively utilizing the extra capacity of the subway. This research focuses on the route planning of a cooperative metro-truck distribution system considering variable split demands for customers. The main objective is to increase the efficiency of the cooperative distribution system while simultaneously minimizing costs, which include the fixed and variable costs of truck, the cost of the time window penalty, and the accumulation of goods, the cost of subway transportation operations, and the cost of labor. To achieve this objective, an optimization model has been developed that includes time and capacity constraints. Moreover, a two-stage stochastic programming approach has been employed to address uncertainties related to customer requests. The findings indicate that considering variable requests in the cooperative distribution system can lead to a reduction in total distribution costs.

Keywords: Route Planning, Metro Logistics, Collaborative Distribution, Demand Splitting

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: behnamian@basu.ac.ir

علمی - پژوهشی

برنامه‌ریزی مسیر تحت توزیع مشارکتی مترو - کامیون با در نظر گرفتن درخواست‌های متغیر

حمیرا کرد^۱، جواد بهنامیان^{۲*} 

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران ۲- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

DOR: 20.1001.1.20089198.1404.27.86.2.4

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

چکیده

با ورود حمل‌ونقل بار به شبکه حمل‌ونقل مسافر، لجستیک شهری زیرزمینی به‌عنوان جایگزینی مطلوب برای رفع چالش‌های ناشی از جابه‌جایی کامیون در حمل‌ونقل بار شهری در نظر گرفته می‌شود. در واقع ادغام منابع حمل‌ونقل سطحی و زیرزمینی می‌تواند با استفاده مؤثر از ظرفیت اضافی مترو، همکاری برد - برد بین شرکت‌های سریع‌السیر و مترو ایجاد کند. در این تحقیق به برنامه‌ریزی مسیر یک سامانه توزیع مشارکتی مترو - کامیون با در نظر گرفتن درخواست‌های تقسیم‌شده متغیر برای مشتریان پرداخته شده است. هدف اصلی افزایش کارایی سامانه توزیع مشارکتی و در عین حال به حداقل رساندن هزینه‌ها که شامل هزینه‌های ثابت و متغیر کامیون، هزینه جریمه پنجره زمانی و انباشته شدن کالا، هزینه عملیات حمل‌ونقل مترو و هزینه نیروی کار است. برای دستیابی به این هدف، یک مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده است که محدودیت‌های زمان و ظرفیت را دربرمی‌گیرد. علاوه بر این، برای رسیدگی به عدم قطعیت‌های مرتبط با درخواست‌های مشتری، یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای به کار گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که در نظر گرفتن درخواست‌های متغیر در سامانه توزیع مشارکتی می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های توزیع کلی شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی مسیر، لجستیک مترو، توزیع مشارکتی، تقسیم تقاضا

۱- مقدمه

یکی از راه‌های بهبود عملیات تحویل شهری، استفاده از ظرفیت حمل‌ونقل عمومی برای انتقال کالا به محلی نزدیک مشتریان که از آنجا می‌توان با وسایل نقلیه (کوچک) به مشتریان نهایی تحویل داد. از طرفی استفاده از ظرفیت مازاد سیستم مترو برای انجام توزیع لجستیک شهری می‌تواند به‌طور مؤثری ازدحام ترافیک را کاهش دهد و کارایی توزیع لجستیک را در یک منطقه شهری بهبود دهد [۴]. یکی از رویکردهایی که باعث کاهش هزینه‌های تحویل برای شرکت‌های توزیع می‌شود، در نظر گرفتن تحویل تقسیم‌شده است [۵]. برخلاف مسئله مسیریابی وسیله نقلیه^۱ (VRP) که هر مشتری تنها یک‌بار بازدید می‌شود، در مسیریابی وسیله نقلیه با تحویل تقسیم‌شده^۲ (SDVRP)، به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها بعضی از مشتریان توسط بیش از یک وسیله نقلیه بازدید می‌شوند. همچنین کاهش هزینه‌های تحویل، یعنی افزایش تقاضای تقسیم‌شده، عاملی

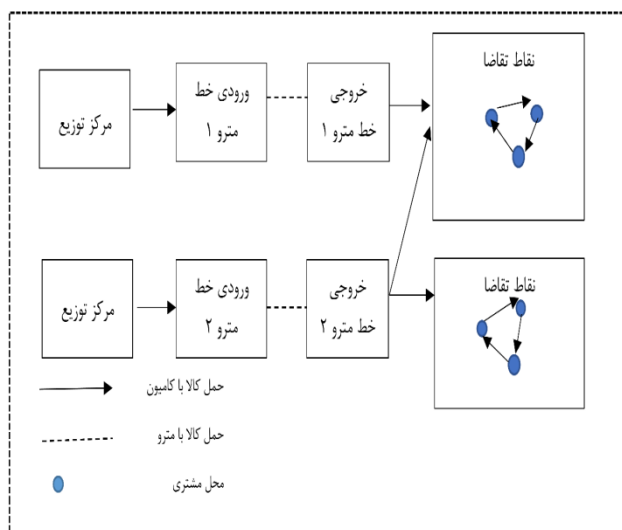
سازمان جهانی بهداشت با توجه به اینکه بیش از نیمی از جمعیت جهان در حال حاضر در مناطق شهری زندگی می‌کنند، پیش‌بینی کرده است که جمعیت در مناطق شهری تا سال ۲۰۳۰ به میزان بیش از ۱/۵ درصد در سال افزایش خواهد یافت [۱]. از این رو، رشد روزافزون جمعیت و در نتیجه ترافیک و ازدحام در لجستیک شهری، نیاز فوری به بهبود سیستم حمل‌ونقل را ضروری می‌کند [۲]. در حال حاضر، افزایش لجستیک شهری عمدتاً به حمل‌ونقل زمینی متکی است که بخش قابل توجهی از منابع جاده را اشغال می‌کند، تراکم ترافیک را تشدید می‌کند و مانع استفاده منطقی از فضای شهری می‌شود. همچنین ناکارآمد بودن مدل توزیع بار موجود برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد نیاز به اصلاحات فوری در خدمات لجستیک دارد [۳].

^۱ Vehicle Routing Problem

^۲ Split Delivery Vehicle Routing Problem

* رایانامه نویسنده مسئول: behnamian@basu.ac.ir

بخش پنجم، نتایج عددی قرار داده می‌شود. در نهایت بخش ششم، به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهای آتی اختصاص یافته است.



شکل (۱): شمای کلی مسئله مورد مطالعه

۲- ادبیات تحقیق

مطالعات متعددی در حوزه حمل‌ونقل بار توسط سامانه‌های زیرزمینی وجود دارد که این تحقیقات به امکان‌سنجی و مزایای استفاده از سامانه تحویل زیرزمینی برای حمل‌ونقل کالا پرداخته‌اند. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش کیان [۹] اشاره کرد که در آن یک بررسی کامل در مورد سامانه‌های لجستیک زیرزمینی معمولی در کشورهایی مانند هلند، ژاپن و آلمان با تأکید بر پتانسیل امیدوارکننده حمل‌ونقل بار از طریق مترو انجام شده است. هی و همکاران [۱۰] سیستم تحویل لجستیک شهری جدید بر اساس حمل‌ونقل ریلی طراحی کرده‌اند. این سیستم از مرکز مدیریت اطلاعات، مرکز بار، حمل‌ونقل ریلی و کارگران تحویل تشکیل شده است. برای پشتیبانی از سیستم، کانینرهای حمل‌ونقل عمومی به صورت مفهومی طراحی شده‌اند. سیستم مدیریت و کنترل برای انجام کارهای مدیریت عملیات و کنترل مؤثر استفاده شده است. کی کوتا و همکاران [۱۱] یک سامانه لجستیک شهری جدید را با ادغام خدمات متروی عمومی با عملیات وسیله نقلیه باری معمولی برای انتقال کالاها از حومه به مرکز شهر پیشنهاد کردند. این سیستم مشکلات حمل‌ونقل شهری مانند تراکم ترافیک، اثرات زیست‌محیطی و تأخیر تحویل را کاهش می‌دهد، آن‌ها دریافته‌اند که این سیستم جریان روان کالاها را بهبود می‌بخشد، تعداد وسایل نقلیه تخلیه در خیابان را کاهش می‌دهد و از محیط‌زیست محافظت می‌کند. دونگ و همکاران [۱۲] یک روش برنامه‌ریزی شبکه لجستیک زیرزمینی مبتنی بر سیستم مترو را توسعه دادند و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را برای بهینه‌سازی شبکه‌های تحویل چندوجهی

حیاتی برای شرکت‌هایی است که قصد دارند به سمت سیستم توزیعی حرکت کنند که در آن تحویل تقسیم‌بندی مجاز است [۶]. برنامه‌ریزی مسیر تحت تقاضای تقسیم‌شده می‌تواند سبب بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها، افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخگویی به تقاضا، کاهش ترافیک و آلودگی، بهبود کیفیت خدمات و ارتقاء ایمنی شود [۷]. همچنین در دنیای رقابتی تأمین به موقع تقاضای مشتریان تأثیر بسزایی در رضایت مشتریان دارد [۸]. پژوهش‌های محدودی به برنامه‌ریزی مسیر تحت تقاضای تقسیم‌شده پرداخته‌اند.

در این مقاله، توزیع مشارکتی به استفاده از یک شبکه حمل‌ونقل ریلی شهری موجود برای حمل‌ونقل کالا، یعنی نوعی سیستم لجستیک زیرزمینی اشاره دارد. با استفاده از مزایای هزینه کم، راندمان بالا و پایداری ترانزیت ریلی، می‌تواند به عنوان یک حالت موقت حمل‌ونقل بار زیرزمینی شهری عمل کند و انتقال جزئی بار سطحی به قلمرو زیرزمینی را تسهیل کند. به طور هم‌زمان، می‌تواند از ظرفیت مازاد مترو در ساعات کم‌بار استفاده کند و در کنار فروش بلیت، درآمد بیشتری برای شرکت‌های مترو ایجاد کند. در این پژوهش مسئله توزیع مشارکتی کامیون و مترو با در نظر گرفتن تقاضای تقسیم‌شده متغیر برای اولین بار ارائه شده است. در نظر گرفتن استراتژی تقاضای تقسیم‌شده، با توجه به اینکه این تصمیم از ناحیه تصمیم ظرفیت است بیشترین اثر را از بین اهداف عملکردی کیفیت، هزینه، سرعت عمل، انعطاف‌پذیری و قابلیت اعتماد بر انعطاف‌پذیری می‌گذارد. در واقع در نظر گرفتن تقاضای تقسیم‌شده متغیر این امکان را در اختیار مشتریان قرار می‌دهد که بتوانند سفارش‌های خود را لغو یا اضافه کنند در نتیجه باعث رضایت بیشتر مشتریان می‌شود، زیرا در دنیای واقعی به دلیل اختلالات و شرایط خاص تقاضای مشتریان همیشه ثابت و مشخص نیست و ممکن است مشتری تصمیم به لغو یا افزایش سفارش داشته باشد. به همین دلیل در این پژوهش تقاضای تقسیم‌شده به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود تا مشتری بتواند تقاضای خود را تغییر دهد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است درخواست یک مشتری در شرایط واقعی ممکن است از طریق یک خط مترو یا همکاری دو خط مترو تأمین شود. به طوری که به دلیل عدم قطعیت درخواست‌های مشتریان ممکن است درخواست واقعی مشتری بیشتر از درخواست پیش‌بینی شده باشد، در این شرایط اختلاف درخواست واقعی و پیش‌بینی شده باید از طریق خط مترو همکار (رقیب) تأمین شود، ادامه این پژوهش به شرح زیر سازمان‌دهی می‌شود. در بخش دوم مطالعات مرتبط با حمل‌ونقل سطحی و زیرزمینی، تقاضای تقسیم‌شده و برنامه‌ریزی مسیر بررسی می‌گردد. در بخش سوم، به تشریح و مدل‌سازی مسئله پرداخته می‌شود. در بخش چهارم روش برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح برای مدل مذکور ارائه می‌گردد. در

معرفی کردند. کیزیل ویلدیز [۱۳] یک مدل تحویل آخرین مرحله جدید را پیشنهاد کردند که چندین رویکرد و فناوری جدید را برای رسیدگی به این موضوع ترکیب می‌کند. به‌طور دقیق‌تر، پیشنهاد کردند از حمل‌ونقل عمومی به‌عنوان یک شبکه ستون فقرات که توسط نقاط خدمات خودکار، حمل‌ونقل جمعیت و انتقال پشتیبان با وسایل نقلیه بدون آلاینده‌ی تکمیل می‌شود، استفاده شود تا یک سرویس تحویل سریع کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست ارائه شود. به همین منظور، یک برنامه تصادفی دومرحله‌ای و یک الگوریتم شاخه و قیمت برای حل آن به کار بردند. علاوه بر این، بسیاری از محققان تحقیقاتی را در مورد برنامه‌ریزی مسیر تحت تحویل مشارکتی انجام داده‌اند. حسن‌پور و همکاران [۱۴] با بررسی سیستم‌های حمل‌ونقل چندوجهی به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل ترکیبی باعث افزایش چابکی و کاهش هزینه‌های سیستم حمل‌ونقل می‌شود. ژانگ و همکاران [۱۵] چارچوبی را ارائه دادند که تدارکات زیرزمینی مبتنی بر مترو را با وسایل نقلیه تحویل زمینی ترکیب می‌کند و مسیرها را در امتداد یک خط مترو بهینه می‌کند. مدل آن‌ها که با استفاده از الگوریتم‌های بهبودیافته حل شده است، از روش‌های سنتی در زمان محاسبات و کیفیت راه‌حل بهتر عمل می‌کند. این مطالعات به‌طور جمعی پتانسیل رویکردهای مشترک و چندوجهی را برای افزایش کارایی لجستیک شهری، کاهش هزینه‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی در مناطق شهری که به‌طور فزاینده‌ای شلوغ می‌شوند، برجسته می‌کنند. شیائو و همکاران [۱۶] یک مدل حمل‌ونقل ترکیبی کامیون و مترو و یک مدل بهینه‌سازی مسیر را با تمرکز بر حداقل رساندن فاصله ایجاد کردند و یک الگوریتم ژنتیک تطبیقی برای حل آن استفاده کردند. یانگ و همکاران [۱۷] یک مدل بهینه‌سازی مسیر با هدف به حداقل رساندن هزینه کل و در نظر گرفتن یک تابع جریمه برای هزینه‌های انباشته محموله به‌منظور ایجاد هماهنگی زمان حمل‌ونقل بین لجستیک زیرزمینی و سطحی را معرفی کردند و در نهایت برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. بروزون و همکاران [۱۸] مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکرد کلیدی را برای ارزیابی بهبودهای بالقوه در عملکردهای عملیاتی، زیست‌محیطی و اجتماعی جریان‌های یکپارچه مسافر و کالا در مقایسه با طرح‌های حمل‌ونقل فعلی پیشنهاد کردند. چنگ و همکاران [۱۹] یک بررسی جامع با تمرکز بر عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل یکپارچه افراد و کالاها و تصمیمات و مشکلات فرعی حیاتی مرتبط انجام دادند. در این پژوهش اشکال مختلف عملی که در آن افراد و کالاها به‌صورت یکپارچه حمل‌ونقل می‌شوند، شناسایی شدند و تصمیمات حیاتی مرتبط با هر فرم و مشکل فرعی، همراه با مدل‌های مربوطه و رویکردهای حل مورد بحث قرار دادند. گونگ و همکاران [۲۰] مروری

بر مطالعات مرتبط با طراحی پایدار و مدیریت عملیات سامانه‌های لجستیک زیرزمینی مبتنی بر مترو انجام دادند. آن‌ها دریافتند که سیستم لجستیک زیرزمینی با به اشتراک گذاشتن امکانات شبکه حمل‌ونقل ریلی، حمل‌ونقل پایدار مسافر و بار در داخل شهرها به‌طور مشترک امکان‌پذیر می‌کند. لی و همکاران [۲۱] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای به حداقل رساندن مجموع وزنی هزینه واحد قطار عملیاتی، هزینه سفر مسافر و هزینه سفر بار ارائه کردند. همچنین نشان دادند که تعداد واحدهای قطار باید با در نظر گرفتن تعادل بین کیفیت خدمات مسافری و حجم تقاضای بار به‌دقت تعیین شود. نجفی و همکاران [۲۲] بررسی کردند که حمل‌ونقل لجستیک زیرزمینی^۱ (ULT) از نظر مالی مقرون‌به‌صرفه‌تر، سبب‌تر و امکان‌پذیرتر است و می‌تواند به بخش مهمی از تحرک حمل‌ونقل بین وجهی تبدیل شود. لین و ژانگ [۲۳] پتانسیل یکپارچه‌سازی وسایل نقلیه مازولار را در یک سیستم حمل‌ونقل مشترک که هم به مسافران و هم به کالا خدمات می‌دهد را بررسی کردند. آن‌ها برای به حداقل رساندن هزینه‌های انتظار مسافر و هزینه‌های عملیاتی وسیله نقلیه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه دادند. لی و همکاران [۲۴] همکاری در یک مسئله توزیع و تحویل چند به چند مشارکتی دوطبقه با تعادل بارکاری را بررسی کردند.

درور و ترادیا [۶] مسئله مسیریابی خودرو با تقاضای تقسیم‌شده را در این مطالعه معرفی کردند که با اجازه دادن به چندین وسیله نقلیه برای خدمت به یک ایستگاه مقصد، با مسئله مسیریابی خودرو کلاسیک متفاوت است. سهم اصلی این مقاله در نشان دادن پتانسیل صرفه‌جویی در هزینه از طریق تحویل تقسیم‌شده است. صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه هم از نظر مسافت کلی و هم از نظر تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز انجام می‌شود. آرتی چی و همکاران [۲۵] محیط‌های توزیع را مشخص کردند که در آن‌ها اجازه دادن به تحویل تقسیم‌بندی احتمالاً مفید است. آن‌ها از طریق یک مطالعه تجربی نشان دادند که بیشترین مزایای زمانی حاصل می‌شود که میانگین تقاضای مشتری کمی بیشتر از نیمی از ظرفیت خودرو باشد و واریانس تقاضای مشتری نسبتاً کم باشد. نوواک و همکاران [۲۶] دریافتند که مزایای بارهای تقسیم‌شده بیشتر به سه ویژگی مرتبط است: اندازه بار، هزینه مربوط به تحویل و فرکانس بارها با مبدأ یا مقصد مشترک. پژوهش حاضر حالت تحویل مشارکتی مترو و کامیون^۲ (MTC) بر اساس مسیریابی تقاضای تقسیم‌شده تمرکز دارد و هدف آن طراحی مسیرهای بهینه برای دستیابی به کمترین هزینه توزیع است. در این فرآیند توزیع، وسایل نقلیه اجازه دارند چندین بار

^۱ Underground Logistics Transportation

^۲ Metro and Truck Cooperative

از ایستگاه‌های مقصد بازدید کنند و نیازی به بازگشت به نقطه عزیمت اصلی ندارند. در مقابل، آن‌ها می‌توانند مراکز توزیع فیزیکی یا نقاط انتقال مترو را انتخاب کنند. درحالی‌که مطالعات قبلی بر امکان‌سنجی و کارایی توزیع لجستیکی مبتنی بر مترو و مزایای آن متمرکز شده‌اند، تحقیقات محدودی در مورد بهینه‌سازی توزیع

مشترک شامل مترو و کامیون وجود دارد. تحقیقات بیشتر برای بررسی هماهنگی زمان‌های حمل‌ونقل بین لجستیک زیرزمینی و لجستیک سطحی و همچنین مزایای حاصل از توزیع مشترک برای شرکت‌های مترو مورد نیاز است.

جدول (۱): خلاصه مقالات ادبیات تحقیق

نویسنده و سال انتشار	تابع هدف	کامیون	مترو	تقاضای تقسیم‌شده	تقاضای تقسیم‌شده متغیر	عدم قطعیت	روش حل
لی و همکاران [۳]	حداقل کردن هزینه	*	*	*			الگوریتم جستجوی فاخته
کیان [۸]			*				
هی و همکاران [۹]			*				
آرچتی و همکاران [۲۵]	حداقل کردن هزینه	*		*			الگوریتم جستجوی ممنوع
ژانگ و همکاران [۱۵]	حداقل کردن هزینه	*	*				الگوریتم ذخیره و الگوریتم جستجوی ممنوع بهبودیافته
کیک و تا و همکاران [۱۱]	حداقل کردن تأخیر تحویل	*	*				
دونگ و همکاران [۱۲]	حداقل کردن هزینه		*				E-TOPSIS
کیزیل و یلدیز [۱۳]	حداقل کردن هزینه		*				الگوریتم شاخه و قیمت
یانگ و همکاران [۱۷]	حداقل کردن هزینه	*	*				الگوریتم ژنتیک
لی و همکاران [۲۱]	حداقل کردن هزینه کل		*				الگوریتم شاخه و کران
لین و ژانگ [۲۳]	حداقل کردن هزینه کل		*				الگوریتم تجزیه دومارحله‌ای
لی و همکاران [۲۴]	حداقل کردن هزینه کل	*					ترکیب الگوریتم شاخه و کران و الگوریتم جستجوی همسایگی تطبیقی بزرگ
درور و ترویدا [۶]	حداقل کردن هزینه	*		*			تحلیل مقایسه‌ای
آرچتی و همکاران [۲۵]	حداقل کردن هزینه کل	*		*			گمز
نوواک و همکاران [۲۶]	حداقل کردن هزینه	*		*			روش ابتکاری
پژوهش حاضر	حداقل کردن هزینه	*	*	*	*	*	روش برنامه‌ریزی تصادفی دومارحله‌ای

محموله‌های مراکز توزیع از طریق ورودی مترو نزدیک به مرکز توزیع وارد می‌شوند. سپس قطار مترو آن‌ها را به خروجی می‌فرستد و در نهایت به هر ایستگاه مقصد تحویل داده می‌شود. در اینجا برای ایجاد هماهنگی بیشتر یک پنجره زمانی نرم برای حرکت مترو در نظر گرفته شده است به‌طوری که اگر مترو در بازه زمانی مشخص شده به مقصد نرسد ملزم به پرداخت جریمه خواهد شد. علاوه بر این، هزینه ثابت کامیون که مرتبط با هزینه خرید کامیون است بر اساس تعداد کامیون مورد استفاده در نظر گرفته می‌شود. در واقع برای به حداقل رساندن هزینه حمل‌ونقل، هزینه نیروی کار و هزینه جریمه پنجره زمانی فرایند کلی توزیع، تعیین تعداد و مکان بهینه نقاط انتقال و برنامه‌ریزی مسیرهای تحویل بهینه ضروری است. در این پژوهش به‌منظور افزایش رضایت مشتریان تقاضا درخواست‌کننده‌ها به‌صورت تقسیم‌شده تحویل می‌شود، در واقع تقاضا از طریق خطوط مختلف تأمین می‌شود. با توجه به اینکه در شرایط واقعی به دلیل عدم قطعیت‌ها یا اختلال‌هایی که ممکن است رخ دهد تقاضای مشتریان متفاوت خواهد بود، در ابتدا تقاضای مقصد با توجه به ظرفیت استفاده‌شده کامیون و مترو پیش‌بینی شده است. در این شرایط با توجه به مقدار درخواست واقعی هر درخواست‌کننده سه حالت برای میزان ارسال به محل مشتری به وجود می‌آید، در حالت اول اگر تقاضای پیش‌بینی شده کمتر از مقدار درخواست واقعی باشد به میزان درخواست واقعی ارسال می‌شود، در حالت دوم که درخواست واقعی و پیش‌بینی شده برابر هستند، مقدار درخواست واقعی ارسال می‌شود، در حالت سوم که درخواست واقعی از مقدار درخواست پیش‌بینی شده بیشتر است، با توجه به اینکه درخواست پیش‌بینی شده بر اساس ظرفیت کامیون و خط مترو موجود بوده است، باید میزان اختلاف مقدار درخواست پیش‌بینی شده و درخواست واقعی در این حالت از طریق خط مترو همکار (رقیب) تأمین شود.

۳-۱- فرضیات

فرضیات مدل به شرح ذیل است:

- محل هر ایستگاه مقصد از قبل مشخص است.
- مکان‌های ورودی و خروجی مترو طبق قوانین خاصی انتخاب می‌شوند و همه می‌توانند برای نگهداری و انتقال موقت کالا استفاده شوند.
- برنامه مترو مشخص است و فرکانس ثابت است.
- یک محموله کالا در خط معین مترو بر اساس مقصد مربوطه مرتب می‌شود. محموله بعدی تا پایان تحویل قبلی سازمان‌دهی نمی‌شود.

به این منظور از علائم زیر در مدل‌سازی استفاده خواهد شد:

همان‌طور که از بررسی ادبیات در جدول (۱) مشاهده می‌شود پژوهش‌های اندکی به بررسی سیستم توزیع کامیون و مترو پرداخته‌اند و از بین آن‌ها تنها پژوهش لی و همکاران [۳] تقاضای تقسیم‌شده را در نظر گرفته است. در این پژوهش به‌منظور ارائه خدمات سریع و منعطف به مشتریان و در نتیجه افزایش رضایت مشتریان تقاضای تقسیم‌شده پویا در نظر گرفته شده است که این درخواست‌های متغیر برای مشتریان امکان لغو و یا افزایش سفارش‌ها را فراهم می‌کند. در واقع در نظر گرفتن این شرایط به‌خصوص در سامانه توزیع مشارکتی که هماهنگی آن برای تحویل درخواست‌ها اهمیت بسزایی دارد به مشتریان این امکان را می‌دهد که در شرایطی که مایل به تغییر درخواست خود هستند، بتوانند درخواست خود را به‌روز کنند. همچنین با توجه به مزایای در نظر گرفتن تقاضا به‌صورت تقسیم‌شده تنها در پژوهش لی و همکاران [۳] این مورد در سامانه توزیع مشارکتی لحاظ شده است. با توجه به اینکه در همه تحقیقاتی که تقاضا به‌صورت تقسیم‌شده در نظر گرفته شده است فرض کرده‌اند که تقاضا قطعی و از قبل مشخص است و امکان لغو و یا افزایش درخواست برای مشتری وجود ندارد، در این پژوهش برای اولین بار درخواست‌های مشتریان به‌صورت تقسیم‌شده و متغیر در نظر گرفته شده است؛ که به‌نوعی نوآوری این پژوهش محسوب می‌شود و به شرح زیر است:

- در نظر گرفتن تقاضای تقسیم‌شده متغیر
- مدل‌سازی تقاضای تقسیم‌شده متغیر در سیستم توزیع مشارکتی
- استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای حل مسئله مورد بررسی

۳- تشریح و مدل‌سازی مسئله

در حالت سنتی تمام بار توسط کامیون از مراکز توزیع به ایستگاه‌های مقصد (محل مشتری) حمل می‌شود. در این پژوهش مانند خط ۱ و ۲ مترو شهر چانگچون به‌منظور خدمت‌رسانی سریع‌تر شبکه حمل‌ونقل ریلی با شبکه توزیع لجستیک شهری یکپارچه شده است. در واقع با انتخاب نقاط انتقال مناسب در داخل شبکه مترو، بخشی از درخواست‌ها که از مراکز توزیع سرچشمه می‌گیرند از طریق مترو به مقصد منتقل می‌شوند، درحالی که مابقی مستقیماً توسط کامیون‌ها تحویل داده می‌شوند. ورودی مترو در نزدیکی مرکز توزیع به‌عنوان ورودی مترو تعیین شده است، درحالی که تمام ایستگاه‌های مترو، به‌استثنای ورودی‌ها، به‌عنوان نامزد خروجی‌ها در نظر گرفته می‌شوند. تصمیمات مربوط به انتخاب مکان‌های خروجی مترو عمدتاً تحت تأثیر توزیع تقاضای حمل‌ونقل در مجاورت آن‌ها است. توزیع مشارکتی کامیون - مترو را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد. خطوط مترو، m مرکز توزیع و n ایستگاه مقصد وجود دارد. در ابتدا،

۳-۲- مجموعه‌ها

N : مجموعه تمام گره‌ها (مراکز توزیع، ایستگاه‌های مترو، ایستگاه‌های مقصد)

N_D : مجموعه مراکز توزیع

N_e : مجموعه ورودی‌های مترو

N_c : مجموعه‌ای از خروجی‌های مترو

N_k : مجموعه‌ای از ایستگاه‌های مقصد

N_{vk} : مجموعه ایستگاه‌های مقصد کامیون v در یک مسیر

R : مجموعه‌ای از خطوط مترو

V : مجموعه کامیون‌ها

C : مجموعه ایستگاه‌های مترو

S : مجموعه سناریوها

۳-۳- پارامترها

Q_v : ظرفیت کامیون

Q_r : ظرفیت مترو

m : تعداد کامیون

n : تعداد ایستگاه‌های مقصد

v : میانگین سرعت مترو

t : زمان اقامت قطار

d_{ec}^r : فاصله از ورودی مترو تا خروجی

M : یک عدد صحیح مثبت بزرگ

d_{ij}^v : فاصله بین گره i و j که توسط کامیون v طی می‌شود.

d_{ij}^r : فاصله بین گره i و j که توسط مترو r طی می‌شود.

۳-۵- مدل ریاضی

در این بخش با الگوبرداری از مدل لی و همکاران [۳] سعی خواهد شد فرمول‌بندی جدید ارائه گردد.

$$\text{Minf}(c) = c_{11} \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^v d_{ij}^v + c_{12} \sum_{v \in V} x_v + \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_p \sum_{r \in R} \sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_k} \max(E_i - T_i^r, 0) y_{rj} s_j y_{ij} + \theta \max(T_i^r - L_i, 0) + \\ & \sum_{r \in R} \sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_k} m_{ij} g s_j d_{ec}^r \\ & + c_{41} \sum_{r \in R} \frac{d_{ec}^r}{v} + c_{42} \sum_{r \in R} \sum_{j \in N_k} y_{rj} s_j \end{aligned}$$

$$T_j^r = T_i^r + \frac{d_{ij}^r}{v} + \sum t$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_k} x_{ij}^v s_j^v \leq Q_v$$

$$\forall r \in R, i \leq j \quad (2)$$

$$\forall v \in V, \forall N_{vk}, k \in [0, n] \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_k} \sum_{r \in R} y_{rj} s_j \leq Q_r \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N_D \cup N_C} x_{ij}^v = \sum_{v \in V} \sum_{i \in N_D \cup N_C} x_{ji}^v \quad \forall j \in N_k \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N_D \cup N_C} \sum_{j \in N_k} x_{ij}^v = \sum_{i \in N_D \cup N_C} \sum_{j \in N_k} x_{ji}^v \quad \forall v \in V \quad (6)$$

$$d_{ec}^r = M \quad \forall e \in I_r \quad (7)$$

$$1 \leq \sum_{v \in V} \sum_{i \in N_D \cup N_C} x_{ij}^v \leq 2 \quad \forall j \in N_k \quad (8)$$

$$\sum_{v \in V} x_v \leq m \quad (9)$$

$$\sum_{v \in V} s_j^v = s_j \quad \forall j \in N_k \quad (10)$$

$$s_j^v > 0 \quad \forall j \in N_k, v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in N_k} y_{rj} \geq 1 \quad (12)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, v \in V \quad (13)$$

$$y_{rj} \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, j \in N_k \quad (14)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N_C, j \in N_k \quad (15)$$

$$x_v \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V \quad (16)$$

سکو مترو و جابه‌جایی کالا را برعهده دارد و از ایمنی حمل‌ونقل کالا در طول دوره وظیفه اطمینان حاصل می‌کند. عبارت (۲)، نشان‌دهنده زمان رسیدن قطار به خروجی مترو است. عبارت (۳)، نشان‌دهنده ظرفیت کامیون است. هنگامی که کامیون‌ها چندین بار خدمت می‌کنند، حجم کل تحویل ایستگاه‌های مقصد در یک مسیر خدماتی بیشتر از ظرفیت کامیون نیست. عبارت (۴)، ظرفیت حمل توسط مترو را نشان می‌دهد. عبارت (۵)، نشان می‌دهد که تعداد کامیون‌هایی که وارد یک نقطه می‌شوند برابر است با تعداد کامیون‌هایی که از آن نقطه خارج می‌شوند. عبارت (۶)، نشان می‌دهد که کامیونی که از خروجی مراکز توزیع یا مترو خارج می‌شود ممکن است به مرکز توزیع یا نزدیک‌ترین خروجی‌های مترو بازگردد. عبارت (۷)، تضمین می‌کند که کالا بدون انتقال و تنها یک‌بار جابه‌جایی بدون بارگیری و تخلیه ثانویه حمل می‌شود. عبارت (۸)، نشان می‌دهد که هر ایستگاه مقصد یک یا دو بار بازدید می‌شود. عبارت (۹)، محدودیت تعداد کامیون‌های موجود است. عبارت (۱۰)، نشان می‌دهد که تقاضای ایستگاه مقصد باید برآورده شود. عبارت (۱۱)، نشان می‌دهد که مقدار توزیع کامیون به ایستگاه مقصد بیشتر از ۰ است. عبارت (۱۲)، نشان می‌دهد که تقاضا برای ایستگاه‌های مقصد می‌تواند توسط چندین خط مترو تقسیم شود. عبارت (۱۳) تا (۱۶) وضعیت متغیرها را نشان می‌دهد.

در مدل مورد نظر عبارت (۱)، نشان‌دهنده تابع هدف که حداقل کردن هزینه‌های ثابت و متغیر است و به ترتیب شامل هزینه‌های ثابت و متغیر کامیون، هزینه جریمه پنجره زمانی و انباشته شدن کالا، هزینه عملیات حمل‌ونقل مترو و هزینه نیروی کار است. این مطالعه اجرای یک پنجره زمانی نرم را پیشنهاد می‌کند که در صورت رسیدن مسیر فرعی در چارچوب زمانی تعیین‌شده، هیچ هزینه اضافی دریافت نمی‌شود. با این حال، در صورت عدم رسیدن مترو در زمان مقرر، جریمه اعمال می‌شود. در صورت ورود زودهنگام مترو و به دنبال آن انباشته شدن کالا، هزینه انباشته شدن کالا برحسب حجم کالا و زمان انباشته شدن کالا متحمل می‌شود. برعکس، اگر مترو دیر برسد، هزینه صرفاً به مدت زمان انتظار کامیون‌ها متحمل می‌شود. فرض بر این است که تمام ایستگاه‌های مترو برای ذخیره موقت و انتقال کالا قابل اجرا هستند و هزینه زمان انتظار کامیون در ورودی‌های مترو وجود ندارد. با تجزیه و تحلیل داده‌های گذشته سفر مسافران، ظرفیت باقی‌مانده هر قطار در ساعات شلوغی به‌دست می‌آید و حمل‌ونقل بار مترو متعاقباً بر این اساس سازمان‌دهی می‌شود. خدمات توزیع از طریق واگن‌های مسافری تعیین شده انجام می‌شود، درحالی‌که برنامه اولیه مترو بدون تغییر باقی می‌ماند. حجم گردش حمل‌ونقل مترو به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری برای محاسبه هزینه عملیات حمل‌ونقل شرکت مترو عمل می‌کند. در فرایند انتقال مترو، یک باربر محموله (حمل‌کننده بار) وظیفه حمل کالا از سطح به

۴- برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح

$$\text{Min } z = \phi^T x + \sum_s \pi_s \cdot Q(x, \xi_s)$$

$$s.t. Ax=B$$

$$\Gamma_s x + w_s y_s = \rho_s$$

$$x \geq 0, y \geq 0$$

در رابطه بالا فرض می‌کنیم ξ گسسته و تابعی از S در نظر گرفته می‌شود $S = 1, 2, 3, \dots$ مجموعه‌ای متناهی از سناریوهای ممکن است، به‌طوری‌که هر سناریو بیانگر حالتی از پارامترهای تصادفی است، احتمال وقوع S امین ξ با π_s در نظر گرفته می‌شود $(\sum_{s=1}^S \pi_s = 1)$ [۲۷]. در ادامه و با استفاده از پارامترها و متغیرهای تعریف‌شده در ذیل، مدل غیرقطعی مسئله مورد نظر ارائه خواهد شد:

$$p_s: \text{احتمال رخ دادن سناریو } S$$

$$cm_{js}^r: \text{هزینه تأمین درخواست مقصد } j \text{ در سناریو } S \text{ از خط مترو } r$$

$$sa_{js}: \text{درخواست واقعی مقصد } j \text{ در سناریو } S$$

$$sf_{jj}: \text{درخواست پیش‌بینی شده مقصد } j$$

$$z_s: \text{حجم تحویل مقصد } j \text{ در سناریو } S$$

$$Mo_{js}^r: \text{مقداری از درخواست مقصد } j \text{ در خط مترو } r \text{ که در سناریو } S \text{ از طریق خطوط دیگر تأمین می‌شود.}$$

$$V_{js}: \text{متغیر باینری در صورتی‌که از لاین } r \text{ ایستگاه مترو به محل درخواست } j \text{ در سناریو } S \text{ کالا ارسال شود } 1 \text{ در غیر این صورت } 0 \text{ می‌شود.}$$

بنا بر فرضیات مسئله میزان درخواست مقصد به دلیل اختلال یا تغییر درخواست مشتریان به‌صورت غیرقطعی و با توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده است، بنابراین، دیگر نمی‌توان از روش‌های قطعی برای حل مسئله استفاده نمود، زیرا روش‌های قطعی ممکن است نتوانند در زمان معقول، جواب مناسب برای مسائل غیرقطعی به‌دست آورند. از این رو برای مواجهه با عدم قطعیت موجود به دلیل مشخص بودن نوع توزیع عدم قطعیت از روش برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح، برخی متغیرها در مرحله یک یا مرحله دو یا هر دو مرحله عدد صحیح هستند. فرموله‌سازی یک برنامه عدد صحیح دومرحله‌ای مشابه فرموله‌سازی برنامه خطی دومرحله‌ای است. مسئله برنامه‌ریزی خطی تصادفی با بازگشت ثابت به‌صورت زیر فرموله می‌شود، [۲۷]:

$$[Minz = \phi^T x + E_{\xi} [Min q(\omega)^T y(\omega)]]$$

$$s.t. Ax=B$$

$$\Gamma(\omega) x + w y(\omega) = \rho(\omega)$$

$$x \in X, y(\omega) \in Y$$

Φ برداری مشخص و قطعی، B برداری قطعی و Q بردار ضرایب است. W, Γ و ρ ماتریس ضرایب هستند که ممکن است به متغیرهای تصادفی ω وابسته و تابعی از آن باشند. در مدل بالا، x یا y یا هر دو شامل برخی الزامات عدد صحیح یا دودویی بر روی x یا y هستند. با این تعریف، مجدد برنامه معادل قطعی مدل بالا به شکل زیر تعریف می‌شود:

۴-۱- مدل غیرقطعی

در این بخش ابتدا مدل غیرخطی و سپس مدل خطی ارائه می‌گردد.

$$\text{Min } f(c) = c11 \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^v d_{ij}^v + c12 \sum_{v \in V} x_v + \quad (17)$$

$$p_s (\epsilon_p \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_k} \max(E_i - T_i^r, 0) y_{rj} s_{js} y_{ij} + \theta \max(T_i^r - L_i, 0) + \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_k} r$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} cm_{js}^r Mo_{js}^r)$$

$$T_j^r = T_i^r + \frac{d_{ij}^r}{v} + \sum t \quad \forall r \in R, i \leq j \quad (18)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_k} x_{ij}^v s_j^v \leq Q_v \quad \forall v \in V, \forall N_{vk}, k \in [0, n] \quad (19)$$

$$\sum_{j \in N_k} \sum_{r \in R} y_{rj} s_{js} \leq Q_r \quad (20)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N_D \cup N_c} x_{ij}^v = \sum_{v \in V} \sum_{i \in N_D \cup N_c} x_{ji}^v \quad \forall j \in N_k \quad (21)$$

$$\sum_{i \in N_D \cup N_c} \sum_{j \in N_k} x_{ij}^v = \sum_{i \in N_D \cup N_c} \sum_{j \in N_k} x_{ji}^v \quad \forall v \in V \quad (22)$$

$$d_{ec}^r = M \quad e \in I_r, c \notin I_r \quad (23)$$

$$1 \leq \sum_{v \in V} \sum_{i \in N_D \cup N_c} x_{ij}^v \leq 2 \quad \forall j \in N_k \quad (24)$$

$$\sum_{v \in V} x_v \leq m \quad (25)$$

$$\sum_{v \in V} s_j^v = s_{js} \quad \forall j \in N_k \quad (26)$$

$$s_j^v > 0 \quad \forall j \in N_k, v \in V \quad (27)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in N_k} y_{rj} \geq 1 \quad (28)$$

$$s_{js} = \begin{cases} s_{ajs} & \text{if } s_{ajs} < sf_{fj} \\ sf_{fj} & \text{if } s_{ajs} = sf_{fj} \\ Mo_{js}^r + sf_{fj} & \text{if } s_{ajs} > sf_{fj} \end{cases} \quad \forall j \in N_k, s \in S \quad (29)$$

$$(s_{ajs} - sf_{fj}) y_{js}^r = Mo_{js}^r \quad \forall j \in N_k, s \in S, r \in R \quad (30)$$

$$s_{ajs} + M(1 - y_{js}^r) \geq sf_{fj} \quad \forall j \in N_k, s \in S, r \in R \quad (31)$$

$$s_{ajs} - M y_{js}^r \leq sf_{fj} \quad \forall j \in N_k, s \in S, r \in R \quad (32)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, v \in V \quad (33)$$

$$y_{rj} \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, j \in N_k \quad (34)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N_c, j \in N_k \quad (35)$$

$$x_v \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V \quad (36)$$

$$y_{js}^r \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S \quad (37)$$

$$s_{js} \geq 0 \quad \forall j \in N_k, s \in S \quad (38)$$

عبارت (۳۰)، مقدار تقاضای تأمین شده مقصد j از طریق خطوط دیگر را نشان می‌دهد. عبارات (۳۱) و (۳۲)، شرایط تأمین از طریق خطوط دیگر را نشان می‌دهند. عبارات (۳۳) تا (۳۸) وضعیت متغیرها را نمایش می‌دهند.

در مدل مورد نظر عبارات (۲۸) تا (۱۷) همان تفسیر عبارات (۱) تا (۱۲) را با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا دارند. درحالی‌که عبارت (۲۹)، درخواست هر مقصد را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

۴-۲- مدل خطی

برای خطی‌سازی مدل مذکور از پژوهش توکلی مقدم و همکاران [۲۸] استفاده شده است.

$$\text{Minf}(c) = c_{11} \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^v d_{ij}^v + c_{12} \sum_{v \in V} x_v + \rho_s \left(\varepsilon \rho \sum_{r \in R} \sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_k} \max_{t \in T} v_{rjs} + \theta \max_{t \in T} l_{ir} + \sum_{r \in R} \sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_k} m_{ij} g_{js} d_{ec}^r \right) + c_{41} \sum_{r \in R} \frac{d_{ec}^r}{v} + c_{42} \sum_{r \in R} \sum_{j \in N_k} \lambda_{rjs} \quad (39)$$

$$\sum_{j \in N_k} \sum_{r \in R} \lambda_{rjs} \leq Q_r \quad \forall s \in S \quad (40)$$

$$\lambda_{rjs} \leq S_{js} \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S \quad (41)$$

$$\lambda_{rjs} \leq M \cdot y_{rj} \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S \quad (42)$$

$$\lambda_{rjs} \geq S_{js} - M(1 - y_{rj}) \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S \quad (43)$$

$$y_{rjs} \leq \lambda_{rjs} \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S, i \in I \quad (44)$$

$$y_{rjs} \leq M \cdot y_{ij} \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S, i \in I \quad (45)$$

$$y_{rjs} \geq \lambda_{rjs} - M(1 - y_{ij}) \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S, i \in I \quad (46)$$

$$\max_{t \in T} i_r \geq E_i \quad \forall r \in R, i \in I \quad (47)$$

$$\max_{t \in T} i_r \geq T_i^r \quad \forall r \in R, i \in I \quad (48)$$

$$\max_{t \in T} l_{ir} \geq T_i^l \quad \forall r \in R, i \in I \quad (49)$$

$$\max_{t \in T} l_{ir} \geq l_i \quad \forall r \in R, i \in I \quad (50)$$

$$y_{rjs}, \lambda_{rjs}, \max_{t \in T} l_{ir}, \max_{t \in T} i_r \geq 0 \quad \forall r \in R, j \in N_k, s \in S, i \in I \quad (51)$$

کالاها به ۱۰ مقصد مشخص شده منتقل می‌شوند. با توجه به مدل مورد نظر درخواست مشتری می‌تواند نسبت حالت پیش‌بینی شده متغیر باشد. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده درحالی که تقاضای واقعی مشتری کمتر از تقاضای پیش‌بینی شده باشد (سناریو ۱)، به اندازه درخواست واقعی مشتری به محل مشتری کالا ارسال می‌شود. درحالی که تقاضای واقعی مشتریان از تقاضای پیش‌بینی شده بیشتر باشد (سناریو ۳)، بخشی از تقاضا (اختلاف تقاضای واقعی و پیش‌بینی شده) از طریق خطوط دیگر تأمین می‌شود. برای حل مدل مذکور با داده‌های موجود از نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۴.۱،۲ و سولور CPLEX استفاده می‌گردد. در نهایت با تغییر برخی ورودی‌های مسئله به بررسی تغییرات تابع هدف در دو حالت تقاضای ثابت و متغیر پرداخته می‌شود.

۵-۱- تولید مسائل نمونه

در این بخش در ابتدا نحوه تولید مسائل نمونه تشریح شده است. به همین منظور در این پژوهش برخی داده‌های جدول (۲،۳،۴)، از پژوهش لی و همکاران [۳] استخراج شده است. داده‌های جدول (۵)، به صورت تصادفی تولید شده‌اند.

در این مدل متغیرهای پیوسته λ_{rjs} و y_{rjs} برای خطی‌سازی ضرب سه متغیر S_{js} ، y_{rj} و y_{ij} استفاده شده است. تابع هدف (۱) بعد از خطی‌سازی به صورت عبارت (۳۹)، بازنویسی شده است. عبارت (۲۰)، بعد از خطی‌سازی به صورت عبارت (۴۰)، بازنویسی شده است. از متغیر λ_{rjs} برای خطی‌سازی ضرب متغیر پیوسته S_{js} در متغیر باینری y_{rj} طبق عبارت (۴۱) تا (۴۳) استفاده شده است. از متغیر پیوسته y_{rjs} برای خطی‌سازی ضرب متغیر پیوسته λ_{rjs} در متغیر باینری y_{ij} طبق عبارات (۴۴) تا (۴۶) استفاده شده است. برای خطی‌سازی توابع حداکثر سازی در تابع هدف از متغیرهای پیوسته $\max_{t \in T} i_r$ و $\max_{t \in T} l_{ir}$ طبق روابط عبارات (۴۷) تا (۵۰) استفاده شده است. عبارت (۵۱)، وضعیت متغیرها را نشان می‌دهد.

۵- نتایج عددی

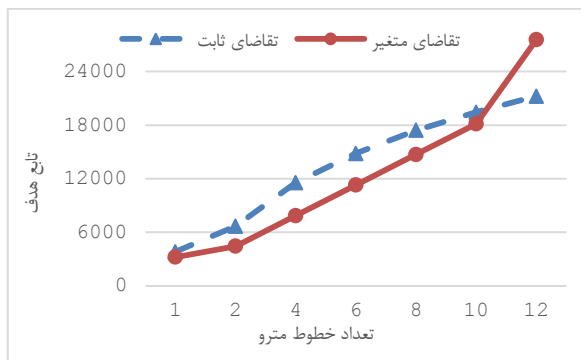
در این بخش ابتدا یک مثال عددی حل می‌گردد سپس به تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. در مثال مورد نظر فرض شده است که با استفاده از ۳ کامیون، ۲ خط مترو در دو ایستگاه مترو از ۲ مرکز توزیع کالاها وارد ورودی‌های مترو می‌شوند، از طریق خطوط مترو

جدول (۵): مقدار درخواست واقعی محل j تحت سناریوهای متفاوت

سناریو (۵) محل درخواست (j)	S1	S2	S3
۱۰	۲	۳	۵
۱۱	۴	۵	۶
۱۲	۵	۶	۷
۱۳	۳	۴	۶
۱۴	۱	۱	۵
۱۵	۱	۱	۴
۱۶	۳	۴	۵
۱۷	۴	۵	۵
۱۸	۱	۲	۷
۱۹	۲	۲	۵
۲۰	۱	۳	۵

۵-۲- نتایج عددی و تحلیل

با توجه به مدل مورد نظر درخواست مشتری می‌تواند نسبت به حالت پیش‌بینی شده متغیر باشد. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در صورتی که تقاضای واقعی مشتری کمتر از تقاضای پیش‌بینی شده باشد (سناریو ۱)، به اندازه درخواست واقعی مشتری به محل مشتری کالا ارسال می‌شود. در صورتی که تقاضای واقعی مشتریان از تقاضای پیش‌بینی شده بیشتر باشد (سناریو ۳)، بخشی از تقاضا (اختلاف تقاضای واقعی و پیش‌بینی شده) از طریق خطوط دیگر تأمین می‌شود. همچنین از نتایج گمز مشخص شده است که هزینه کل که شامل هزینه‌های ثابت و متغیر کامیون، هزینه جریمه پنجره زمانی، هزینه انباشته شدن کالا برحسب حجم کالا، هزینه عملیات حمل-ونقل مترو و هزینه نیروی کار در این شرایط ۴۴۳۹/۵۳۴ محاسبه شده است. در این بخش با تغییر برخی ورودی‌های مسئله به بررسی تغییرات تابع هدف در دو حالت تقاضای ثابت و متغیر پرداخته می‌شود.



شکل (۲): اثر افزایش تعداد خطوط مترو بر مقدار تابع هدف در حالت

تقاضای ثابت و متغیر

جدول (۲): پارامترهای مسئله

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Qr	۳۰	$C42$	۳
Qv	۶	ε	۱/۱
V	۶۰	ρ	۰/۱
$C11$	۵	θ	۰/۲
$C12$	۱۰۰	G	۳
$C41$	۱۵	T	(۱/۵, ۲/۵)
P_s	(۰/۳۳, ۰/۳۳, ۰/۳۳)	cm_{js}^r	(۸۰, ۱۰۰)

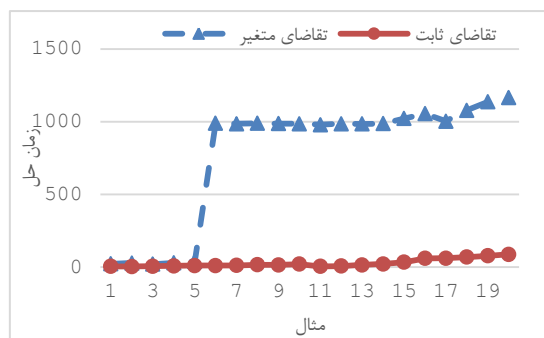
جدول (۳): اطلاعات خطوط مترو

خط مترو	خروجی مترو	پنجره زمانی خروجی مترو	فاصله بین ورودی و خروجی مترو	زمان رسیدن به خروجی مترو
۱	C	۹/۱۵ - ۹/۲۰	۱۵/۴	۱۸/۲
	D	۹/۲۵ - ۹/۳۰	۲۳/۶	۲۸/۶
	E	۹/۱۰ - ۹/۱۵	۸/۲	۱۲/۷
۲	F	۹/۲۰ - ۹/۲۵	۱۳/۱	۲۲/۵
	G	۹/۴۰ - ۹/۴۵	۲۴/۶	۴۲/۲
	H	۹/۵۰ - ۱۰	۱۸/۵	۳۵/۶

جدول (۴): اطلاعات مکان گره‌ها

گره	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میزان تحویل پیش‌بینی شده
۱	۱۲۵/۴۹۵	۴۳/۹۲۶	-
۲	۱۲۵/۴۱۵	۴۳/۷۷۸	-
۳	۱۲۵/۲۶۵	۴۳/۸۱۲	-
۴	۱۲۵/۳۹۰	۴۳/۸۹۲	-
۵	۱۲۵/۲۹۹	۴۳/۸۸۳	-
۶	۱۲۵/۳۵۵	۴۳/۹۲۷	-
۷	۱۲۵/۴۰۴	۴۳/۹۱۸	-
۸	۱۲۵/۴۳۸	۴۳/۹۰۱	-
۹	۱۲۵/۳۱۵	۴۳/۷۹۹	-
۱۰	۱۲۵/۳۰۰	۴۳/۷۹۵	۲
۱۱	۱۲۵/۳۱۶	۴۳/۹۴۰	۴
۱۲	۱۲۵/۳۲۱	۴۳/۹۳۴	۵
۱۳	۱۲۵/۴۱۵	۴۳/۸۸۳	۳
۱۴	۱۲۵/۳۴۸	۴۳/۹۲۷	۱
۱۵	۱۲۵/۳۵۳	۴۳/۹۱۸	۱
۱۶	۱۲۵/۴۲۷	۴۳/۹۴۰	۳
۱۷	۱۲۵/۴۱۵	۴۳/۷۸۷	۴
۱۸	۱۲۵/۲۲۴	۴۳/۸۲۳	۱
۱۹	۱۲۵/۲۸۲	۴۳/۷۷۸	۲
۲۰	۱۲۵/۳۸۹	۴۳/۸۹۲	۱

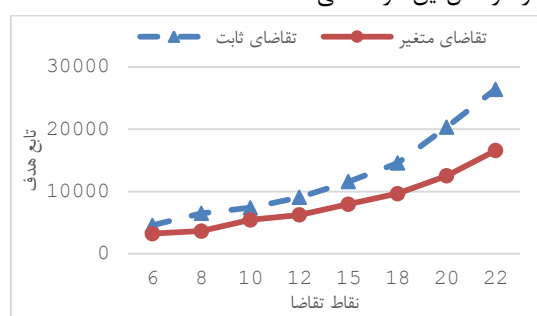
درخواست اضافی مشتری را تحویل دهد که این امر باعث افزایش هزینه حمل و نقل می‌گردد. با توجه به اینکه تغییر ابعاد مسئله بر زمان حل مسئله نیز تأثیر می‌گذارد. در شکل (۴) به بررسی اثر افزایش ابعاد مسئله بر زمان حل در دو حالت درخواست‌های ثابت و متغیر پرداخته شده است.



شکل (۴): اثر افزایش ابعاد مسئله در زمان حل مسئله در دو حالت درخواست‌های ثابت و متغیر

از شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد مسئله در هر دو حالت درخواست‌های ثابت و متغیر زمان حل مسئله افزایش می‌یابد. در حالت درخواست‌های متغیر میزان افزایش زمان حل نسبت به حالت درخواست‌های ثابت بیشتر است که با توجه به رفتار مدل منطقی است. همچنین برای بررسی رفتار مدل در دو حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر از آزمون‌های آماری در سطح معناداری $\alpha = 0.05$ استفاده نموده‌ایم. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف در نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. مقدار P-value هر دو حالت مسئله در جدول (۷) بیشتر از ۰/۰۵ است (عدم رد فرض صفر)، بنابراین، می‌توان بیان کرد که داده‌ها در دو حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر دارای توزیع نرمال می‌باشند. با توجه به برقراری آزمون نرمال مقادیر هدف نیاز است، فرض دوم یعنی تحلیل واریانس‌ها مورد بررسی قرار گیرد. جهت بررسی برابری واریانس‌ها از آزمون Levene در نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. نتایج این آزمون در جدول (۸) نشان داده شده است. مقدار P-value این آزمون بیشتر از سطح معناداری ۰/۰۵ است. با توجه به نتایج این آزمون واریانس داده‌ها در هر دو حالت تقاضای تقسیم‌شده متغیر و ثابت با یکدیگر برابر هستند. به دلیل برقرار بودن آزمون برابری واریانس، از آزمون t زوجی یا جفت شده استفاده شده است. نتایج این آزمون در جدول (۹) نشان داده شده است. مقدار P-value این آزمون بیشتر از ۰/۰۵ است. لذا فرض صفر رد نمی‌شود. پس تفاوت معناداری بین مقدار تابع هدف در دو حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر وجود دارد. از این آزمون نتیجه می‌گیریم که در نظر گرفتن تقاضای تقسیم‌شده متغیر، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌شود.

شکل (۲)، اثر افزایش تعداد خطوط مترو بر مقدار تابع هدف در هر دو حالت تقاضای ثابت و متغیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، در صورت وجود ۱ خط مترو مقدار تابع هدف در حالت تقاضای تقسیم‌شده متغیر و ثابت دارای اختلاف محدودی هستند. با افزایش تعداد خطوط مترو تا ۱۰ خط، مقدار تابع هدف در حالت تقاضای تقسیم‌شده متغیر نسبت به تقاضای تقسیم‌شده ثابت با شیب کمتری افزایش یافته است. در صورت وجود بیش از ۱۰ خط مترو مقدار تابع هدف در حالت تقاضای تقسیم‌شده متغیر بیشتر از مقدار تابع هدف در حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت است که با توجه به رفتار مدل این امر منطقی است.



شکل (۳): اثر افزایش تعداد نقاط تقاضا بر مقدار تابع هدف در هر دو حالت تقاضای ثابت و متغیر

شکل (۳)، اثر افزایش تعداد درخواست‌کننده‌ها بر مقدار تابع هدف در دو حالت تقاضای ثابت و متغیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مناطق درخواست‌کننده تا ۸ منطقه، مقدار تابع هدف در حالت تقاضای متغیر با شیب بسیار کمی افزایش یافته است در حالی که در حالت تقاضای ثابت، مقدار تابع هدف با شیب بیشتری افزایش یافته است. همچنین مشخص است که با افزایش تعداد مناطق درخواست‌کننده از ۱۰ به ۱۸ منطقه مقدار تابع هدف در حالت تقاضای تقسیم‌شده متغیر ۴۲ درصد و در حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت ۷۱/۴۹ درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود در صورت وجود بیش از ۱۸ درخواست‌کننده در هر دو حالت مقدار تابع هدف با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. این امر با توجه به گسترده شدن شبکه توزیع منطقی است.

در ادامه به منظور بررسی رفتار مدل در ابعاد مختلف، ۲۰ مثال در هر دو حالت درخواست ثابت و متغیر مقاصد در نرم‌افزار گمز حل و نتایج در جدول (۶) ارائه گردیده است. از این جدول مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن درخواست متغیر مقاصد هزینه کمتری نسبت به حالت درخواست ثابت دارد، زیرا در حالت درخواست متغیر در صورت اضافه بودن درخواست مقصد نسبت به مقدار پیش‌بینی شده امکان تأمین از طریق نزدیک‌ترین خط مترو وجود دارد، اما در حالت درخواست ثابت مشتری باید منتظر بماند که وسیله نقلیه درخواست‌های فعلی را تحویل و در مرحله بعد مقدار

جدول (۶): اثر تغییر ابعاد مسئله بر زمان حل

شماره مسئله	ابعاد مسئله V^*R^*J	درخواست تحویل ثابت				درخواست تحویل متغیر			
		هزینه	زمان حل (ثانیه)	گپ مطلق	گپ نسبی	هزینه	زمان حل (ثانیه)	گپ مطلق	گپ نسبی
۱	۳*۲*۱۰	۶۶۹۳/۷۶۵	۵/۲۲۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۴۳۹/۵۳۴	۱۲/۲۳	۰/۰۰	۰/۰۰
۲	۳*۴*۱۰	۱۱۵۶۹/۵۶۴	۴/۶۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۷۸۷۱/۸۵۲	۲۹/۱۳۲	۰/۰۰	۰/۰۰
۳	۳*۶*۱۰	۱۴۸۲۷/۳۲۷	۶/۵۵۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۱۲۹۴/۸۰۹	۲۰/۷۳۸	۰/۰۰	۰/۰۰
۴	۳*۸*۱۰	۱۷۴۲۶/۹۷۶	۸/۵۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۴۷۱۶/۹۵۲	۳۰/۲۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰
۵	۳*۱۰*۱۰	۱۹۴۵۴/۸۳۹	۱۱/۰۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۸۱۳۸/۵۳۴	۳۹/۳۵۵	۰/۰۰	۰/۰۰
۶	۳*۴*۱۲	۱۴۱۸۷/۷۷۶۸	۱۰/۶۹۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۱۳۹۲/۸۲۲۴	۹۸۸/۸	۶/۵۹	۰/۰۰۰۵۸
۷	۳*۶*۱۲	۱۸۱۹۴/۸۵۲۴	۱۱/۹۵۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۶۳۲۰/۳۷۰۸	۹۸۶/۴	۶/۶	۰/۰۰۰۴۰
۸	۳*۸*۱۲	۲۱۳۹۲/۴۵۱۲	۱۶/۹۹۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۱۳۴۶/۹۲۲۴	۹۸۹/۴	۶/۴۹	۰/۰۰۰۳۱
۹	۳*۱۰*۱۲	۲۳۸۸۶/۷۵۱۸	۱۵/۷۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۶۳۶۶/۲۴۰۸	۹۸۷/۶	۶/۶	۰/۰۰۰۲۵
۱۰	۳*۱۰*۱۵	۳۰۵۳۴/۶۲۱	۲۱/۰۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۳۷۱۴/۴۰۱	۹۸۶/۴	۶/۵۹	۰/۰۰۰۲۰
۱۱	۵*۲*۱۰	۱۱۵۶۹/۵۶۴	۵/۸۲۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۴۴۶/۱۳۴	۹۷۹/۴	۶/۶	۰/۰۰۱۲۱
۱۲	۵*۴*۱۲	۱۴۱۸۷/۷۷۶۸	۸/۳۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۱۲۷۱/۹۱۳۶	۹۸۵/۸	۶/۶	۰/۰۰۰۵۹
۱۳	۵*۴*۱۴	۱۷۶۰۹/۹۸۹۶	۱۵/۸۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۲۷۰۰/۵۹۲۸	۹۸۵/۲	۶/۶	۰/۰۰۰۵۲
۱۴	۶*۶*۱۵	۲۳۸۰۴/۷۴۲	۲۱/۹۶۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۰۸۵۲/۱۹	۹۸۷/۳۲	۶/۶	۰/۰۰۰۳۲
۱۵	۶*۱۰*۱۵	۳۲۰۹۳/۸۷۴	۳۳/۸۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۳۷۱۴/۱۰۴	۱۰۲۲/۳۴۲	۶/۵۹	۰/۰۰۰۲۰
۱۶	۸*۶*۱۸	۲۶۸۱۷/۱۲۵۴	۶۰/۳۴۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۵۴۷۵/۴۲۸	۱۰۰۵/۱۲۱	۶/۶	۰/۰۰۰۲۶
۱۷	۸*۸*۱۸	۳۲۲۲۷/۳۳۳۶	۶۲/۲۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۳۲۱۶/۷۷۰۴	۱۰۰۳/۸۸۵	۶/۶	۰/۰۰۰۲۰
۱۸	۸*۱۰*۱۸	۳۶۱۱۵/۶۰۳۸	۶۹/۳۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۱۰۵۶/۹۲۴۸	۱۰۷۸/۵۶۵	۶/۵۹	۰/۰۰۰۱۶
۱۹	۸*۱۴*۲۰	۴۴۶۷۱/۵۴۱۱	۷۸/۲۵۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۷۳۵۰/۶۵۳۴	۱۱۳۷/۱۲۰	۷/۳	۰/۰۰۰۱۴
۲۰	۸*۱۶*۲۲	۵۲۱۱۱/۳۴۱۰	۸۸/۴۵۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۷۱۰۲۱/۹۳۲۱	۱۱۶۵/۳۲۶	۶/۹	۰/۰۰۰۰۹

جدول (۷): نتایج آزمون نرمال بودن کولموگروف - برای مقادیر تابع

جدول (۸): نتایج آزمون برابری واریانس‌ها Levene برای

هدف در دو حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر

H0: معتبر بودن توزیع نرمال برای داده‌ها			H0: برابر بودن واریانس داده‌ها		
H1: نامعتبر بودن توزیع نرمال برای داده‌ها			H1: عدم برابری واریانس داده‌ها		
نوع مسئله	تعداد نمونه	P-value	F	P-value	Equal variances
تقاضای تقسیم‌شده ثابت	۱۸	۰/۱۵۰	۱/۲۶	۰/۲۷۰	
تقاضای تقسیم‌شده متغیر	۱۸	۰/۱۵۰			

جدول (۹): نتایج آزمون t زوجی برای مقادیر تابع هدف در دو حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر

H0: وجود تفاوت معنادار در مقدار تابع هدف در حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر				H1: عدم وجود تفاوت معنادار در مقدار تابع هدف در حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر			
نوع مسئله	میانگین و انحراف	تعداد نمونه	P-value	T-value			
تقاضای تقسیم‌شده ثابت	20700 ± 8278	۱۸					
تقاضای تقسیم‌شده متغیر	19396 ± 10810	۱۸		۱/۸۸	۰/۰۷۷		

۵-۳- بینش مدیریتی

کامیون و مترو، امکان برآورده کردن درخواست مشتریان را با هزینه کمتر فراهم می‌کند. به‌عنوان یک تحقیق در آینده می‌توان برنامه قطار را طبق طبقه‌بندی کالاها بر اساس محدودیت زمانی در نظر گرفت. از طرفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مسئله می‌توان شرایط مورد مطالعه در این تحقیق را بیش‌ازپیش به دنیای واقعی نزدیک ساخت.

۷- مراجع

- [1] World Health Organization (WHO). "Hidden cities: unmasking and overcoming health inequities in urban settings." 2010. <https://www.who.int/publications>
- [2] M. M. Kalantarian, "Estimation in Transportation." Supply Chain Management, vol. 6, no. 21, pp. 35-41, 2004. (In Persian)
- [3] J. Li, Y. Wang, and L. Huasheng. "The Optimization of Split Demand Route Planning Under Metro-Truck Collaborative Distribution," Urban Rail Transit. pp. 144-159. 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s40864-024-00216-6>
- [4] I. Azcuy, N. Agatz, and R. Giesen. "Designing integrated urban delivery systems using public transport," TRANSPORT RES E-LOG, vol. 156, p. 102525. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102525>
- [5] T. Zuo, B. Li, F. Zhang and Y. Yin "Analysis of a collaborative transport model mixing passengers with freights in metro system," Journal of Rail Transport Planning & Management, vol. 25, p. 100358. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100358>
- [6] M. Dror, & P. Trudeau. "Savings by split delivery routing," TRANSPORT SCI, vol. 23, no. 2, pp. 141-145, 1989, doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.23.2.141>
- [7] C. Archetti, M. Grazia Speranza, and M. W.P. Savelsbergh. "An optimization-based heuristic for the split delivery vehicle routing problem," TRANSPORT SCI, vol. 42, no. 1, pp. 22-31, 2008, doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0204>
- [8] A. Eidi, & S. A. Ghasemi Nejad, "Development of a multi-objective vehicle routing model with time windows and multiple demands." Supply Chain Management, vol. 14, no. 37, pp. 38-43, 2013. (In Persian)
- [9] Q. H. Qian, "Construction of underground expressways and underground logistics systems in megacities—a new way to solve the traffic problem in China's megacities", Sci Technol Rev, 2004, doi: <https://navi.cnki.net/knavi/journals/KJDB/detail?uniplatform=NZKPT>
- [10] K. He, J. Shao, Y. Liu, and S. Dong, "Conceptual design of rail transit based urban logistics delivery system," International Conference on Industrial Informatics. IEEE, pp. 221-226, 2008, doi: 10.1109/INDIN.2008.4618098
- [11] J. Kikuta, T. Ito, I. Tomiyama, S. Yamamoto, and T. Yamada, "New subway-integrated city logistics system," Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 39, pp. 476-489. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.123>
- [12] J. Dong, W. Hu, S. Yan, R. Ren, and X. Zhao, "Network Planning Method for Capacitated Metro- Based Underground Logistics System." Advances in civil engineering, vol. 1, p. 6958086, 2018.
- [13] K. U. Kızıl, & B. Yıldız, "Public transport-based crowd-shipping with backup transfers." TRANSPORT SCI, pp. 174-196, 2023, doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2022.1157>
- [14] H. Hassanpour, H. Fattahi, and H. Khalili, "Multimodal transportation: approaches, formation process, advantages, disadvantages and implementation limitations." Supply Chain Management, vol. 25, no. 81, pp. 117-132, 2024, doi: 10.1001.1.20089198.1402.25.81.7.5 (In Persian)
- [15] C. Zheng, Y. Gu, J. Shen, and M. Du, "Urban logistics delivery route planning based on a single metro line." IEEE Access, vol. 9, pp. 50819-50830, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069415

نتایج این پژوهش می‌تواند برای شرکت‌های توزیع در کلان‌شهرها که مناطق گسترده‌ای از مشتریان را پوشش می‌دهند، مناسب باشد. در هر مرحله از ارزیابی و اجرای استراتژی‌های مرتبط با سیستم‌های توزیع باید انعطاف‌پذیری و پاسخگویی سریع به نیازهای مشتریان در نظر گرفته شود. از این رو، باید از سیستم‌های توزیعی استفاده نمود که بتوانند به سرعت به تغییرات تقاضا پاسخ دهند. در این پژوهش سامانه توزیع مشارکتی کامیون و مترو این امکان را می‌دهد که از منابع به شکل بهینه استفاده کنیم و کالاها را با حداقل هزینه و سرعت بیشتری تحویل دهیم. علاوه بر این، در نظر گرفتن تقاضای تقسیم‌شده به صورت متغیر از طریق ایجاد امکان لغو یا افزایش درخواست‌های مشتریان باعث افزایش رضایت مشتریان می‌گردد، زیرا در حالتی که تقاضای تقسیم‌شده متغیر نباشد در صورت افزایش تقاضا از طرف مشتری، مشتری باید منتظر بماند تا در دوره زمانی بعدی از طریق همان خط مترو تأمین شود، درحالی‌که با در نظر گرفتن درخواست مشتریان به صورت متغیر، افزایش درخواست مشتریان در همان لحظه از طریق نزدیک‌ترین خط مترو تأمین می‌شود که این امر سبب پاسخگویی سریع و کم‌هزینه به مشتریان می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، یک سامانه توزیع مشارکتی کامیون - مترو با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. سامانه توزیع مشارکتی زمان کمتری صرف می‌کند و امکان استفاده مؤثر از فضای مترو را فراهم می‌نماید. در این پژوهش به منظور ایجاد انعطاف‌پذیری در پذیرش درخواست‌های مشتریان، تقاضا به صورت تقسیم‌شده در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، برای مقابله با عدم قطعیت تقاضای مشتریان از روش برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح دومرحله‌ای استفاده شده است. برای تحلیل مدل ارائه شده، نتایج به دست آمده از ۱۸ مسئله آزمایشی در حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر با استفاده از روش‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این آزمون نشان داد که اختلاف معناداری بین مقدار تابع هدف در دو حالت تقاضای تقسیم‌شده ثابت و متغیر وجود دارد. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که در نظر گرفتن تقاضای تقسیم‌شده متغیر در سامانه توزیع مشارکتی

- [22] M. Najafi, V. Kaushal, and J. Visser, "Operational Planning and Design Considerations for Underground Logistics Transportation in Texas." *Infrastructures*, vol. 9, no. 8, p. 130, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures9080130>
- [23] J. Lin, & F. Zhang, "Modular vehicle-based transit system for passenger and freight co-modal transportation." *TRANSPORT RES C-EMER*, vol. 160, p. 104545, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104545>
- [24] J. Li, L. Cang, Y. Wu, and Z. Zhang, "Two-echelon collaborative many-to-many pickup and delivery problem for agricultural wholesale markets with workload balance." *Omega*, vol. 130, p. 103164, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103164>
- [25] C. Archetti, M. W. Savelsbergh, and M.G. Speranza, "To split or not to split: That is the question." *TRANSPORT RES E-LOG*, vol. 44, no. 1, pp. 114-123, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.04.003>
- [26] M. Nowak, O. Ergun, and C. C. White III, "Pickup and delivery with split loads." *TRANSPORT SCI*, vol. 42, no. 1, pp. 32-43, 2008, doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0207>
- [27] A. Azar, & M. Farrokh, "Uncertainty planning: stochastic, fuzzy and robust approaches." *Organization for the Study and Compilation of University Humanities Books (Position)*, Research Institute for Humanities Research and Development. Tehran. Chapter Two, pp. 80, 2017. (In persian)
- [28] R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Gazanfari, M. Alinaghian, A. Salamatbakhsh, and N. Norouzi, "A new mathematical model for a competitive vehicle routing problem with time windows solved by simulated annealing." *Journal of manufacturing systems*, vol. 30, no. 2, pp. 83-92, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.04.005>
- [16] Z. H. O. U. Xiao, C. Yao, and H. Liang, "Logistics distribution routing optimization based on subway-freight truck intermodal transportation." *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol. 20, no. 3, P. 111, 2020, doi: [10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.03.017](https://doi.org/10.16097/j.cnki.1009-6744.2020.03.017)
- [17] T. Yang, C. G. Zheng, and G. Ma, "Research on optimization of underground logistics route with time window based on subway." *Journal East China Jiaotong University*, vol. 36, no. 4, pp. 67-74, 2019.
- [18] F. Bruzzone, F. Cavallaro, and S. Nocera, "The integration of passenger and freight transport for first-last mile operations." *Transport policy*, vol. 100, pp. 31-48, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.10.009>
- [19] R. Cheng, Y. Jiang, and O. A. Nielsen, "Integrated people-and-goods transportation systems: from a literature review to a general framework for future research". *Transport Reviews*, vol. 42, no. 5, pp. 997-1020, 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2189322>
- [20] D. Gong, J. Tian, W. Hu, J. Dong, Y. Chen, R. Ren, and Z. Chen, "Sustainable Design and Operations Management of Metro-Based Underground Logistics Systems: A Thematic Literature Review." *Buildings*, vol. 12, no. 8, p. 1888, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13081888>
- [21] S. Li, X. Zhu, P. Shang, L. Wang, and T. Li, "Scheduling shared passenger and freight transport for an underground logistics system." *TRANSPORT RES B-METH*, vol. 183, p. 102907, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.102907>