Modares Civil Engineering Journal

Volume 26, Issue 3, 2026, 69-82

DOI: 10.48311/mcej.2026.99168.0

Tarbiat Modares University

Design and Performance Improvement of Metro Feeder Bus Lines Using a Metaheuristic Algorithm: A Case Study of Tehran Metro Line 3

Alireza Taheriyan[1], Saeid Sherafatipour[2], Mahmoud Saffarzadeh[3*]

1. MSc in Transportation Planning, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor at Department of Transportation Planning, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. Professor at Department of Transportation Planning, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Public transportation plays a critical role in promoting sustainable urban development by offering mobility solutions that are efficient, equitable, and environmentally responsible. It encompasses a wide range of transit modes, which are generally classified into mass transit systems—such as metro and rail services—and non-mass transit systems, including buses, minibuses, and other forms of road-based public transport. As cities expand and mobility demands grow, the complexity of managing and integrating various transport modes also increases. One of the key challenges in the planning and operation of public transport systems lies in ensuring seamless integration between these modes, particularly through the design and optimization of feeder networks that connect local bus services to major mass transit infrastructure.

This study focuses on improving the operational efficiency and user attractiveness of Tehran's public transportation system by enhancing the feeder bus services connected to three specific stations—Abdol Abad, Shahrak-e Shariati, and Zamzam—located on Metro Line 3. The primary objective is to increase metro ridership and improve the overall effectiveness of public transport usage by optimizing the sub-network of feeder lines servicing these metro stations. Improving connectivity and reducing transfer times between feeder and metro systems is considered crucial for encouraging the use of public transit, particularly in densely populated urban areas like Tehran.

To achieve this goal, a structured four-step methodology was adopted. Initially, the feeder routes relevant to the three metro stations were identified through data collection and analysis of existing traffic patterns. Subsequently, two improvement strategies were formulated and applied: (1) uniform improvements applied across the entire feeder routes, such as reducing headways and enhancing vehicle availability; and (2) targeted enhancements focused on selected high-demand stops, including limited-stop service and priority routing. These strategies were translated into multiple operational scenarios, which were then simulated using the EMME/2 transportation planning software, a recognized tool for multimodal transport analysis.

Each scenario was evaluated based on four key performance metrics: the total number of trips made using public transport, the number of boardings on Metro Line 3, the ratio of public transport trips to the number of vehicles (fleet size), and the ratio of metro boardings to the number of deployed feeder buses. The results reveal that reducing headways on feeder bus routes generally leads to an increase in both public transport trips and metro boardings. However, in some cases, this strategy created unintended competition between feeder buses and the metro, which did not necessarily result in higher metro ridership.

Among the various scenarios analyzed, those that implemented limited-stop feeder services showed the highest effectiveness in encouraging multimodal travel behavior and promoting better utilization of both bus and metro systems. Conversely, scenarios that increased the number of feeder buses without allocating dedicated lanes led to greater traffic congestion and reduced overall service quality.

From a policy and planning standpoint, this research underscores the importance of clearly defined objectives and appropriately weighted performance indicators in selecting the most effective operational scenarios. The insights provided can support transport planners and decision-makers in enhancing the integration of feeder systems with metro services, ultimately contributing to the overall sustainability and quality of urban public transportation networks.

Review History

Received: May 24, 2025

Revised: Feb 11, 2026

Accepted: Apr 18, 2026

Keywords

Public Transportation

Network Integration

Feeder Network

Mass Transit Lines

* Corresponding Author Email: saffar_m@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9713-2776

Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۳، سال ۱۴۰۵ - صفحات ۶۹ تا ۸۲

DOI: 10.48311/mcej.2026.99168.0

طراحی و بهبود عملکرد خطوط اتوبوس تغذیه‌کننده سیستم مترو با استفاده از الگوریتم فراابتکاری:مطالعه موردی خط ۳ مترو تهران

علیرضا طاهریان[۱]، سعید شرافتی پور[۲]، محمود صفارزاده[۳*]

۱. کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. استادیارگروه برنامهریزی حمل ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳. استاد گروه برنامهریزی حمل ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

حمل‌ونقل همگانی نقش کلیدی در توسعه پایدار شهری ایفا کرده و شامل شیوه‌های متنوعی است که در دو دسته انبوه‌بر و غیرانبوه‌بر طبقه‌بندی می‌شوند. بهینه‌سازی عملکرد و یکپارچگی این شیوه‌ها، به ویژه در طراحی شبکه‌های تغذیه‌کننده که خطوط اتوبوس را به شبکه‌های انبوه‌بر مانند مترو متصل می‌کنند، اهمیت ویژه‌ای دارد. این پژوهش با هدف افزایش مطلوبیت، بهبود دسترسی و افزایش استفاده از سیستم حمل‌ونقل عمومی، به بررسی و بهینه‌سازی عملکرد خطوط اتوبوس تغذیه‌کننده سه ایستگاه عبدل‌آباد، شهرک شریعتی و زمزم در خط ۳ متروی تهران می‌پردازد. در این راستا، الگوریتمی چهار مرحله‌ای با رویکردی عملیاتی توسعه یافته است که ابتدا خطوط تغذیه‌کننده را شناسایی و سپس به دو شیوه بهبود یکنواخت در کل مسیر و بهبود هدفمند در ایستگاه‌های منتخب پیاده‌سازی می‌شود. سناریوهای طراحی‌شده در نرم‌افزار شبیه‌ساز EMME/2 اجرا و بر اساس چهار شاخص کلیدی شامل تعداد سفرهای حمل‌ونقل همگانی، تعداد مسافران مترو، نسبت سفر به تعداد ناوگان و نسبت مسافران مترو به تعداد اتوبوس‌های تغذیه‌ای ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کاهش سرفاصله زمانی خطوط تغذیه‌کننده در اغلب موارد منجر به افزایش سفرهای همگانی و سوارشدگان مترو می‌شود، اما در برخی سناریوها، اتوبوس‌ها به رقیب مترو تبدیل شده و موجب کاهش استفاده از آن می‌شوند. در مقابل، سناریوهای مبتنی بر توقف محدود در ایستگاه‌های پرتقاضا، بیشترین اثربخشی را در ارتقای رفتار سفر چندوجهی داشته‌اند. همچنین، افزایش ناوگان بدون مسیر ویژه منجر به افزایش تراکم و افت کیفیت خدمات شده است. این پژوهش با تأکید بر ضرورت هدف‌گذاری شفاف و انتخاب سنجه‌های وزندار، می‌تواند راهنمایی کاربردی برای تصمیم‌گیران در جهت ارتقای یکپارچگی سامانه‌های تغذیه‌ای و افزایش کارایی شبکه حمل‌ونقل عمومی در بافت‌های پرتراکم شهری باشد.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

کلمات کلیدی

حمل‌ونقل همگانی

یکپارچگی شبکه

شبکه تغذیه‌کننده

خطوط انبوه‌بر همگانی

۱- مقدمه

حمل‌ونقل همگانی یکی از ارکان حیاتی توسعه پایدار شهری به‌شمار می‌رود. این نظام نقشی مؤثر در کاهش آلودگی هوا، کاهش ترافیک و صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی دارد. سیستم‌های کارآمد حمل‌ونقل عمومی می‌توانند کیفیت زندگی شهروندان را بهبود بخشند. همچنین در افزایش عدالت اجتماعی و

* رایانامه نویسنده مسئول: saffar_m@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9713-2776

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

کاهش نابرابری‌های فضایی مؤثر می‌باشند [1]. مطالعات نشان داده‌اند شهرهایی که در حمل‌ونقل عمومی سرمایه‌گذاری کرده‌اند، نه‌تنها کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را تجربه کرده‌اند، بلکه رشد اقتصادی و پویایی اجتماعی بیشتری نیز داشته‌اند [2]. از این‌رو، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی فقط یک ضرورت زیست‌محیطی نیست، بلکه ابزاری راهبردی در تحقق سیاست‌گذاری‌های عدالت‌محور شهری به‌حساب می‌آید.

یکی از راهکارهای کلیدی برای ارتقای اثربخشی این سیستم‌ها، بهبود عملکرد خطوط اتوبوس شهری به عنوان تغذیه‌کننده شبکه‌های انبوه‌بر مانند مترو و قطارهای حومه‌ای است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که یکپارچگی مؤثر میان خطوط اتوبوس و سامانه‌های ریلی، می‌تواند زمان سفر را کاهش دهد. همچنین این یکپارچگی موجب بهبود دسترسی به خدمات شهری و افزایش استقبال از حمل‌ونقل عمومی می‌شود [3]. بهینه‌سازی سرفاصله حرکت، هماهنگی در زمان‌بندی، و طراحی مناسب ایستگاه‌های تبادلی از جمله عوامل کلیدی موفقیت در این زمینه می‌باشد [4]. تجربه کشورهایی مانند سنگاپور و آلمان نشان می‌دهد که ترکیب مؤثر این دو سیستم، می‌تواند سهم حمل‌ونقل عمومی از سفرهای شهری را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد [5].

در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی و بهبود عملکرد خطوط تغذیه‌کننده موجود انجام شده است. ابتدا عملکرد فعلی این خطوط مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با توجه به منابع و زیرساخت‌های موجود، سناریوهایی برای ارتقای خدمت‌رسانی طراحی شده‌اند. این سناریوها بدون نیاز به تغییر مسیر یا تعریف خطوط جدید تدوین شده‌اند. نوآوری اصلی پژوهش در ارائه الگوریتمی گام‌به‌گام برای تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد همین شبکه موجود است. این الگوریتم به جای طراحی مجدد، بر اصلاح سرفاصله‌ها، بهینه‌سازی زمان‌بندی خدمات، و ارتقای بهره‌وری عملیاتی تمرکز دارد.

۲- مرور ادبیات

بررسی‌های گسترده در حوزه طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی، به ویژه شبکه‌های تغذیه‌کننده، نشان‌دهنده توجه فزاینده به بهبود کارایی، انعطاف‌پذیری و ارتقای کیفیت خدمات به مسافران است. پژوهش‌های متعددی مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی را برای طراحی همزمان مسیرها، انتخاب ایستگاه‌ها و تعیین تواتر حرکت اتوبوس‌های تغذیه‌کننده توسعه داده‌اند که منجر به کاهش زمان انتظار و تسهیل انتقال مسافران به خطوط اصلی می‌شود.

علاوه بر این، مطالعات اخیر به بهبود سامانه‌های حمل‌ونقل با مسیر غیرثابت پرداخته‌اند؛ رویکردهایی که با ترکیب خدمات ثابت و انعطاف‌پذیر و استفاده از استراتژی‌های جابه‌جایی بهینه ناوگان، علاوه بر ارتقای بهره‌وری عملیاتی، تأثیر قابل توجهی در کاهش انتشار آلاینده‌ها داشته‌اند. توسعه شبکه‌های چندوجهی با هدف پوشش جامع‌تر نقاط توقف و بهره‌گیری از ناوگان چندبخشی نیز به عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش تطبیق‌پذیری سیستم حمل‌ونقل عمومی با نوسانات تقاضا مطرح شده است.

مطالعات رفتاری نیز با شناسایی گروه‌های هدف و ویژگی‌های کاربران بالقوه خدمات منعطف، نقش مهمی در بهینه‌سازی سیاست‌های بازاریابی و افزایش پذیرش این خدمات ایفا کرده‌اند. در عین حال، ارزیابی مدل‌های ارائه خدمات در شرایط کم‌تقاضا، بر اهمیت ایجاد تعادل میان کیفیت خدمات و پایداری اقتصادی سیستم تأکید دارد. با این توضیحات مرور ادبیات در سه بخش موضوعی انجام گرفته است. در ابتدا پژوهش‌های مرتبط با طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های تغذیه‌کننده، سپس مطالعاتی که روی سیستم‌های حمل‌ونقلی انعطاف‌پذیر یا هیبریدی تمرکز داشته، مورد بحث قرار گرفته و بخش انتهایی شامل مطالعاتی که با هدف ارزیابی عملکرد، بهره‌وری و سطح خدمت حمل‌ونقل عمومی بوده، صحبت شده است.

۲-۱- طراحی و بهینه‌سازی شبکه تغذیه‌کننده

طاهوری نیا و همکاران در مطالعه‌ای در سال۲۰۱۴ به طراحی شبکه‌های تغذیه‌کننده چندوجهی[1] می‌پردازند که با استفاده از ترکیب چند شیوه حمل‌ونقل، ایستگاه‌ها و نقاط توقف را پوشش می‌دهد. هدف اصلی، ایجاد یک سیستم هماهنگ و بهینه است که بتواند نیازهای مسافران را با توجه به ویژگی‌های مختلف هر شیوه حمل‌ونقل و ویژگی‌های مکانی ایستگاه‌ها پاسخگو باشد. در این پژوهش، مدل‌های طراحی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی توسعه یافته‌اند تا پوشش جامع و کارآمد شبکه تأمین شود و انتقال میان

[1] Multimodal Feeder Network

شیوه‌های مختلف بهینه شود. نتایج نشان می‌دهد که طراحی شبکه‌های چندوجهی می‌تواند باعث افزایش انعطاف‌پذیری سیستم، کاهش زمان انتظار و بهبود تجربه کلی سفر مسافران شود [6].

وی و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه را برای طراحی مسیرهای اتوبوس‌های تغذیه‌ای و تعیین تواتر سرویس‌دهی آن‌ها ارائه می‌دهند که همزمان مسئله انتخاب ایستگاه‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. هدف اصلی مدل، افزایش کارایی سیستم حمل‌ونقل عمومی از طریق بهینه‌سازی همزمان پارامترهای طراحی شبکه و زمان‌بندی سرویس‌ها است. با توجه به محدودیت‌های عملیاتی و نیاز به تأمین دسترسی مناسب برای مسافران، این مدل قادر است بهترین ترکیب مسیرها، تواتر حرکت اتوبوس‌ها و انتخاب ایستگاه‌ها را پیشنهاد دهد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که رویکرد یکپارچه می‌تواند به بهبود قابل توجهی در کاهش هزینه‌ها، کاهش زمان سفر مسافران و ارتقای کیفیت خدمات منجر شود [7].

پتروسلنی و راسنیا درسال ۲۰۲۱ به بررسی و مقایسه دو نوع طراحی شبکه حمل‌ونقل عمومی، شامل طراحی تغذیه‌کننده و طراحی براساس دسترسی مستقیم، از منظر دسترسی‌پذیری مسافران می‌پردازند. پژوهشگران با توسعه یک مدل ارزیابی، میزان دسترسی تولیدشده توسط هر یک از این ساختارها را تحلیل کرده‌اند تا تأثیر آن‌ها بر سهولت دسترسی مسافران به مقاصد مختلف را بسنجند. نتایج این مدل نشان می‌دهد که هر دو طرح مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و انتخاب بهینه میان آن‌ها باید بر اساس ویژگی‌های جمعیتی، جغرافیایی و تقاضای منطقه صورت گیرد. این تحقیق به مدیران شهری و برنامه‌ریزان حمل‌ونقل کمک می‌کند تا با ارزیابی دقیق‌تر طرح‌های شبکه، خدمات بهتری برای بهبود دسترسی‌پذیری و کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی ارائه دهند [8].

گیوتسالیت در سال ۲۰۲۲ به بررسی هماهنگی میان خطوط اتوبوس‌های تغذیه‌کننده و جمع‌کننده[1] در چارچوب سیاست "جابه‌جایی به عنوان خدمت"[2] می‌پردازد. هدف اصلی، ارتقای کارایی و کیفیت تجربه مسافران از طریق بهبود زمان‌بندی، کاهش زمان انتظار و تسهیل انتقال میان خطوط مختلف حمل‌ونقل عمومی است. پژوهشگران با توسعه مدل‌های هماهنگی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، امکان مدیریت پویا و همزمان خطوط مختلف را فراهم کرده‌اند تا سیستم حمل‌ونقل یکپارچه‌تر، انعطاف‌پذیرتر و پاسخگوتر نسبت به تقاضای مسافران شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که هماهنگی مؤثر میان خطوط تغذیه‌ای و جمع‌آوری‌کننده می‌تواند نقش کلیدی در موفقیت سیاست MaaS و افزایش رضایت کاربران ایفا کند [9].

نیک‌کار و همکاران در این پژوهش که در سال ۲۰۲۲ انجام شد به توسعه یک الگوریتم بهینه برای طراحی سامانه حمل‌ونقل تغذیه‌کننده پاسخگو به تقاضا[3] می‌پردازند که امکان استفاده از ایستگاه‌های موقت را نیز فراهم می‌کند. هدف اصلی تحقیق، افزایش انعطاف‌پذیری در خدمت‌رسانی و بهینه‌سازی مسیرها در محیط‌هایی با تقاضای پراکنده یا متغیر است. الگوریتم پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده که بتواند به صورت پویا و با توجه به موقعیت مکانی مسافران، نقاط توقف موقت را تعیین کند و مسیرهایی کارآمد برای ناوگان تعریف نماید. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند باعث کاهش زمان سفر، افزایش رضایت کاربران، و بهبود بهره‌وری سیستم حمل‌ونقل عمومی به‌ویژه در مناطق کم‌تراکم یا فاقد ایستگاه‌های دائمی شود [10].

برگمان و همکاران در سال ۲۰۲۳ به ارائه یک روش ابتکاری تطبیقی برای طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل تغذیه‌کننده می‌پردازند که امکان انتقال اختیاری مسافران[4] را نیز در نظر می‌گیرند. برخلاف مدل‌های سنتی که انتقال میان خطوط را محدود یا الزامی می‌دانند، رویکرد این تحقیق انعطاف‌پذیری بیشتری در ساختار شبکه ایجاد می‌کند و اجازه می‌دهد مسافران در صورت صرفه‌جویی در زمان یا هزینه، انتخاب کنند که آیا از نقطه‌ای به نقطه دیگر انتقال یابند یا خیر. الگوریتم پیشنهادی با هدف بهینه‌سازی مسیرها، کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقای سطح خدمات طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که این روش می‌تواند شبکه‌هایی کاراتر و پاسخ‌گوتر نسبت به تقاضای واقعی کاربران ارائه دهد، به‌ویژه در مناطق با ساختار تقاضای غیرهمگن یا متغیر [11].

زرماسلی و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی بر طراحی شبکه اتوبوس‌های تغذیه‌کننده با بهره‌گیری از وسایل نقلیه

[1] Collector
[2] Mobility as a Service (MaaS)
[3] Demand Responsive Feeder Transit
[4] Optional Transshipment

چندوجهی و منعطف تمرکز دارند؛ رویکردی نوآورانه که انعطاف‌پذیری عملیاتی را افزایش می‌دهد. این نوع وسایل نقلیه قابلیت آن را دارند که بسته به میزان تقاضا، به صورت پویا به یکدیگر متصل یا از هم جدا شوند، و از این طریق امکان ارائه خدمات متناسب با شرایط متغیر فراهم می‌شود. در این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی شبکه و زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌ها توسعه یافته است که هدف آن کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش سطح سرویس است. یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از ناوگان چندبخشی و منعطف می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در بهره‌وری سیستم، کاهش ازدحام و افزایش هماهنگی با سایر شیوه‌های حمل‌ونقل، به ویژه مترو، به همراه داشته باشد [12].

۲-۲- خدمات انعطاف‌پذیر و نیمه انعطاف‌پذیر

میشرا و همکاران در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۴ انجام شد به ارزیابی مدل‌های اجرایی مختلف برای بهره‌برداری از سامانه‌های حمل‌ونقل همگانی با مسیرهای نیمه منعطف[1] در شرایط تقاضای پایین می‌پردازند. پژوهشگران با مقایسه رویکردهای متفاوت در طراحی مسیر، زمان‌بندی و سیاست‌های عملیاتی، به بررسی عملکرد این مدل‌ها از نظر کارایی، هزینه، سطح سرویس و رضایت کاربران پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در نواحی با تراکم پایین یا در ساعات غیر اوج، استفاده از مدل‌های نیمه‌منعطف می‌تواند تعادلی مؤثر میان پوشش‌دهی جغرافیایی و بهره‌وری اقتصادی فراهم آورد. این تحقیق همچنین تأکید دارد که انتخاب مدل مناسب باید متناسب با ویژگی‌های خاص هر منطقه و الگوی تقاضای آن صورت گیرد [13].

حمیدرضا سیارشاد و ژاو در سال ۲۰۲۰ به بررسی راهکارهای بهینه‌سازی جابه‌جایی پویا میان خدمات حمل‌ونقل با مسیر ثابت و با مسیرهای منعطف می‌پردازد و در عین حال، استراتژی جابه‌جایی وسایل نقلیه بلااستفاده و کاهش آلایندگی زیست‌محیطی را نیز در نظر می‌گیرد. نویسندگان با توسعه یک چارچوب ترکیبی، امکان تغییر ساختار خدمات حمل‌ونقل بسته به شرایط تقاضا را فراهم کرده‌اند؛ به گونه‌ای که در ساعات اوج از مسیرهای ثابت و در ساعات کم‌تقاضا از مسیرهای غیرثابت استفاده می‌شود. مدل ارائه شده همچنین با درنظر گرفتن جابه‌جایی هدفمند خودروهای خالی و تحلیل میزان انتشار آلاینده‌ها، راه‌حلی جامع برای ارتقای بهره‌وری، کاهش مصرف سوخت و بهبود پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی ارائه می‌دهد [14].

یو و همکاران در سال ۲۰۲۴ در مطالعه‌ای به تحلیل و بخش‌بندی کاربران بالقوه سامانه‌های حمل‌ونقل همگانی با مسیرغیرثابت پرداختند. هدف اصلی تحقیق، شناسایی ویژگی‌های جمعیت‌شناختی، رفتاری و نگرشی گروه‌هایی از افراد است که احتمال پذیرش این نوع سیستم حمل‌ونقل را دارند. با استفاده از روش‌های آماری و تحلیل خوشه‌ای، نویسندگان توانستند چندین پروفایل از کاربران بالقوه ایجاد کنند و ویژگی‌های کلیدی هر گروه را مشخص نمایند. این یافته‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران و طراحان سیستم‌های حمل‌ونقل در توسعه‌ی راهکارهای هدفمند برای جذب کاربران جدید و افزایش اثربخشی سامانه‌های حمل‌ونقل انعطاف‌پذیر کمک شایانی کند [15].

۲-۳- عملکرد، بهره‌وری و سطح خدمات حمل‌ونقل عمومی

شی و همکاران در سال ۲۰۲۴ این مطالعه را انجام داده و به بررسی بهینه‌سازی سرفاصله زمانی اتوبوس‌رانی و طراحی عملیات توقف محدود[2] با در نظر گرفتن محدودیت‌های متغیر ظرفیت وسایل نقلیه می‌پردازند. نویسندگان با توسعه یک مدل ریاضی، تأثیر ظرفیت ناوگان، تقاضای مسافران، و سیاست‌های توقف را بر کارایی سیستم حمل‌ونقل عمومی تحلیل کرده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تعیین بهینه فرکانس حرکت و ایستگاه‌های توقف می‌تواند باعث کاهش زمان سفر مسافران و افزایش بهره‌وری ناوگان شود، به‌ویژه در شرایطی که ظرفیت وسایل نقلیه به دلایل مختلف (مانند فاصله‌گذاری اجتماعی یا محدودیت‌های زیرساختی) متغیر است. این تحقیق راهکارهای عملیاتی برای بهبود مدیریت خطوط اتوبوس با کارایی بالا ارائه می‌دهد [16].

زنگ و همکاران در سال ۲۰۲۵ در مطالعه‌ای موردی روی پکن با تمرکز بر بهینه‌سازی زمان‌بندی اتوبوس‌های تغذیه‌ای نشان دادند که هماهنگی بهتر میان شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی، به‌ویژه در نقاط تقاطعی بین خطوط اتوبوس و مترو، می‌تواند تأثیر مستقیمی بر بهبود تجربه مسافران و کاهش زمان انتظار آنان داشته باشد. در این تحقیق، نویسندگان با استفاده از مدل‌های ریاضی و

[1] Semi-Flexible Transit

[2] Limited Stop Operation

الگوریتم‌های بهینه‌سازی، سناریوهای مختلفی را برای زمان‌بندی خطوط اتوبوس تحلیل کرده‌اند تا امکان انتقال پیشرفته برای مسافران فراهم شود. نتایج نشان می‌دهد که تنظیم دقیق زمان‌بندی می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری سیستم حمل‌ونقل عمومی و افزایش رضایت کاربران به‌ویژه در شهرهای پرتراکم مانند پکن شود [17].

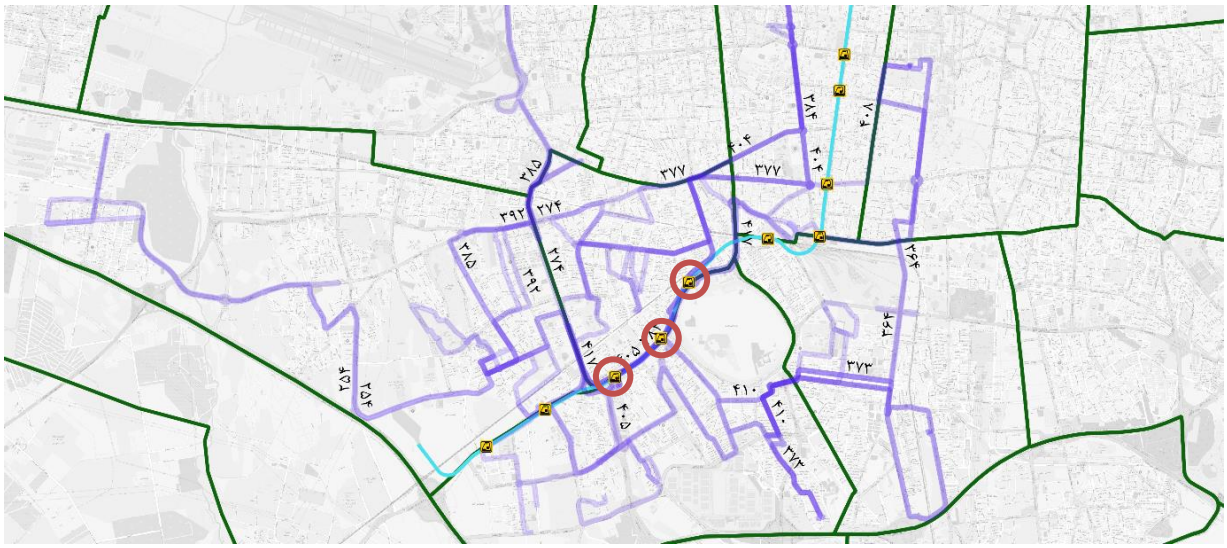
با وجود مطالعات گسترده در حوزه بهینه‌سازی نظری سیستم‌های حمل‌ونقل، کمتر پژوهشی به ارائه چارچوبی عملی و قابل اجرا برای بهبود خطوط موجود در یک شبکه واقعی و تحلیل آثار رقابتی آن با استفاده از شبیه‌سازی کلان‌نگر پرداخته است؛ موضوعی که این پژوهش در پی پاسخ به آن است. در این راستا، ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته، الگوریتم‌های تطبیقی و تحلیل‌های رفتاری می‌تواند چارچوبی جامع و مؤثر برای توسعه سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی منعطف، کارآمد و پایدار فراهم آورد که توانایی پاسخگویی به نیازهای متغیر مسافران و لزوم محیطی را داشته باشد. این رویکرد، مسیر جدیدی را برای پژوهش‌های کاربردی با هدف افزایش عملکرد و انعطاف‌پذیری شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی ترسیم می‌کند.

۳- مطالعه موردی

مطالعه روی بخشی از خط سه مترو تهران انجام شده است. خط سه مترو دارای ۳۴ تعداد ایستگاه فعال بوده و جنوب غربی تهران را به شمال شرقی متصل کرده است. سه ایستگاه عبدل آباد، شهرک شریعتی و زمزم که در مرز بین مناطق ۱۷ و ۱۹ واقع شده، مورد نظر بوده است. همچنین خطوط اتوبوس فعال در این مناطق با توجه به روش‌شناسی مطالعه مورد بررسی قرار گرفته شده است. جانمایی ایستگاه‌های مترو و خطوط اتوبوس فعال در شکل (۱) قابل مشاهده است.

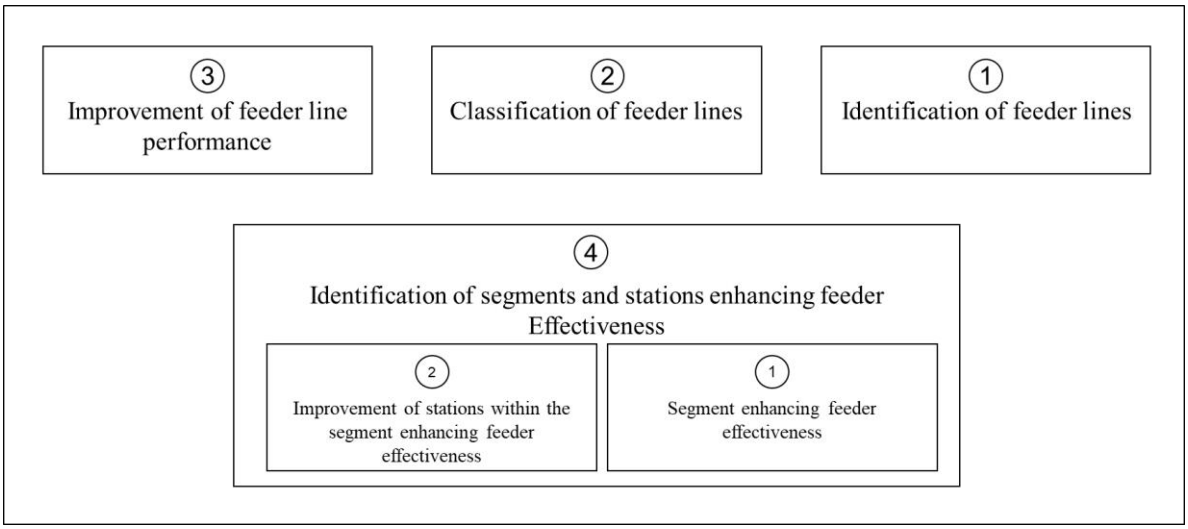
۴- روش شناسی

روش پیشنهادی شامل ۴ مرحله کلی بوده که در شکل (۲) نشان داده شده است. این فرآیند ابتدا به شناسایی خطوط سپس دسته بندی و در گام سوم به بهبود عملکرد خطوط می پردازد و در گام نهایی شناسایی قطعه و ایستگاه های بهبود دهنده تغذیه کنندگی را بررسی می‌کند.گام ابتدایی فرآیند با شناسایی نوع عملکرد خطوط اتوبوس نسبت به خطوط انبوه‌بر و با دریافت اطلاعات مکانی مسیر و ایستگاه‌های خطوط انبوه‌بر و خطوط اتوبوس آغاز می‌شود. در گام نخست بررسی می‌شود که آیا ایستگاه خط اتوبوس به صورت مستقیم به ایستگاه خط انبوه‌بر متصل و در شعاع ۵۰۰ متری آن قرار داشته است یا خیر. در صورتی که چنین فرض‌هایی وجود نداشته باشد، خط موردنظر به عنوان «خط غیر تغذیه‌کننده» طبقه‌بندی می‌شود و از فرآیند خارج می‌شود.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه از شهر تهران که شامل ایستگاه‌های شهرک شریعتی، زمزم و عبدل‌آباد از خط سه مترو بوده، همچنین خطوط اتوبوس فعال نیز قابل مشاهده است.

Fig. 1. The study area within the city of Tehran, encompassing Shahrak-e Shariati, Zamzam, and Abdolabad stations along Metro Line 3. Existing active bus routes are also illustrated.



شکل ۲. فرآیند چهارمرحله‌ای پیشنهادی به منظور بررسی و بهبود عملکرد خطوط تغذیه‌کننده

Fig. 2. The proposed four-step process for analyzing and improving the performance of feeder lines

اما اگر دوفرض مطرحی برقرار باشد، مرحله بعد بررسی موازی بودن حرکت این خط با خط انبوه‌بر است. اگر مسیر خط اتوبوس موازی با مسیر خط انبوه‌بر باشد، خط به‌عنوان «خط تغذیه‌کننده رقیب» شناخته می‌شود. در غیر این صورت، بررسی می‌شود که آیا ایستگاه‌های این دو خط دارای اشتراک مکانی هستند یا نه.

در صورتی که اشتراک ایستگاهی بین خط اتوبوس و خط انبوه‌بر وجود داشته باشد، مجدداً وضعیت حرکت موازی خط اتوبوس با خط انبوه‌بر بررسی می‌شود. اگر این موازی بودن تأیید شود، خط باز هم به‌عنوان «خط تغذیه‌کننده رقیب» تلقی می‌شود. اما اگر حرکت موازی وجود نداشته باشد، خط مورد نظر در نهایت به‌عنوان «خط تغذیه‌کننده غیررقیب» شناخته می‌شود.

گام دوم، فرآیند با در نظر گرفتن خطوط اتوبوسی آغاز می‌شود که به عنوان تغذیه‌کننده شبکه حمل‌ونقل انبوه‌بر (مثلاً مترو) عمل می‌کنند.سپس، سرفاصله زمانی این خطوط در وضعیت موجود شبکه محاسبه می‌شود و بر اساس مقدار سرفاصله زمانی خطوط، دسته‌بندی صورت می‌گیرد. ابتدا بررسی می‌شود که آیا سرفاصله زمانی خط کمتر از ۵ دقیقه است یا خیر. اگر پاسخ مثبت باشد، خط مورد نظر در دسته اول قرار می‌گیرد.

در صورتی که سرفاصله زمانی بیشتر از ۵ دقیقه باشد، بررسی می‌شود که آیا کمتر از ۱۰ دقیقه است یا نه. اگر چنین باشد، خط در دسته دوم قرار می‌گیرد. اگر نه، بررسی برای سرفاصله کمتر از ۱۵ دقیقه انجام می‌شود که در صورت تأیید، خط در دسته سوم جای می‌گیرد. سپس بررسی می‌شود که آیا سرفاصله زمانی کمتر از ۲۰ دقیقه است یا خیر. در صورت مثبت بودن پاسخ، خط به دسته چهارم تعلق می‌گیرد. در غیر این صورت، خط در دسته پنجم قرار می‌گیرد. این دسته‌بندی تا پایان فرآیند ادامه یافته و در نهایت طبقه‌بندی نهایی حاصل می‌شود.

گام سوم فرآیند با انتخاب خطوط تغذیه‌کننده آغاز می‌شود. در نخستین مرحله، بررسی می‌شود که آیا خط مورد نظر در دسته اول خطوط (که دارای سرفاصله زمانی کمتر از ۵ دقیقه) قرار دارد یا خیر. اگر چنین باشد، نتیجه این است که در تمام گزینه‌ها، خط با همان سرفاصله زمانی فعلی می‌تواند به کار خود ادامه دهد و نیازی به بهبود سرفاصله ندارد.

در غیر این صورت، بررسی ادامه می‌یابد که آیا خط مورد نظر در دسته دوم خطوط قرار دارد یا نه. اگر در این دسته باشد، لازم است سرفاصله زمانی آن به ۵ دقیقه کاهش یابد تا کارایی آن در گزینه‌های پیشنهادی تضمین شود.

در صورتی که خط نه در دسته اول و نه دوم باشد، بررسی می‌شود که آیا در دسته سوم خطوط قرار دارد. اگر بله، نیاز به کاهش سرفاصله زمانی به ۵ و ۱۰ و ۱۵ دقیقه در گزینه‌های طراحی‌شده احساس می‌شود.

در نهایت اگر خط در دسته چهارم باشد، باید بهبود سرفاصله در تمام بازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه‌ای مدنظر قرار گیرد. اگر هیچ‌کدام از این شرایط برقرار نباشد، فرآیند پایان می‌یابد.

گام چهارم خود شامل دو الگوریتم بوده که در مرحله ابتدایی، فرآیندی با هدف تعریف مسیر بازگشت برای یک خط سرویس تغذیه‌کننده توقف محدود آغاز می‌شود. ابتدا اطلاعات مکانی مسیر و ایستگاه‌های خطوط انبوه‌بر و اتوبوس تغذیه‌کننده مورد نظر دریافت می‌شود. سپس بررسی می‌شود که آیا ایستگاه خط انبوه‌بر در ابتدای خط تغذیه‌کننده قرار دارد یا خیر. اگر این‌طور نباشد، بررسی می‌شود که آیا ایستگاه انبوه‌بر در انتهای خط تغذیه‌کننده واقع شده است یا خیر. در صورتی که ایستگاه انبوه‌بر در هیچ‌کدام از ابتدا یا انتهای خط قرار نداشته باشد، بررسی خواهد شد که آیا این خط اتوبوس یک خط تغذیه‌کننده رقیب است یا نه .اگر رقیب نیست، فرآیند پایان می‌پذیرد. اما اگر خط اتوبوس از نوع تغذیه‌کننده رقیب باشد، لازم است مسیر برگشت برای آن تعریف شود.

حال اگر ایستگاه مترو در ابتدا یا انتهای خط اتوبوس قرار داشت، بررسی مجددی در مورد نوع رقابتی بودن خط انجام می‌شود. اگر خط رقیبی نیست، مسیر برگشت آن مشابه مسیر رفت در نظر گرفته شده و همان مسیر رفت به عنوان سرویس برگشت تعریف می‌شود. اما اگر خط رقیب باشد، ابتدا باید طول خطوط سرویس‌های پیشنهادی برای بازگشت در این مسیر محاسبه شود و سپس کوتاه‌ترین خط سرویس از بین گزینه‌های موجود به‌عنوان پیشنهاد نهایی انتخاب شود.

مرحله دوم از گام چهارم فرآیند پیشنهادی، اطلاعات مربوط به تعداد مسافران سوار و پیاده شده آغاز می‌شود.سپس، ایستگاه‌ها و مسیر سرویس‌های تغذیه‌کننده مشخص می‌گردد. پس از آن، اطلاعات ثبت‌شده مسافران سوار و پیاده، به ایستگاه‌های مربوطه در خطوط تغذیه‌کننده تخصیص داده شده و برچسب‌گذاری می‌شود.

سپس بررسی می‌شود که آیا تعداد مسافران سوارشده در هر ایستگاه کمتر از ۱۰ نفر است یا خیر. اگر پاسخ منفی باشد (یعنی تعداد سوارشده‌ها بیش از ۱۰ نفر باشد)، ایستگاه در زمره ایستگاه‌های فعال باقی می‌ماند و به مرحله بعدی منتقل می‌شود.

اگر تعداد مسافران کمتر از ۱۰ نفر باشد، آنگاه بررسی می‌شود که آیا این ایستگاه در نزدیکی خط انبوه‌بر (مثل مترو) قرار دارد یا نه .اگر این نزدیکی وجود داشته باشد، ایستگاه به‌عنوان ایستگاه فعال بعدی در نظر گرفته می‌شود. اما اگر چنین نزدیکی وجود نداشته باشد، ایستگاه موردنظر به عنوان یک ایستگاه غیرفعال طبقه‌بندی شده و از شبکه خارج می‌شود.

در نتیجه انجام الگوریتم پیشنهادی، سناریوهایی ساخته می‌شود که می‌بایست بر روی نرم‌افزار شبیه‌ساز کلان نگر پیاده‌سازی و نتایج آن مورد بررسی قرار گیرد. هر سامانه حمل‌ونقل از دو مؤلفه اصلی، یعنی **عرضه** و **تقاضا** تشکیل شده است که میان آن‌ها رابطه‌ای متقابل و پویای رفتاری برقرار است. کاربران سیستم (تقاضا) تمایل دارند با بهره‌گیری از تسهیلات موجود (عرضه)، هزینه‌های جابه‌جایی خود را اعم از زمان سفر و هزینه‌های مالی حداقل کنند. در مقابل، افزایش تقاضا می‌تواند به تراکم و در نتیجه افزایش هزینه‌های بهره‌برداری از زیرساخت‌ها منجر شود. این تعامل منجر به شکل‌گیری مفهومی به‌نام جریان تعادلی در حمل‌ونقل می‌شود که تعیین آن از طریق مدل‌های تخصیص **ترافیک** امکان‌پذیر است. این مدل‌ها نه‌تنها برای ارزیابی عملکرد موجود سیستم حمل‌ونقل کاربرد دارند، بلکه در تحلیل آثار تغییرات کاربری زمین، توسعه شبکه و یا افزودن تسهیلات جدید نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در مدل تخصیص ترافیک شهر تهران، جابه‌جایی‌ها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند :سفرهای شخصی (مربوط به وسایل نقلیه سواری به‌جز اتوبوس و مترو) و سفرهای عمومی (مربوط به کاربران اتوبوس‌های واحد و مترو). تفاوت اصلی در گروه دوم، وجود مسیرهای ثابت و ناوگان محدود با زمان‌بندی مشخص است که ویژگی‌های خاصی در تحلیل و مدل‌سازی آن ایجاد می‌کند.

پس از انجام کلیه آماده‌سازی‌های لازم، تخصیص ترافیک چند وسیله‌ای با روش تعادلی فرانک- ولف با معیارهای توقف ۲۰ تکرار، normalized gap برابر با ۰/۵ (اختلاف بین متوسط زمان سفر در تخصیص مرحله موجود و متوسط حداقل زمان سفر) و relative gap برابر با ۵۰ درصد (اختلاف زمان سفر مابین تخصیص مرحله موجود و تخصیص در حالت تعادل) صورت می‌پذیرد.

۵- طرحی سناریوها و معرفی معیارهای ارزیابی

پیاده‌سازی الگوریتم ۴ مرحله‌ای پیشنهادی، منجر به تولید ۸ سناریو شده که باید در نرم‌افزار شبیه‌ساز emme/2 پیاده‌سازی شده

و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شوند. شکل (۳) بیانگر روند مرحله‌ای تولید و انجام این گزینه‌ها را نشان داده است.

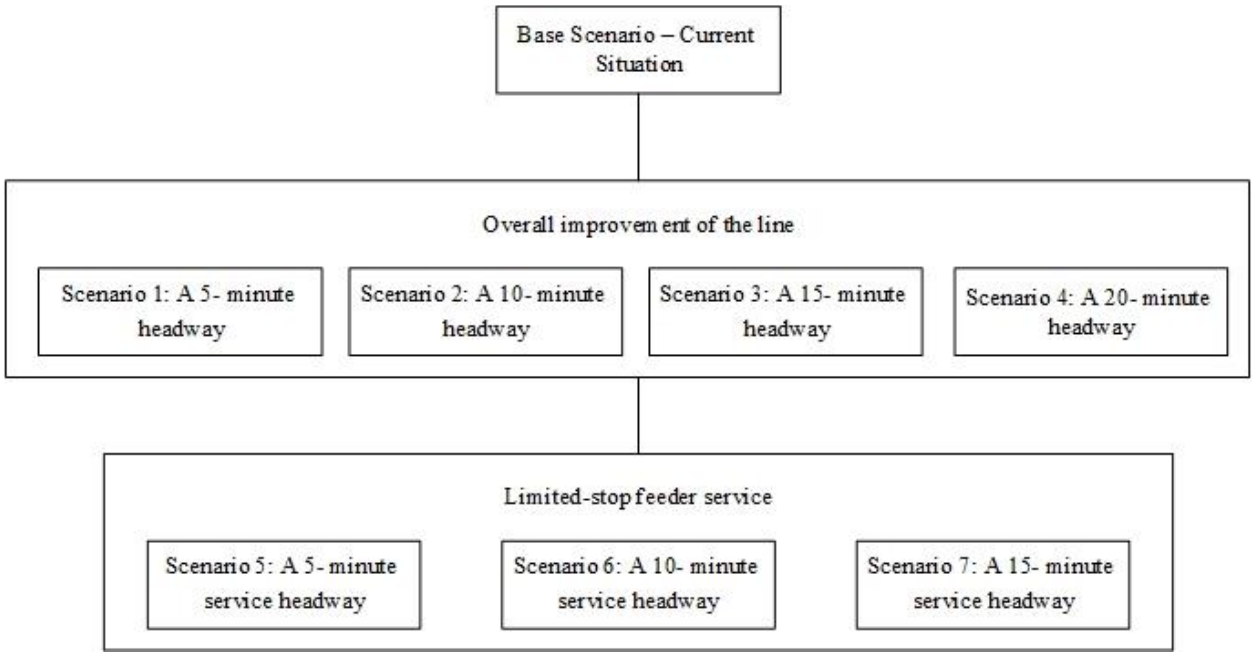
مقایسه نتایج حاصل با شش معیار کلی مورد ارزیابی گرفته که شرح ذیل بوده است:

- معیار شماره ۱: تعداد سفرهای تولیدشده با حمل‌ونقل همگانی (نفر)
- معیار شماره ۲: تعداد مسافرسوارشده خط ۳ مترو (نفر)
- معیار شماره ۳: نسبت تعداد سفرهای با حمل‌ونقل همگانی به تعداد ناوگان (نفر / وسیله)
- معیار شماره ۴: نسبت تعداد مسافر خط ۳ مترو به تعداد ناوگان (نفر / وسیله)

۶- بررسی و تحلیل نتایج

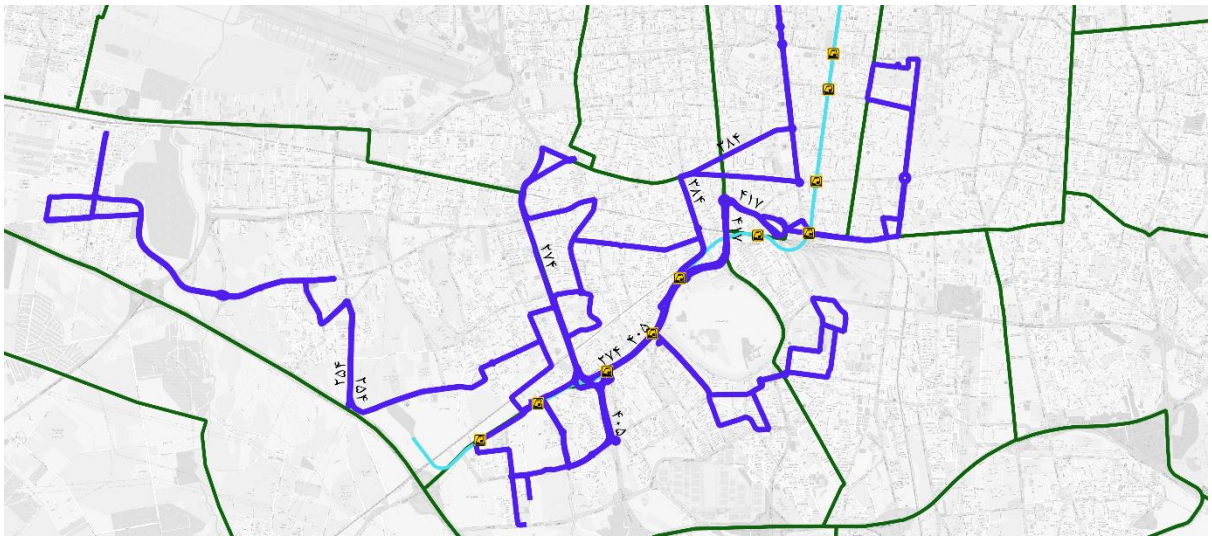
در نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی، ۶ خط اتوبوس با کد ۲۵۴، ۲۷۴، ۳۸۴، ۴۰۵ و ۴۱۷ به عنوان خطوط تغذیه‌کننده معرفی شد که در شکل(۴) قابل مشاهده است.

چهار گزینه ابتدایی براساس بهبود سرفاصله زمانی خطوط تغذیه‌کننده در شبکه وضع موجود به ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه تعریف و در نرم‌افزار شبیه‌ساز پیاده‌سازی شده است. سناریو شماره یک، ناوگان خطوط تغذیه‌کننده در مجموع با افزایش ۱۳۴ عددی به سرفاصله ۵ دقیقه بهبود داده شده و در نتیجه تعداد سفر با حمل‌ونقل همگانی ۶۸۸ واحد افزایش، تعداد سفر تبادلی میان خطوط همگانی ۳۶۸۹ واحد افزایش و سفر انجام شده با خط۳ مترو ۲۱ واحد کاهش یافته است. سناریو شماره دو، ناوگان خطوط تغذیه‌کننده در مجموع با افزایش۵۴ عددی به سرفاصله ۱۰ دقیقه بهبود داده شده و در نتیجه تعداد سفر با حمل و نقل همگانی ۵۱۳ واحد افزایش، تعداد سفر تبادلی میان خطوط همگانی ۱۵۳۸ واحد افزایش و سفر انجام شده با خط۳ مترو ۸ واحد کاهش یافته است. سناریو شماره سه، ناوگان خطوط تغذیه‌کننده در مجموع با افزایش ۲۳ عددی به سرفاصله ۱۵ دقیقه بهبود داده شده و در نتیجه تعداد سفر با حمل‌ونقل همگانی ۴۲۴واحد افزایش، تعداد سفر تبادلی میان خطوط همگانی ۶۴۷ واحد افزایش و سفر انجام شده با خط۳ مترو ۵۰ واحد افزایش یافته است. سناریو شماره چهار، خط شماره ۲۷۴ به دلیل دارا بودن سرفاصله ۱۷ دقیقه بدون تغییر و سایر خطوط تغذیه‌کننده در مجموع با افزایش ۱۰عددی تعداد ناوگان به سرفاصله ۲۰ دقیقه بهبود داده شده و در نتیجه تعداد سفر با حمل‌ونقل همگانی ۲۵۷ واحد افزایش، تعداد سفر تبادلی میان خطوط همگانی ۶۵۶ واحد افزایش و سفر انجام شده با خط۳ مترو ۸۶ واحد افزایش یافته است. هر چهار سناریو با افزایش تعداد ناوگان خط، مطابق انتظار



شکل ۳. فرآیند تولید سناریوها

Fig. 3. Process of scenario generation



شکل ۴. خطوط شناسایی شده به عنوان تغذیه‌کننده سه ایستگاه مترو مورد نظر

Fig. 4. The routes identified as feeder services for the three targeted metro stations

با بهبود عملکرد روبه‌رو شده‌اند و تعداد سفر انجام شده با حمل‌ونقل عمومی افزایش یافته است، در سناریوهای یک و دو علاوه‌بر این افزایش، مسافر خط سه مترو کاهش یافته و این نتیجه حاکی از آن است که بهبود خطوط تغذیه‌کننده برای بعضی از سفرها که با مترو انجام شده، حال به گزینه بهتری تبدیل شده است. همین نتیجه در سناریوهای سه و چهار مشاهده نمی‌شود به بیان بهتر هر دو شاخص افزایشی بوده است. به منظور انتخاب یک سناریو برتر از بین این چهار سناریو با توجه معیارهای ذکر شده، باید هدف سیاست‌گذار را در نظر گرفت.اگر هدف صرفا افزایش سهم حمل‌ونقل همگانی بوده باشد گزینه یک یا دو مورد نظر بوده و اگر هدف افزایش سهم حمل‌ونقل همگانی به شرط اینکه تعداد سفرهای خط مترو افزایش یابد سناریو سه یا چهار را می توانند انتخاب کرد.

طبق فرآیند گفته شده، در این مجموعه از گزینه‌ها به دنبال قطعه‌ای از خط اصلی بوده که نقش تغذیه‌کننده را به صورت خاص برای ایستگاه‌های مترو مورد نظر ایفا کرده است. سرویس‌های تعریف شده روی خطوط با توجه به عملکردی که از خود نشان داده‌اند دارای طول خط و تعداد ایستگاه فعال متفاوت بوده است. خط‌های ۲۵۴، ۲۷۴، ۳۸۴ و ۴۱۷ دارای یک سرویس توقف‌های محدود به اسم‌های ۲۵۴,۱، ۲۷۴,۱، ۳۸۴,۱ و ۴۱۷,۱ بوده و خط ۴۰۵ دارای دو سرویس با اسم‌های ۴۰۵,۱ و ۴۰۵,۲ است.

خط ۲۵۴,۱ برای بهبود به سرفاصله ۵ دقیقه، از ۱۲ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ گزینه ۵ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۲۵۴ (شامل خط۲۵۴ و سرویس تغذیه‌کننده ۲۵۴,۱) ۱۶۷۲ نفر افزایش یافته است. مقایسه گزینه ۵ و گزینه ۱ نشان داده است با کاهش ۲۶ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۲۵۴، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به گزینه ۱ با کاهش ۲۶۶ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۰ دقیقه، ۸ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ گزینه ۶ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۲۵۴، ۱۳۵۱ نفر افزایش یافته است. مقایسه گزینه ۶ و گزینه ۲ نشان داده است با کاهش ۱۱ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۲۵۴، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به گزینه ۲ با کاهش ۲۷ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۵ دقیقه، ۱۰ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ گزینه ۷ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۲۵۴، ۱۵۰۳ نفر افزایش یافته است. مقایسه گزینه ۷ و گزینه ۳ نشان داده است با کاهش ۱ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۲۵۴، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به گزینه ۳ با افزایش ۶۸۹ نفری روبه‌رو شده است.

خط ۲۷۴,۱ برای بهبود به سرفاصله ۵ دقیقه، از ۱۱ وسیله فعال

اتوبوس استفاده شده است؛ گزینه ۵ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۲۷۴ (شامل خط۲۷۴ و سرویس تغذیه‌کننده۲۷۴,۱) ۹۰۷ نفر افزایش یافته است. مقایسه گزینه ۵ و گزینه ۱ نشان داده است با کاهش ۱۱ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۲۷۴ ، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به گزینه ۱ با کاهش ۸۴۰ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۰ دقیقه، ۹ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ گزینه ۶ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۲۷۴، ۲۷۶۰ نفر افزایش یافته است. مقایسه گزینه ۶ و گزینه ۲ نشان داده است بدون تغییر تعداد کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۲۷۴، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به گزینه ۲ با افزایش ۹۶ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۵ دقیقه، ۵ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ گزینه ۷ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۲۷۴، ۱۴۲۹ نفر افزایش یافته است. مقایسه گزینه ۷ و گزینه ۳ نشان داده است با افزایش ۱ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۲۷۴، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به گزینه ۳ با افزایش ۴۱۶ نفری روبه‌رو شده است.

خط ۳۸۴,۱ برای بهبود به سرفاصله ۵ دقیقه، از ۵ وسیله فعال اتوبوس استفاده کرده است ؛ گزینه ۵ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۳۸۴ (شامل خط۳۸۴ و سرویس تغذیه‌کننده۳۸۴,۱) ۱۳۱ نفر افزایش یافته است. مقایسه گزینه ۵ و گزینه ۱ نشان داده است با کاهش ۱۷ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۳۸۴ ، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۱ با کاهش ۴۸۱ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۰ دقیقه، ۳ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۶ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۳۸۴، ۹۸ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۶ و سناریو ۲ نشان داده است با کاهش ۴ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۳۸۴، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۲ با کاهش ۱۰۳ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۵ دقیقه، ۲ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۷ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۳۸۴، ۷۸ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۷ و سناریو ۳ نشان داده است با کاهش ۱ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۳۸۴، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۳ با افزایش ۱۱ نفری روبه‌رو شده است.

خط‌های ۴۰۵,۱ و ۴۰۵,۲ برای بهبود سرفاصله به ۵ دقیقه، از ۲۲ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۵ نسبت به سناریو پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۴۰۵ (شامل خط ۴۰۵ و سرویس تغذیه‌کننده ۴۰۵,۱ و ۴۰۵,۲) ۲۷۳۸ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۵ و سناریو ۱ نشان داده است با کاهش ۹ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۴۰۵ ، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۱ با کاهش ۱۶۱۴ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس‌ها به ۱۰ دقیقه، ۱۴ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۶ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۴۰۵، ۲۱۵۰ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۶ و گزینه ۲ نشان داده است با افزایش ۱ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۴۰۵، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۲ با افزاش ۲۶۱ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس‌ها به ۱۵ دقیقه، ۸ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۷ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۴۰۵، ۱۲۰۵ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۷ و سناریو ۳ نشان داده است با افزایش ۳ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۴۰۵، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۳ با افزایش ۲۹۵ نفری روبه‌رو شده است.

خط ۴۱۷,۱ برای بهبود به سرفاصله ۵ دقیقه، از ۸ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۵ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۴۱۷ (شامل خط ۴۱۷ و سرویس تغذیه‌کننده ۴۱۷,۱) ۲۸۵ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۵ و سناریو ۱ نشان داده است با کاهش ۱۳ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۴۱۷، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۱ با کاهش ۵۵۶ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۰ دقیقه،

۶ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۶ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۴۱۷، ۲۵۵ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۶ و سناریو ۲ نشان داده است با بدون تغییر در تعداد ناوگان فعال در کل خط ۴۱۷، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۲ با کاهش ۱۰۷ نفری روبه‌رو شده است. برای بهبود سرفاصله این سرویس به ۱۵ دقیقه، ۴ وسیله فعال اتوبوس استفاده شده است؛ سناریو ۷ نسبت به گزینه پایه با افزایش این تعداد اتوبوس، مجموع مسافر سوارشده در کل خط ۴۱۷، ۲۱۷ نفر افزایش یافته است. مقایسه سناریو ۷ و سناریو ۳ نشان داده است با افزایش ۳ عددی کل تعداد اتوبوس فعال در کل خط ۴۱۷، مجموع مسافر سوارشده در کل این خط نسبت به سناریو ۳ با افزایش ۲۰۲ نفری روبه‌رو شده است. سناریو ۵ نسبت به گزینه پایه با افزایش ۵۸ وسیله اتوبوس فعال، سفر تولیدشده با حمل‌ونقل همگانی ۱۷۶۳ سفر و مسافرسوارشده خط سه مترو ۲۲۷۱ نفر افزایش یافته است. مقایسه این گزینه و سناریو ۱ نشان داده است با کاهش ۷۶ عددی کل تعداد اتوبوس فعال، سفرتولید با حمل‌ونقل همگانی نسبت به سناریو ۱، ۱۰۷۵ سفر و مسافر سوارشده خط ۳ مترو ۲۲۹۲ نفر افزایش روبه‌رو شده است.

سناریو ۶ نسبت به گزینه پایه با افزایش ۴۰ وسیله اتوبوس فعال، سفر تولیدشده با حمل‌ونقل همگانی ۱۶۸۷ سفر و مسافرسوارشده خط سه مترو ۲۱۳۳ نفر افزایش یافته است. مقایسه این سناریو و سناریو ۲ نشان داده است با کاهش ۱۴ عددی کل تعداد اتوبوس فعال، سفرتولید با حمل‌ونقل همگانی نسبت به گزینه ۲ ، ۱۱۷۴ سفر و مسافر سوارشده خط ۳ مترو ۲۱۴۱ نفر افزایش روبه‌رو شده است.سناریو ۷ نسبت به گزینه پایه با افزایش ۲۹ وسیله اتوبوس فعال، سفر تولیدشده با حمل‌ونقل همگانی ۱۰۴۰ سفر و مسافرسوارشده خط سه مترو ۱۹۵۵ نفر افزایش یافته است. مقایسه این گزینه و سناریو ۳ نشان داده است با افزایش ۶ عددی کل تعداد اتوبوس فعال، سفرتولید با حمل‌ونقل همگانی نسبت به سناریو ۳ ، ۶۱۶ سفر و مسافر سوارشده خط ۳ مترو ۲۰۵۶ نفر افزایش روبه‌رو شده است.

بر اساس نتایج جدول (۱)، سناریوهای پیاده‌سازی‌شده نشان می‌دهند که افزایش تعداد ناوگان خطوط تغذیه‌کننده عموماً منجر به افزایش تعداد سفرهای حمل‌ونقل همگانی و تعداد مسافران خط ۳ مترو شده است. به‌طور خاص، سناریوهای ۵، ۶ و ۷ بیشترین رشد را در تعداد سفر و سوارشدگان مترو نشان می‌دهند، که این موضوع مؤید اثربخشی سیاست بهبود خدمت‌رسانی در ایستگاه‌های پرتردد است. با این حال، مقایسه شاخص‌های سوم و چهارم که به نسبت بهره‌وری ناوگان اشاره دارند، نشان می‌دهد که با وجود افزایش تقاضا، کارایی ناوگان در سناریوهایی با رشد شدید ناوگان (مانند سناریو ۶ و ۷) کاهش یافته است. این موضوع حاکی از آن است که افزایش صرف ناوگان بدون توجه به بهینه‌سازی تخصیص یا ایجاد مسیرهای ویژه می‌تواند منجر به بازدهی پایین‌تر عملیاتی شود. در مقابل، سناریوهای با ناوگان کمتر اما مداخلات هدفمند (مانند سناریو ۴) به تعادل مناسبی میان افزایش تقاضا و کارایی ناوگان دست یافته‌اند. بنابراین، نتایج جدول بیانگر آن است که اجرای راهبردهای مبتنی بر توقف محدود و تخصیص هوشمند ناوگان نسبت به افزایش تعداد آن، از اثربخشی بیشتری برخوردار است.

جدول ۱. خلاصه خروجی‌های سناریوهای پیاده سازی شده در نرم‌افزار شبیه‌ساز و مقایسه عملکرد سناریوهای مختلف براساس معیارهای کلیدی ارزیابی

Table 1. Summary of Simulation Outputs and Performance Comparison of Implemented Scenarios Based on Key Evaluation Metrics

Scenario	Fleet Size	Transit		Transfer		Metro Line 3		Criterion 3	Criterion 4
		Trip	Criterion 1	Trip	Variations	Trip	Criterion 2		
Base	37	333286	-	359208	-	45528	-	-	-
1	171	333974	688	362897	3689	45561	-21	5.1	-0.2
2	91	333799	513	360746	1538	45574	-8	9.5	-0.1
3	60	333710	424	359855	647	45481	50	18.4	2.2
4	47	333543	257	359864	656	45668	86	25.7	8.6
5	95	335049	1763	365917	6709	47853	2271	30.4	39.2
6	77	334973	1687	365165	5957	47715	2133	42.2	53.3
7	66	334326	1040	363959	4751	47537	1955	35.9	67.4

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به خروجی‌های دریافتی می توان نتیجه‌گیری‌های زیر را از این پژوهش مورد نظر قرار داد:

۱- مسیر حرکتی خطوط تغذیه‌کننده در شبکه معابر، همراه با تداخل با سایر شیوه‌های حمل‌ونقلی بوده و عدم وجود مسیری ویژه برای حرکت خطوط اتوبوس، نه تنها این فرضیه را که افزایش ناوگان در شبکه معابر حمل‌ونقلی موجب بهبود سرفاصله خط موردنظر می‌شود را نفی می نماید بلکه با ایجاد تراکم در معابر و کاهش سرفاصله خطوط، تنزل سطح سرویس را موجب می‌شود.

۲- نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مورد بررسی در پژوهش نشان می‌دهد که با بهبود سرفاصله زمانی خطوط، مسافر جذب‌شده به حمل‌ونقل همگانی افزایش یافته است؛ همچنین هر چه سرفاصله خطوط از ۵ دقیقه به ۲۰ دقیقه افزایش می‌یابد، مسافر تبادلی بین شیوه‌های حمل‌ونقل همگانی افزایش یافته است.

۳- بهبود سرفاصله زمانی خطوط تغذیه‌کننده باعث افزایش مسافرسوارشده حمل‌ونقل همگانی شده اما لزوما به معنای افزایش مسافر سوارشده خط انبوه‌بر نبوده است.

۴- افزایش مسافرسوارشده حمل‌ونقل همگانی اگر با افزایش مسافر تبادلی بین شیوه‌های حمل‌ونقل همگانی و کاهش مسافر سوارشده یک خط انبوه‌بر در یک سناریو شبیه سازی شده همراه شود، بدین معنا است که بهبود عملکرد خطوط تغذیه‌کننده یک انتخاب جذاب‌تر در یک سفر مبدا-مقصدی بوده و زمان سفر کوتاه‌تری در مقایسه با خط انبوه‌بر برای استفاده‌کننده رقم می‌زند و به عنوان رقیب عمل می‌نماید.

۵- بررسی معیارهای ارزیابی عملکرد سناریوهای شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که حتی در حالت عدم دسته‌بندی آنها به دسته بهبود کلی خطوط و دسته برخوردار از سرویس تغذیه کننده توقف محدود، دسته دوم فرضیه ثانویه پژوهش را محقق می‌نماید. به بیان دیگر این دسته از سناریوها ضمن افزایش حجم استفاده کنندگان مترو موجب افزایش کلی استفاده گنندگان از حمل و نقل همگانی، که در دسته اول سناریوها محقق شده بود، می‌شود.

۶- در سیاست پیشنهادی، ایجاد خطوط تغذیه‌کننده مستقل از خطوط همگانی موجود، که دارای توقف‌های محدود در ایستگاه‌های موجود شبکه حمل‌ونقل عمومی باشد، دو نتیجه مطلوب را حاصل می‌نماید. در نگاه کلی به استفاده کنندگان از سیستم حمل‌ونقل عمومی افزایش افزایش حجم حاصل شده است که بخشی از آن حاصل از انتقال از وسایل نقلیه شخصی بوده است. در نگاه جزئی به هدف پژوهش که بهبود شبکه تغذیه‌کننده مترو، به عنوان شیوه انبوه‌بر حمل‌ونقل عمومی بوده است، فرضیه افزایش حجم استفاده کنندگان از این سیستم اثبات شده است؛ این امر موجب افزایش حجم استفاده کنندگان از مترو شده است.

۷- در صورت قبول فرض استقلال گزینه‌ها با این تفسیر که هر گزینه یک انتخاب بوده و مانند نتیجه‌گیری‌های قبلی در دسته‌بندی مشخصی قرار نگرفته باشد می‌توان گزینه‌های مطلوب متنوعی را بر اساس هر هدف به عنوان گزینه برتر معرفی کرد، پس با معیارهایی که پیشتر گفته شد؛گزینه ۵ که در نتیجه آن بیشترین افزایش سفر تولیدشده در حمل‌ونقل همگانی و مسافرسوارشده خط انبوه‌بر اتفاق افتاده، گزینه برتر انتخاب می‌شود. اگر افزایش تعداد ناوگان استفاده شده مورد اهمیت درنظر گرفته شود، نسبت افزایش مسافرسوار شده حمل‌ونقل همگانی به تعداد ناوگان افزایشی، گزینه ۶ نسبت گزینه برتر بوده و اگر نسبت افزایش مسافرسوارشده خط انبوه‌بر به افزایش تعداد ناوگان مد نظر بوده، گزینه ۷ گزینه برتر شناخته می‌شود، به بیان بهتر معیار تصمیم‌گیری در گزینه‌های مطرحی ابتدا باید مشخص شود و لزوما افزایش ناوگان با هدف کاهش سرفاصله زمانی عملی بهینه و مطلوب نظر نمی‌باشد.

۸- شایان بیان است که این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه بوده است؛ از جمله نبود داده‌های مشاهدات واقعی (RP) در خصوص چگونگی دسترسی به ایستگاه‌های انبوه‌بر از طریق شیوه‌هایی همچون پیاده‌روی، دوچرخه، شبه‌همگانی و خطوط اتوبوس شهری به همین خاطر پیشنهاد می‌شود که جمع‌آوری این نوع داده و تطبیق آن با خروجی های نرم‌افزاری مورد نظر قرار گیرد.

قدردانی نویسندگان

از کلیه افرادی که در انجام این پـژوهش بـه طریقـی همکـاری کردند کمال سپاسگزاری را به عمل می‌آوریم.

تعارض منافع

برای نویسندگان این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم نویسندگان با هم برابر و به یک نسبت است.

منابع مالی

در انجام این پژوهش از منابع مالی خاصی استفاده نشده است.

References

[1] Litman, T., 2021. *Evaluating Public Transportation Health Benefits*. Victoria Transport Policy Institute.

[2] Cervero, R. and Murakami, J., 2010. Effects of Built Environments on Vehicle Miles Traveled: Evidence from 370 US Urbanized Areas. *Environment and Planning A: Economy and Space*, *42*(2), pp.400–418.

[3] Diab, E.I. and El-Geneidy, A.M., 2012. Understanding the impacts of a combination of service improvement strategies on bus running time and passenger's perception. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *46*(3), pp.614–625.

[4] Watkins, K., 2012. Human transit: How clearer thinking about public transit can enrich our communities and our lives, by Jarrett Walker. *Journal of Transport and Land Use*, *5*(3), pp.1–3.

[5] Givoni, M. and Banister, D. eds., 2010. *Integrated Transport*. London: Routledge. Available at: https://www.taylorfrancis.com/books/9781136965487.

[6] Tahoorinia, M.M., Shariat Mohaymany, A. and Gholami, A., 2014. Designing a multimodal feeder network by covering stops with different modes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *41*(1), pp.87–96.

[7] Wei, M., Liu, T., Sun, B. and Jing, B., 2020. Optimal Integrated Model for Feeder Transit Route Design and Frequency-Setting Problem with Stop Selection. *Journal of Advanced Transportation*, *2020*, p.e6517248.

[8] Petruccelli, U. and Racina, A., 2021. Feeder-trunk and direct-link schemes for public transit: a model to evaluate the produced accessibility. *Public Transport*, *13*(2), pp.301–323.

[9] Gkiotsalitis, K., 2022. Coordinating feeder and collector public transit lines for efficient MaaS services. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, *11*, p.100057.

[10] Nickkar, A., Lee, Y.J. and Meskar, M., 2022. Developing an optimal algorithm for demand responsive feeder transit service accommodating temporary stops. *Journal of Public Transportation*, *24*, p.100021.

[11] Bergmann, M., Msakni, M.K., Hemmati, A. and Fagerholt, K., 2023. An adaptive heuristic for Feeder Network Design with optional transshipment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *176*, p.103153.

[12] Zermasli, D., Iliopoulou, C., Laskaris, G. and Kepaptsoglou, K., 2023. Feeder bus network design with modular transit vehicles. *Journal of Public Transportation*, *25*, p.100078.

[13] Mishra, S., Mehran, B. and Sahu, P.K., 2020. Assessment of delivery models for semi-flexible transit operation in low-demand conditions. *Transport Policy*, *99*, pp.275–287.

[14] Sayarshad, H.R. and Gao, H.O., 2020. Optimizing dynamic switching between fixed and flexible transit services with an idle-vehicle relocation strategy and reductions in emissions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *135*, pp.198–214.

[15] Yu, J., Yin, Z., Zheng, Y., Guo, R. and Li, W., 2024. Segmenting and Exemplifying Potential Flex Route Transit Adopters. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2678*(9), pp.791–806.

[16] Shi, Y., Zhang, C., Zhang, L. and Yang, X., 2024. Optimal bus service frequency setting and limited-stop operation with varying vehicle capacity limit. *Computers & Electrical Engineering*, *118*, p.109356.

[17] Zheng, H., Sun, H., Guo, X., Dai, P. and Wu, J., 2025. Optimizing feeder bus timetables to boost advanced passenger transfers: a case study of Beijing. *International Journal of Production Research*, *63*(7), pp.2670–2693.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Sherafatipour, S., Taheriyan, A. and Saffarzadeh, M., 2026. Design and Performance Improvement of Metro Feeder Bus Lines Using a Metaheuristic Algorithm: A Case Study of Tehran Metro Line 3. *Modares Civil Engineering journal*, *26*(3), pp.69-82.