بهینه‌سازی استوار زمان‌بندی حرکت قطارها در شرایط اختلالات ترافیکی برای کاهش زمان انتظار مسافران در متروی تهران

مقاله علمی – پژوهشی

پژمان صالحی، گروه مهندسی صنایع، واحد پرند و رباط کریم، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران
*مهران خلج (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی صنایع، واحد پرند و رباط کریم، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران
داود جعفری، گروه مهندسی صنایع، واحد پرند و رباط کریم، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران
پریسا موسوی اهرنجانی، گروه مهندسی صنایع، واحد پرند و رباط کریم، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: **khalaj@iau.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲– پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱
صفحه ۲۲۴-۲۰۷

چکیده

اختلالات عملیاتی در شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری می‌تواند عملکرد عادی سیستم را به‌شدت مختل کرده و منجر به ازدحام در ایستگاه‌ها، سردرگمی مسافران و توقف‌های ناخواسته قطارها در مسیر شود. این پژوهش با هدف کاهش پیامدهای ناشی از چنین اختلالاتی و ارتقای سطح خدمات به مسافران، رویکردی نوآورانه مبتنی بر اجرای گردش‌های کوتاه‌مدت قطارها در دوره‌های بروز اختلال ارائه می‌کند. در این چارچوب، با در نظر گرفتن محدودیت‌های ایمنی حرکت قطار، ظرفیت ناوگان و پویایی تقاضای سفر مسافران، مدلی بهینه‌سازی طراحی شده است که هدف آن کمینه‌سازی کل زمان انتظار مسافران است. مدل پیشنهادی امکان تدوین سریع برنامه‌های جایگزین حرکت قطارها در شرایط غیرعادی را فراهم می‌آورد و از طریق هماهنگ‌سازی اعزام و حرکت قطارها و تخصیص بهینه منابع موجود، به کاهش مدت‌زمان سفر و بهبود جریان عملیاتی سیستم کمک می‌کند. برای حل مدل، الگوریتم ژنتیک بهبودیافته‌ای توسعه یافته و در قالب مطالعه‌ای موردی بر روی خط ٤ متروی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی توانسته است فواصل حرکت قطارها را در بازه ۳ تا ۵ دقیقه حفظ کند؛ امری که ضمن تضمین ایمنی عملیات، انطباق مطلوبی با الگوی تقاضای سفر مسافران دارد و به‌طور مؤثر موجب کاهش زمان انتظار در سکوها و ارتقای سطح خدمات سیستم حمل‌ونقل ریلی شهری می‌شود. همچنین، مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک معمول نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده از سرعت همگرایی بالاتر و کارایی محاسباتی بیشتری برخوردار است. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه چارچوبی جامع برای تنظیم زمان‌بندی حرکت قطارها در شرایط اختلال نهفته است؛ چارچوبی که با بهره‌گیری از گردش‌های کوتاه‌مدت و با در نظر گرفتن هم‌زمان متغیرهای کلیدی تصمیم‌گیری شامل زمان حرکت و توقف، محدودیت‌های ایمنی و ظرفیت، و تقاضای پویای مسافران، امکان بهبود قابل‌توجه کارایی عملیاتی و پایداری شبکه مترو در شرایط بحرانی را فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: مترو، اختلالات ترافیکی، الگوریتم ژنتیک، بازطراحی جداول زمانبندی، بهینه سازی استوار

۱-مقدمه

مترو، به‌عنوان یکی از ارکان اصلی سیستم‌های حمل‌ونقل درون‌شهری، نقشی کلیدی در ارائه خدمات سریع، کارآمد و سازگار با محیط‌زیست به شهروندان ایفا می‌کند. با این حال، وقوع اختلالات عملیاتی می‌تواند پیامدهایی از جمله افزایش قابل‌توجه تأخیرها و کاهش کیفیت خدمات را به همراه داشته باشد (بافندکار و همکاران، ۲۰۲۵). در این راستا، توسعه و به‌کارگیری راهبردهای علمی و قابل‌اطمینان برای بازتنظیم عملیات قطارها، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود. این

راهبردها، با تکیه بر مدل‌های پیشرفته تصمیم‌گیری، امکان مدیریت مؤثر اختلالات، کاهش تأخیرها و ارتقای کارایی کلی سیستم را فراهم می‌آورند. بدین‌ترتیب، زمینه‌ساز تداوم عملکرد روان و پایدار ترافیک در شبکه مترو خواهند بود (فرناندز–رودریگز و همکاران، ۲۰۲۵). پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه تنظیم عملیات سیر و حرکت قطارها در شرایط بروز تأخیر، عمدتاً بر توسعه مدل‌های بهینه‌سازی مبتنی بر سناریوهای واقعی خرابی ناوگان یا تجهیزات خط متمرکز بوده‌اند. هدف اصلی این مدل‌ها، بازطراحی کارآمد زمان‌بندی قطارها از طریق یکپارچه‌سازی استراتژی‌های مختلف مرتبط با عملیات شبکه ریلی است. در این زمینه، اسحاق و همکاران (۲۰۲۵) مدلی در سطح شبکه ریلی ارائه کرده‌اند که به بهینه‌سازی جدول زمان‌بندی بر اساس گردش کوتاه‌مدت قطارها با در نظر گرفتن نقش ایستگاه‌های تبادلی اختصاص دارد. در مطالعه‌ای دیگر، یوسفی و همکاران (۲۰۲۵) با تأکید بر تأثیر ایستگاه‌های تبادلی، مدلی مبتنی بر عملیات خطوط تقاطعی توسعه داده‌اند. همچنین، رملی و همکاران (۲۰۲۵) با توجه به ماهیت تصادفی جریان مسافری، مدلی هماهنگ و منسجم طراحی کرده‌اند که در آن گردش کوتاه‌مدت قطار، استراتژی‌های کنترل جریان مسافر و تنظیمات زمان‌بندی به‌صورت یکپارچه و بر اساس تعامل پویا میان جریان مسافری و عملیات قطار تلفیق شده‌اند. از سوی دیگر، گونگونش و همکاران (۲۰۲۵) به مسئله بازبرنامه‌ریزی زمان‌بندی حرکت قطارها با تمرکز بر عدم قطعیت در مدت‌زمان بروز وقفه‌ها پرداخته و آن را به‌عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای «فضایی–زمانی» چرخش، در قالب فرم معادل قطعی فرمول‌بندی کرده‌اند. این رویکرد امکان محاسبه راه‌حل بهینه برای سناریوهای مختلف بروز اختلال را با لحاظ کردن احتمالات مربوط به طول مدت اختلال فراهم می‌سازد.

در همین راستا، کلاون و استولتینگ (۲۰۲۵) الگوریتمی برای بازتنظیم زمان‌بندی حرکت قطارها ارائه کرده‌اند که علاوه بر ظرفیت ناوگان، بهینه‌سازی شاخص‌هایی نظیر هزینه‌های عملیاتی، میزان انحراف از برنامه اولیه و ارتقای رضایت مسافران را دنبال می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر، کوژابک و چای (۲۰۲۵) با در نظر گرفتن استراتژی‌های لغو حرکت، تأخیر و کاهش سرعت، مدلی غیرخطی با الگوی اعداد صحیح مختلط برای تنظیم سرعت و زمان‌بندی قطارها توسعه داده‌اند. همچنین، سروتیلایا و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط، مدلی کلان برای زمان‌بندی مجدد در شرایط اختلال کامل خط ارائه کرده‌اند که هدف اصلی آن، تعیین زمان بهینه بازگشت قطارها است. مآ و همکاران (۲۰۲۵) نیز با به‌کارگیری همین رویکرد، مدلی برای کاهش زمان سفر به‌صورت تعمیم‌یافته با لحاظ جریان مسافری طی بازه‌های بروز وقفه پیشنهاد داده‌اند. این مدل، ضمن در نظر گرفتن واکنش‌ها و رفتار مسافران و محدودیت‌های ظرفیت ایستگاه‌ها، به کاهش زمان سپری‌شده در قطار، زمان انتظار در ایستگاه‌های مبدأ و میانی، و همچنین میزان جابه‌جایی‌های مسافری کمک می‌کند.

در ادامه، دراگو و همکاران (۲۰۲۵) مدلی برای بهینه‌سازی عملیات سیر و حرکت قطارها ارائه کرده‌اند که محدودیت‌هایی نظیر تعداد واحدهای ناوگان و زمان سفر مسافران را لحاظ کرده است. اولویت اصلی این مدل، تخلیه سریع مسافران سرگردان بوده است. در نهایت، ران و کومار (۲۰۲۵) رویکردی هماهنگ برای تنظیم عملیات سیر و حرکت قطارها و کنترل جریان مسافری پیشنهاد داده‌اند که به بهبود نظم عملیاتی و ارتقای تجربه سفر منجر می‌شود. این رویکرد بر پایه یک مدل دوسطحی برنامه‌ریزی خطی بنا شده است که برنامه‌ریزی عبور–توقف و کنترل جریان مسافری را در ایستگاه‌های متعدد تلفیق می‌کند. اغلب پژوهش‌های پیشین در حوزه سامانه‌های حمل‌ونقل ریلی شهری، عمدتاً بر تحلیل کمی مدل‌های تنظیم عملکرد قطار در شرایط اختلال تمرکز داشته‌اند. در این مطالعات، جریان مسافری غالباً به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده و پویایی تغییرات آن مورد توجه قرار نگرفته است.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با الهام از مباحث مطرح‌شده در ادبیات پیشین، رویکردی نوین برای تنظیم عملکرد قطار ارائه می‌دهد که مبتنی بر اجرای عملیات بازگشت زودهنگام و پیش از موعد برنامه‌ریزی‌شده است. هدف اصلی این رویکرد، کمینه‌سازی مجموع زمان انتظار مسافران در سراسر شبکه است. این روش از طریق بازتنظیم زمان‌بندی حرکت قطارها در شرایط اختلال و اعمال تنظیمات پویا بر زمان‌های حرکت و توقف آن‌ها پیاده‌سازی می‌شود. افزون بر این، یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته به‌عنوان ابزار حل مسئله پیشنهاد شده و در یک مطالعه موردی، بر اساس رویداد اختلال واقعی در خط چهار متروی تهران، به کار گرفته شده است. بدین‌ترتیب، پژوهش حاضر می‌کوشد گامی تکمیلی در توسعه دانش مرتبط با تنظیم عملکرد قطار در شرایط اختلال بردارد.

۲- مدلسازی

۲-۱- تنظیم اهداف مسئله

در شرایط بروز اختلال در سامانه‌های حمل‌ونقل ریلی شهری (مترو)، ضروری است عملکرد قطارها به‌سرعت و با در نظر گرفتن الگوی تقاضای سفر، بر اساس یک طرح سازمان‌یافته عملیاتی تنظیم شود. این الگو باید مجموعه‌ای از محدودیت‌های عملیاتی، شامل وضعیت خطوط ریلی، تعداد قطارهای موجود، سرفاصله زمانی و مدت توقف در ایستگاه‌ها را لحاظ کند. هدف اصلی این فرایند، کاهش زمان سفر از طریق یکپارچه‌سازی منابع ناوگان و زیرساخت، و همچنین تسهیل بازگشت سریع شبکه به برنامه زمان‌بندی عادی پس از رفع اختلال است. بر اساس ادبیات موضوع، اهداف تنظیم عملکرد قطار را می‌توان از دو دیدگاه مسافران و بهره‌برداران تعریف کرد و با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مختلف صورت‌بندی نمود.

در این بین اهداف از منظر مسافران به شرح زیر تعریف می‌شود:

– کاهش کل زمان سفر: شامل مجموع زمان انتظار در سکو، زمان حرکت در مسیر و زمان توقف در ایستگاه‌ها از لحظه ورود مسافر به سکو تا رسیدن به مقصد؛

–کاهش کل زمان انتظار: شامل زمان انتظار در سکو و زمان معطلی درون قطار؛

–کاهش هزینه‌های ناشی از ازدحام: تنظیم ضریب بار قطار (تراکم مسافران) در محدوده قابل تحمل و سازگار با سطح مطلوب خدمات؛

این اهداف با یکدیگر مرتبط بوده و از عوامل کلیدی در انتخاب سفر و رضایت مسافران محسوب می‌شوند.

اهداف از منظر بهره‌بردار خطوط مترو به شرح زیر است:

-کاهش کل زمان تأخیر قطارها: کمینه‌سازی انحراف میان برنامه زمان‌بندی واقعی و برنامه‌ریزی‌شده؛

- ایجاد تعادل در ورود و خروج قطارها: جلوگیری از اختلاف شدید در سرفاصله‌ها که منجر به توزیع نامتوازن مسافران و تفاوت در ضریب بار قطارها می‌شود؛

-کاهش تراکم مسافران در سکوها: کنترل تعداد افراد در حال انتظار در محدوده ایمن به‌منظور جلوگیری از اختلال در جریان مسافری؛

این اهداف به‌صورت متقابل با یکدیگر مرتبط بوده و نقش مهمی در تصمیم‌گیری بهره‌برداران در شرایط اختلال ایفا می‌کنند.

به‌طور کلی، اهداف تنظیم حرکت قطارها از دو منظر مسافری و بهره‌بردار، علیرغم ارتباط متقابل، ممکن است در تعارض باشند. بنابراین، در تدوین اهداف بهینه‌سازی در شرایط اختلال، لازم است سناریوهای واقعی و شرایط عملیاتی شبکه مورد توجه قرار گرفته و درجات متفاوتی از اولویت‌دهی و توازن میان اهداف اعمال شود. این امر مستلزم توسعه مدل‌های هوشمندی است که قادر به انعطاف‌پذیری و تطبیق با شرایط پویای شبکه باشند.

۲-۲-تحلیل مسئله

جریان‌های پرحجم مسافری از عوامل اصلی بروز نقص‌های فنی در سامانه‌های متروی شهری محسوب می‌شوند. به‌ویژه در ساعات اوج تقاضا (صبح و عصر)، فشار ناشی از افزایش حجم مسافران موجب تسریع در فرسودگی تجهیزات ناوگان شده و احتمال وقوع نقایص فنی را افزایش می‌دهد. مطابق گزارش‌های رسمی شرکت بهره‌برداری متروی تهران، خرابی‌های سامانه سیگنالینگ پرتکرارترین عامل اختلال در عملیات خطوط مترو هستند که اغلب به تأخیرهای گسترده و اختلال در جریان عادی سرویس‌دهی منجر می‌شوند. بر این اساس، پژوهش حاضر خط مترو را در شرایطی که نقص در سیستم سیگنالینگ موجب اختلال عملیاتی شده است، به‌عنوان کانون مطالعه انتخاب کرده است. در این تحقیق، داده‌های تقاضای سفر مسافری و اطلاعات عملیاتی قطارها به‌عنوان ورودی مدل به کار گرفته شده و هدف اصلی، توسعه یک مدل بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت قطارها در شرایط اختلال است. این مدل با تمرکز بر بازطراحی سریع و دقیق جداول زمانی، درصدد است تا ضمن مدیریت شرایط بحرانی، ظرفیت جابه‌جایی شبکه و امکان تردد مسافران را تا حد امکان حفظ کند. در سناریوی عملیاتی ساده‌سازی‌شده (تصویر ۱)، فرض می‌شود که رویداد اختلال بین ایستگاه‌های ۲ و ۳ در یک مسیر ریلی دوطرفه رخ داده است. در چنین شرایطی، هر دو جهت حرکت تحت تأثیر قرار گرفته و عملیات عادی شبکه مختل می‌شود. در صورت نبود راهکار جایگزین، برای حفظ ظرفیت جابه‌جایی مسافر، به‌کارگیری روش‌های تنظیم اضطراری و فوری ضروری خواهد بود. این پژوهش برای مواجهه با چنین شرایطی، از روش بازگشت زودهنگام قطار به مبدأ اعزام به‌عنوان راهکار تنظیم عملیات سیر و حرکت استفاده می‌کند. در این رویکرد، امکان اعمال تغییرات انعطاف‌پذیر در زمان حرکت قطارها و مدت توقف در ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده است. بدین‌ترتیب، با فرض قابلیت اجرای عملیات بازگشت در ایستگاه شماره ۳ یا ایستگاه‌های مجاور، قطارها می‌توانند در همان ایستگاه تغییر مسیر داده و به سمت مبدأ بازگردند. این راهکار،

تداوم عملیات در بازه بین ایستگاه‌های ۱ تا ۳ را ممکن ساخته و اهدافی همچون حفظ سطح خدمات، کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران، کاهش ازدحام در سکوها و تضمین سفر ایمن را محقق می‌سازد.

۲-۳-مفروضات مدل

به‌منظور تسهیل فرآیند پژوهش و مدل‌سازی، مفروضات زیر در این مطالعه لحاظ شده‌اند:

-از ایستگاه‌هایی که عملیات بازگشت قطار در آن‌ها انجام می‌شود، برای خروج قطار از خطوط ریلی یا اجرای عملیات نگهداری و تعمیرات استفاده نمی‌گردد.

-خطوط ریلی امکان سبقت‌گیری قطارها را فراهم نمی‌کنند.

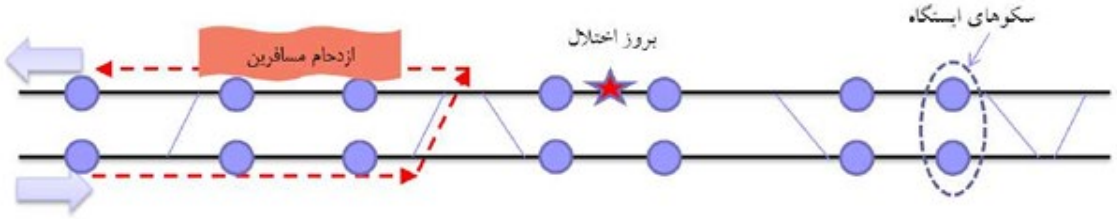
-محل وقوع اختلال مشخص بوده و مدت زمان آن قابل پیش‌بینی است.

-نرخ ورود و خروج مسافران در هر ایستگاه، بر اساس داده‌های واقعی استخراج‌شده از سامانه جمع‌آوری خودکار بلیت محاسبه می‌شود.

-در فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران، اصول «اولویت پیاده‌شدن پیش از سوارشدن» و «اولویت با مسافرانی که زودتر به ایستگاه رسیده‌اند»، رعایت می‌گردد. همچنین، جریان ورودی مسافران به هر ایستگاه با توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

-در هر لحظه، تنها یک قطار می‌تواند در سکوی یک ایستگاه (در هر دو جهت) توقف کند. افزون بر این، تمامی قطارها موظف به توقف متوالی در کلیه ایستگاه‌ها هستند.

همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، در ادامه به بررسی پارامترهای مدل و تعاریف نمادهای مرتبط با آن‌ها می‌پردازیم.



تصویر ۱. بازگشت قطار از مسیر رفت به مسیر برگشت به منظور بهبود سرفاصله زمانی قطارها در مسیر برگشت (بازگشت زودهنگام قطار به مبدأ اعزام)

جدول ۱. پارامترهای مرتبط با مدل پژوهش و تعاریف آنها

پارامترهای مدل	تعاریف نمادها
$\|K\|$	مجموعه قطارهای در حال سرویس‌دهی که با اندیس‌های m و k نشان داده می‌شود.
$\|U\|$	مجموعه ایستگاه‌های یک خط ریلی که با اندیس‌های u و v نشان داده می‌شود.
Cap	ظرفیت قطار
H_1	حداقل فاصله زمانی بین اعزام (خروج) دو قطار متوالی از یک ایستگاه
H_2	حداقل فاصله زمانی بین ورود دو قطار متوالی به یک ایستگاه
H_3	حداقل فاصله زمانی بین ورود و خروج دو قطار متوالی در یک ایستگاه

پارامترهای مدل	تعاریف نمادها
$t_{k,u}^{dep}$	زمان حرکت (خروج) قطار k از ایستگاه u
$t_{k,u}^{dwell}$	زمان توقف قطار k در ایستگاه u
t_{min}^{dwell}	حداقل زمان توقف قطار در ایستگاه
t_{max}^{dwell}	حداکثر زمان توقف قطار در ایستگاه
$t_{k,u}^{run}$	زمان سیر قطار k بین ایستگاه‌های u و u+1
$P_{k,u,v}^{wait}$	تعداد مسافرانی که در لحظه ورود قطار k به ایستگاه u در ایستگاه u منتظر سوار شدن به قطار k هستند و قصد دارند به ایستگاه v سفر کنند.
$P_{k,u}^{wait}$	تعداد مسافرانی که در لحظه ورود قطار k به ایستگاه u در ایستگاه u منتظر سوار شدن به قطار k هستند.
$E_{k,u,v}$	تعداد مسافرانی که از ایستگاه u به ایستگاه v سفر می‌کنند و در بازه زمانی سیر و حرکت قطارهای متوالی k و k-1 به ایستگاه u رسیده‌اند.
$Q_{k,u}^{in}$	تعداد مسافرانی که در لحظه حرکت قطار k از ایستگاه u سوار قطار k هستند.
WT_1	مجموع زمان انتظار مسافران (سوار بر قطار)
WT_2	تعداد مسافرانی که در لحظه حرکت قطار k از ایستگاه u سوار قطار k هستند.
WT_3	مجموع زمان انتظار مسافرانی که از قطار جامانده‌اند و بر سکو منتظر هستند.
$\lambda_u(t)$	نرخ ورود (نرخ جریان) مسافران به ایستگاه u در زمان t
λ_u^n	نرخ ورود (جریان) مسافران به ایستگاه u در طول دوره زمانی n–ام
$\rho_u(t)$	نرخ پیاده شدن (نرخ خروج) مسافران در ایستگاه u در زمان t
$D_{k,u}^{al}$	تعداد مسافرانی که از قطار k در ایستگاه u پیاده می‌شوند.
T	حداقل مجموع زمان انتظار برای تمامی مسافران
$t_{k,u}^{arr}$	زمان ورود (رسیدن) قطار k به ایستگاه u
δ_z	زمان عملیات شانت قطار
$A_{k,u,v}^{on}$	تعداد واقعی مسافرانی که هنگام حرکت قطار k از ایستگاه u به مقصد ایستگاه v سوار این قطار می‌شوند.
$A_{k,u}^{on}$	تعداد واقعی مسافرانی که هنگام حرکت قطار k از ایستگاه u، سوار این قطار می‌شوند.

پارامترهای مدل	تعاریف نمادها
$W_{k,u,v}^{hall}$	تعداد مسافرانی که نتوانسته‌اند پیش از حرکت قطار k از ایستگاه u به مقصد ایستگاه v سوار این قطار شوند.
$W_{k,u}^{hall}$	تعداد مسافرانی که هنگام حرکت قطار k از ایستگاه u نتوانسته‌اند سوار این قطار شوند.

۳-مدلسازی

این پژوهش با رویکردی مبتنی بر تقاضای مسافران و ملاحظات عملیاتی، به بهینه‌سازی تنظیمات عملیات سیر و حرکت قطارها با هدف روان‌سازی جریان مسافری پرداخته است. هدف اصلی مدل، کمینه‌سازی مجموع زمان انتظار مسافران است. در این چارچوب، سه مؤلفه اساسی در نظر گرفته شده‌اند:

- زمان حضور مسافران در قطار؛
-زمان انتظار مسافران میان دو ورود متوالی قطار؛
-زمان انتظار مجدد مسافران سرگردان.

به‌منظور تسریع در فرآیند محاسبات و فراهم‌سازی امکان اتخاذ تصمیم‌های فوری در شرایط اضطراری ناشی از اختلالات، محاسبه زمان انتظار میان دو ورود متوالی قطار به‌صورت ساده‌شده در مدل لحاظ شده است. بر این اساس، تابع هدف مدل به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\min T = WT_1 + WT_2 + WT_3 \quad (۱)$$

زمان حضور مسافران در قطار، به‌عنوان بخشی از کل زمان انتظار تعریف می‌شود و از حاصل‌ضرب تعداد مسافران باقی‌مانده در قطار پس از ورود به ایستگاه در مدت‌زمان توقف واقعی قطار در همان ایستگاه به‌دست می‌آید. تعداد مسافران باقی‌مانده نیز با کسر تعداد مسافرانی که در ایستگاه پیاده می‌شوند از تعداد کل مسافران موجود در قطار در لحظه ورود به ایستگاه محاسبه می‌گردد. در ادامه، این مقادیر برای تمامی ایستگاه‌ها و کلیه قطارهای فعال در مسیر جمع‌آوری و تجمیع می‌شوند. فرمول این محاسبه به‌صورت معادله ۲ ارائه می‌شود. زمان انتظار مسافرانی که در فاصله بین حرکت دو قطار متوالی وارد ایستگاه می‌شوند، از طریق انتگرال حاصل‌ضرب نرخ ورود مسافران به ایستگاه در مدت‌زمان انتظار آن‌ها تا رسیدن قطار بعدی محاسبه می‌گردد. این محاسبه در بازه زمانی میان دو قطار متوالی انجام شده و سپس برای تمامی ایستگاه‌ها و قطارهای فعال در مسیر، تجمیع می‌شود. فرمول این محاسبه به‌صورت زیر ارائه می‌گردد.

$$WT_1 = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{u=2}^{|U-1|} \left(Q_{k,u-1}^{in} - D_{k,u}^{al}\right) \left(t_{k,u}^{dep} - t_{k,u}^{arr}\right)$$

$$WT_2 = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{u=1}^{|U-1|} \lambda_u^n \quad \frac{\left(t_{k,u}^{dep} - t_{k-1,u}^{dep}\right)^2}{2}$$

(رابطه ۲ و ۳)

زمان انتظار ثانویه برای مسافرانی که به دلیل محدودیت ظرفیت، امکان سوار شدن به قطار فعلی را نداشته و ناگزیر در ایستگاه باقی می‌مانند، به‌صورت زیر تعریف می‌شود: این شاخص برابر است با حاصل‌ضرب تعداد مسافران باقی‌مانده بر روی سکو در لحظه خروج قطار از ایستگاه، در فاصله زمانی میان حرکت دو قطار متوالی. با تکرار این محاسبه برای تمامی ایستگاه‌ها و کلیه قطارهای فعال در مسیر، و سپس جمع‌کردن مقادیر حاصل، مقدار کل زمان انتظار ثانویه به‌دست می‌آید.

رابطه ریاضی این فرایند به شرح زیر ارائه می‌شود.

$$WT_3 = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{u=1}^{|U-1|} \left(W_{k,u}^{hall} \left(t_{k+1,u}^{dep} - t_{k,u}^{dep} \right) \right) \quad (٤)$$

محدودیت‌های مرتبط با زمان سیر و حرکت بین ایستگاه‌های مترو از رابطه زیر محاسبه می شود. در مدل مورد نظر، فرض بر آن است که زمان حرکت قطارها در بخش‌های بین دو ایستگاه، مقدار ثابتی دارد. بر همین اساس، محدودیت‌های مربوط به زمان توقف قطار در ایستگاه‌ها به‌صورت رابطه ٦ تعریف و اعمال می‌گردند.

$$t_{k,u+1}^{arr} - t_{k,u}^{dep} = t_{k,u}^{run} \quad (٥)$$

$$t_{k,u}^{dep} - t_{k,u}^{arr} = t_{k,u}^{dwell} \quad (٦)$$

$$t_{min}^{dwell} \leq t_{k,u}^{dwell} \leq t_{max}^{dwell} \quad (٧)$$

در این پژوهش، زمان توقف قطار در ایستگاه‌ها به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است. رابطه (۷) تضمین می‌کند که زمان توقف در هر ایستگاه با الزامات فنی و عملیاتی واقعی منطبق بوده و در عین حال، انعطاف‌پذیری لازم برای اعمال تغییرات در این زمان حفظ می شود. افزون بر این، به‌منظور تضمین ایمنی در بهره‌برداری، محدودیت مربوط به حداقل فاصله ایمن میان دو قطار متوالی در یک خط مترو، بر اساس روابط زیر تعریف و محاسبه می‌گردد.

$$t_{k+1,u}^{dep} - t_{k,u}^{dep} \geq H_1 \quad (٨)$$

$$t_{k+1,u}^{arr} - t_{k,u}^{arr} \geq H_2 \quad (٩)$$

$$t_{k+1,u}^{dar} - t_{k,u}^{dep} \geq H_3 \quad (١٠)$$

در چارچوب فرضیات مدل، این‌گونه در نظر گرفته شده است که در طول فرایند حرکت، هیچ‌گونه سبقتی میان قطارها رخ نمی‌دهد. بر همین اساس، روابط (۸) تا (۱۰) به‌گونه‌ای تدوین شده‌اند که اختلاف میان زمان‌های ورود و خروج دو قطار متوالی در ایستگاه **u**، همواره در محدوده‌ای برابر با حداقل فاصله ایمن سیر و حرکت (حداقل سرفاصله ایمن) قرار گیرد. رعایت این محدودیت‌ها، ایمنی عملیات در مسیر را تضمین می‌کند. محدودیت مرتبط با زمان عملیات شانت برای تغییر جهت قطار به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$t_{k,u+1}^{arr} - t_{k,u}^{dep} = \delta_z \quad (١١)$$

این پژوهش رویکردی را پیشنهاد می‌کند که در آن، به‌منظور حفظ سطح خدمات در شرایط بروز اختلال در عملکرد سامانه ریلی، از روش تنظیم عملیات گردش کوتاه قطار استفاده می‌شود. در این چارچوب، معادله (۱۱) به‌گونه‌ای تدوین شده است که اختلاف میان زمان رسیدن قطار اعزامی به مبدأ اولیه پس از تکمیل فرآیند سیر و بازگشت از مقصد، و زمان خروج همان قطار از ایستگاه پایانی برای آغاز حرکت مجدد به سمت مبدأ اعزام را نشان می‌دهد. این اختلاف زمانی در حقیقت نمایانگر مدت زمان عملیات بازگشت قطار است که رعایت آن به‌عنوان یک الزام عملیاتی برای تضمین ایمنی حرکت ضروری تلقی می‌شود. محدودیت‌های مربوط به تعداد واقعی مسافران سوارشده به قطار به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$A_{k,u}^{on} = \begin{cases} \min\{P_{k,u}^{wait}, \text{Cap}\}, if\ u = 1 \\ \min\{P_{k,u,v}^{wait}, \text{Cap} - Q_{k,u}^{in} + D_{k,u}^{al}\}, if\ 1 < u \leq |U| \end{cases} \quad (١٢)$$

$$A_{k,u}^{on} = \sum_{v=u+1}^{|U|-1} A_{k,u,v}^{on} \quad (۱۳)$$

محدودیت تعداد مسافران پیاده شده از قطار به صورت زیر نشان داده می شود:

$$D_{k,u}^{al} = \begin{cases} 0, if\ u = 1 \\ \sum_{v=1}^{u-1} A_{k,u}^{on}.\rho_u(t), if\ 1 < u \le |U| \end{cases} \quad (۱۴)$$

تعداد مسافران در انتظار برای سوار شدن به قطار با رابطه زیر نشان می‌شود.

$$P_{k,u,v}^{wait} = A_{k,u,v}^{on} - E_{k,u,v} \quad (۱۵)$$

$$P_{k,u}^{wait} = \sum_{v=u+1}^{|U|-1} A_{k,u,v}^{on} = \sum_{v=u+1}^{|U|-1} \left(W_{k+1,u,v}^{hall} + E_{k,u,v}\right) \quad (۱۶)$$

تعداد مسافران سرگردان در ایستگاه با استفاده از رابطه زیر نمایش داده می‌شود.

$$W_{k,u,v}^{hall} = P_{k,u,v}^{wait} - A_{k,u,v}^{on} \quad (۱۷)$$

$$W_{k,u,v}^{hall} = P_{k,u,v}^{wait} - A_{k,u,v}^{on} = \sum_{v=u+1}^{|U|-1} \left(P_{k,u,v}^{wait} - A_{k,u,v}^{on}\right) \quad (۱۸)$$

تعداد مسافران داخل قطار از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$Q_{k,u}^{in} = \begin{cases} A_{k,u,v}^{on}, if\ u = 1 \\ Q_{k-1,u}^{in} - D_{k,u}^{al} + A_{k,u,}^{on}, if\ 1 < u < |U| \end{cases} \quad (۱۹)$$

محدودیت ظرفیت قطار از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$Q_{k,u}^{in} \le \text{Cap} \quad (۲۰)$$

٤-اجرای مدل

این پژوهش مدلی برای تنظیم عملیات قطار در حمل‌ونقل ریلی شهری ارائه می‌دهد که بر اساس رویدادهای توقف ناشی از خطا طراحی شده است. هدف اصلی این مدل، کاهش زمان انتظار مسافران است. مدل پیشنهادی شامل تعداد زیادی ایستگاه و سرویس قطار بوده و فرایند حل تکراری آن از پیچیدگی بالایی برخوردار است. در شرایط اضطراری همراه با اختلالات پیش‌بینی‌نشده، زمان واکنش بسیار حیاتی است؛ با این حال، استفاده از الگوریتم‌های حل دقیق در مسائل بزرگ‌مقیاس می‌تواند زمان‌بر باشد. از این‌رو، این پژوهش برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک تطبیقی بهره می‌گیرد. در این رویکرد، الگوریتم ژنتیک بازطراحی و اصلاح شده است تا بر پایه روش‌های سنتی، توانایی حل بهینه مسئله را داشته باشد. الگوریتم ژنتیک تطبیقی پیشنهادی بهبودهای زیر را ارائه می‌دهد: نرخ تلاقی و نرخ جهش متناسب با تعداد تکرارها به‌صورت تطبیقی تنظیم می‌شوند. این تنظیم تطبیقی با استفاده از یک منحنی غیرخطی انجام می‌گیرد تا هم توانایی جست‌وجوی سراسری و هم سرعت همگرایی الگوریتم افزایش یابد. افزون بر این، در فرایند تنظیم، از تابع سیگموئید به‌عنوان منحنی تنظیم تطبیقی استفاده می‌شود. این تابع که در شبکه‌های عصبی به‌عنوان یک تابع فعال‌سازی نرم شناخته می‌شود، امکان حفظ افراد برتر را تا حد امکان فراهم می‌سازد. به‌منظور پیاده‌سازی راهبرد نخبه‌گرایی در الگوریتم ژنتیک تطبیقی، یکی از چالش‌های کلیدی این است که با وجود قابلیت تنظیم تطبیقی نرخ تلاقی و نرخ جهش، این مقادیر ممکن است به‌تدریج افزایش یافته و در نتیجه، منجر به حذف افراد با کیفیت بالا شوند. برای رفع این چالش، راهبرد نخبه‌گرایی به‌کار گرفته می‌شود تا از حذف فرد دارای بالاترین مقدار برازش در نسل قبلی جلوگیری کرده و بدین‌ترتیب، همگرایی بهینه‌تر الگوریتم تضمین گردد.

مراحل الگوریتم بکار رفته در این پژوهش به شرح زیر است.

مرحله ۱: مقداردهی اولیه پارامترها

در این مرحله، داده‌های مرتبط با جریان مسافران، برنامه حرکت قطارها، زمان‌های سیر و حرکت بین‌ایستگاه ها، زمان‌های توقف برنامه‌ریزی‌شده و سایر داده‌های اولیه به مدل وارد می‌شوند. سپس پارامترهای کلیدی، از جمله ظرفیت قطار، اندازه جمعیت، تعداد تکرارها، نرخ تلاقی، نرخ جهش و تعداد محاسبات، متناسب با نیاز مسئله تنظیم می‌گردند.

مرحله ۲: کدگذاری

متغیرهای تصمیم‌گیری در این مدل شامل زمان حرکت و زمان توقف قطارها در ایستگاه‌های مختلف در طول مسیر است. از آن‌جا که مسئله به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی با پارامترهای پیوسته تعریف می‌شود، کدگذاری متغیرها با استفاده از اعداد حقیقی انجام می‌پذیرد. با توجه به ثابت بودن زمان پیمایش بین ایستگاه‌ها، تعیین زمان حرکت قطار در ایستگاه مبدأ کافی خواهد بود. سپس، با مشخص شدن زمان توقف در هر ایستگاه، زمان حرکت قطار در ایستگاه‌های بعدی به‌صورت متوالی محاسبه می‌شود.

مرحله ۳: تولید جمعیت اولیه

با در نظر گرفتن الزامات ایمنی در بهره‌برداری از قطار، در این مرحله یک آرایه تصادفی (X) در بازه ([0, 1]) و متناسب با تعداد تکرارها تولید می‌شود. بر اساس این داده‌ها و با رعایت محدودیت‌های مربوط به فاصله حرکت و زمان توقف، زمان حرکت اولین قطار در بازه $[1, h_{min}]$ تعیین می‌گردد. سپس، زمان توقف اولین قطار در بازه $[t_{min}^{dwell}, t_{max}^{dwell}]$ مشخص می‌شود. در ادامه، زمان حرکت قطارهای بعدی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود. به‌طور مشابه، زمان توقف قطارهای بعدی نیز بر همین اساس تعیین می‌گردد. در نهایت، با تکرار این فرایند، یک جمعیت اولیه متشکل از (N) کروموزوم برای آغاز الگوریتم تکاملی تولید می‌شود.

$$T = X(h_{max} - h_{min}) + h_{min} \qquad (۲۱)$$

مرحله ٤: محاسبه برازش افراد جمعیت

برازش هر فرد، معیاری برای سنجش کیفیت و کارایی آن در میان جمعیت محسوب می‌شود؛ ازاین‌رو، این معیار در ادبیات بهینه‌سازی به‌عنوان «تابع ارزیابی» نیز شناخته می‌شود. در این فرایند، ویژگی‌های هر فرد مورد بررسی قرار گرفته و میزان برازش آن تعیین می‌گردد. تابع هدف در مدل حاضر بر کمینه‌سازی مجموع زمان انتظار مسافران تمرکز دارد. بر این اساس، هرچه مقدار تابع هدف کمتر باشد، راه‌حل ارائه‌شده توسط فرد مطلوب‌تر ارزیابی خواهد شد. بنابراین، الگوریتم از تابع هدف به‌عنوان مبنای محاسبه تابع برازش بهره می‌گیرد.

$$Fitness = \min(T) \qquad (۲۲)$$

مرحله ۵: عملگر انتخاب

عملگر انتخاب، که در برخی منابع با عنوان «عملگر بازآفرینی» نیز شناخته می‌شود، فرایندی است که طی آن، با به‌کارگیری روشی مشخص، تعدادی از افراد ممتاز (والدین) از میان جمعیت فعلی برگزیده می‌شوند تا مبنای تولید نسل بعدی قرار گیرند. شایان ذکر است که احتمال انتخاب هر فرد، متناسب با میزان برازش فردی او تعیین می‌شود. در این پژوهش، برای اجرای عملگر انتخاب از روش «چرخ رولت» استفاده شده است؛ روشی که از جمله پرکاربردترین و شناخته‌شده‌ترین روش‌ها در الگوریتم‌های تکاملی به‌شمار می‌رود. جزئیات محاسباتی این روش به‌شرح زیر ارائه می‌شود. در گام نخست، مقدار تابع برازش برای هر فرد (v_i) از جمعیت محاسبه می‌گردد، به‌گونه‌ای که (i = 1,2,3,…) بیانگر شاخص افراد در اندازه کل جمعیت است. در ادامه، مقدار کل برازش جمعیت محاسبه می‌شود.

$$Fitness = \sum_{i=1}^{pop} fitness(v_i) \qquad (۲۳)$$

در مرحله بعد، احتمال انتخاب هر فرد v_i به‌صورت $p_i = \frac{fitness(v_i)}{fitness}$ محاسبه می‌شود همچنین احتمال تجمعی برای هر فرد جامعه با استفاده از رابطه $q_i = \sum p_i$ بدست می‌آید. این محاسبات برای تمامی افراد جمعیت، یعنی برای (i = 1,2,3,…popsize) انجام می‌پذیرد. سپس یک عدد تصادفی z در بازه [0 و 1] تولید می‌گردد. در صورتی که $z \leq q_1$ باشد، کروموزوم نخست انتخاب می‌شود و در غیر

اینصورت کروموزم v_i برای i=2,..., popsize برگزیده می‌شود به طوری که شرط $q_{i-1} < z \leq q_i$ برآورده گردد.

مرحله ٦: عملگر ترکیب

عملگر ترکیب، فرآیندی است که طی آن با انتخاب و تبادل ژن‌ها میان کروموزوم‌های دو والد، نسل جدیدی از افراد تولید می‌شود. در این پژوهش، از روش ترکیب دودویی شبیه‌سازی‌شده بهره گرفته شده است. در این رویکرد، والدین به دو بخش تقسیم می‌شوند و فرآیند ترکیب به تعداد N/2 مرتبه تکرار می‌گردد. در هر مرحله، دو فرد به‌عنوان والد انتخاب می‌شوند؛ سپس حداقل بازه انحراف h_{min}عنوان معیار تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده و با تعیین تعداد تکرارها، از تابع فعال‌سازی شبکه عصبی برای بهینه‌سازی و تنظیم احتمال ترکیب p_c استفاده می‌شود. در نهایت، این فرآیند منجر به تشکیل جمعیتی جدید و متنوع‌تر خواهد شد.

$$p_c = k_1 + \log sig\left[k_2 * \left(\frac{iter}{iterations} - k_3\right)\right] * k_3$$

$$\log sig(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \qquad (۲۴)$$

مرحله ۷: عملگر جهش

عملگر جهش، فرآیندی است که طی آن برخی از ویژگی‌های ژنی افراد در جمعیت با احتمالی بسیار کم و به‌صورت تصادفی دچار تغییر می‌شوند. معمولاً مقدار احتمال جهش در سطحی بسیار پایین تنظیم می‌گردد تا از تخریب ناخواسته ساختارهای مطلوب جلوگیری شود. در این پژوهش، با در نظر گرفتن تعداد تکرارها، از تابع فعال‌سازی شبکه عصبی به‌منظور بهبود و تنظیم احتمال جهش (P_m) استفاده شده است. سپس با به‌کارگیری روش جهش چندجمله‌ای، نسل جدیدی از افراد تولید می‌شود که موجب افزایش تنوع در جمعیت خواهد شد.

$$p_m = h_1 + \log sig\left[h_2 * \left(\frac{iter}{iterations} - h_3\right)\right] * h_4 \qquad (۲۵)$$

گام ۸: استراتژی حفظ نخبگان

در فرآیند محاسبات تکراری الگوریتم‌های تکاملی، به‌ویژه در مراحل اعمال عملگرهای تقاطع و جهش، احتمال حذف تصادفی افراد برتر وجود دارد. به‌منظور جلوگیری از این پدیده و حفظ کیفیت جمعیت در طول نسل‌های متوالی، از استراتژی حفظ نخبگان بهره گرفته می‌شود.

اصل بنیادین این رویکرد بدین‌صورت است که در پایان هر نسل، بهترین فرد موجود در جمعیت، که با c(n) نمایش داده می‌شود، شناسایی و ذخیره می‌گردد. در صورتی‌که در نسل بعدی هیچ‌یک از افراد جدید عملکردی بهتر از c(n) نداشته باشند، این فرد نخبه به‌طور مستقیم به جمعیت نسل بعد منتقل می‌شود. بدین‌ترتیب، الگوریتم اطمینان حاصل می‌کند که بهترین پاسخ‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله از روند تکاملی در مراحل بعدی حفظ شده و کیفیت کلی فرآیند بهینه‌سازی به‌صورت پیوسته استمرار یابد.

گام ۹: شرط توقف الگوریتم

در این مرحله، وضعیت اجرای الگوریتم از نظر تحقق شرط توقف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. معیار اصلی برای توقف، معمولاً رسیدن به حداکثر تعداد تکرارهای از پیش تعیین‌شده است. چنانچه تعداد تکرارها از این مقدار فراتر رود، فرآیند محاسباتی متوقف شده و بهترین پاسخ یا راه‌حل بهینه حاصل تا آن لحظه، به‌عنوان خروجی نهایی الگوریتم معرفی می‌شود. در صورتی‌که تعداد تکرارها هنوز به حد مجاز نرسیده باشد، الگوریتم با بازگشت به گام پنجم، مراحل تولید، ارزیابی و به‌روزرسانی جمعیت را مجدداً اجرا می‌کند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که شرط توقف برآورده شود؛ در آن زمان، آخرین راه‌حل بهینه حاصل از فرآیند تکراری، به‌عنوان نتیجه نهایی ارائه خواهد شد.

مطالعه موردی خط ٤ متروی تهران

این پژوهش بر خط ٤ متروی تهران متمرکز است. این خط شامل ۱۹ ایستگاه بوده که تقریباً ۲۲ کیلومتر طول داشته و از شمال غربی تا جنوب شرقی پایتخت امتداد دارد. در این خط تمامی ایستگاه‌های تبادلی به خطوط عبوری و تقاطعی مجهز است. این

خط از ایستگاه ارم سبز (در نزدیکی شهرک اکباتان) آغاز شده و تا ایستگاه شهید کلاهدوز (در منطقه تهرانپارس) ادامه می‌یابد. خط ٤ دارای ۱۹ ایستگاه است که برخی از آنها شامل تبادل با خطوط دیگر مترو و دسترسی به مراکز مهم شهری می‌شوند. بازه زمانی مورد بررسی، ساعت ۱۷:٤٥ تا ۱۸:۳۰ در تاریخ ۱۷ شهریورماه ۱٤۰٤ انتخاب شده است.

در این بازه، وقوع خرابی سوزن در ایستگاه ارم سبز موجب اختلال در حرکت قطارها در بخش بین ایستگاه‌های ارم سبز شرقی و شهرک اکباتان شده است. به‌منظور مدیریت شرایط اختلال، در بخش بین ایستگاه‌های ارم سبز و اکباتان، عملیات گردش کوتاه‌مدت قطارها اجرا شده است. بر این اساس، جدول زمانی بازنگری‌شده حرکت قطارها با بهره‌گیری از مدل پیشنهادی تنظیم عملیات قطار طراحی و بهینه‌سازی شده است. برای سهولت در تحلیل آماری، ایستگاه‌های مسیر از ارم سبز تا شهرک اکباتان، مطابق جدول (۲) از ایستگاه شماره ۱ تا ۱۹ شماره‌گذاری شده‌اند. همچنین، زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها در جدول (۳) و زمان سیر در فواصل بین‌ایستگاهی در جدول (٤) ارائه شده است. شماره‌گذاری فواصل حرکتی نیز بر اساس ترتیب ایستگاه‌ها صورت گرفته است. افزون بر این، جدول (٥) شامل پارامترهای به‌کاررفته در مدل و الگوریتم پیشنهادی است که مبنای انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌های این پژوهش قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، به‌منظور حل مدل پیشنهادی، از دو رویکرد محاسباتی شامل الگوریتم ژنتیک کلاسیک و الگوریتم ژنتیک بهبودیافته استفاده شده است. نتایج حاصل از تغییرات مقدار تابع شایستگی بر اساس تعداد تکرارهای الگوریتم ارائه شده و جدول (٦) نتایج محاسبه تابع هدف را برای هر دو الگوریتم نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم ژنتیک بهبودیافته قادر است در تعداد تکرارهای کمتری نسبت به نسخه کلاسیک، به راه‌حل بهینه دست یابد. همچنین، خروجی‌های محاسباتی نشان می‌دهند که اجرای این الگوریتم منجر به صرفه‌جویی زمانی معادل ۱٬٥۱۳٬٦٤۰ ثانیه برای مسافران در سامانه مترو شده است. این نتایج بیانگر آن است که الگوریتم ژنتیک بهبودیافته از سرعت همگرایی بالاتر و کارایی محاسباتی برتری برخوردار است؛ ویژگی‌ای که می‌تواند به‌طور مؤثر در ارتقای کیفیت خدمات عملیاتی سامانه‌های حمل‌ونقل ریلی شهری، در شرایط بروز اختلال، نقش‌آفرین باشد. جدول ۲. شماره و نام ایستگاه های خط ٤ متروی تهران را نشان می‌دهد.

جدول ۲. شماره و نام ایستگاه های خط ٤ متروی تهران

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	شماره ایستگاه	نام ایستگاه
۱	ارم سبز	۱۱	فردوسی
۲	شهرک اکباتان	۱۲	دروازه دولت
۳	بیمه	۱۳	دروازه شمیران
٤	میدان آزادی	۱٤	میدان شهدا
٥	استاد معین	۱٥	ابن‌سینا
٦	دکتر حبیب‌الله	۱٦	پیروزی
۷	شادمان	۱۷	نبرد
۸	توحید	۱۸	نیروهوایی
۹	میدان انقلاب اسلامی	۱۹	شهید کلاهدوز
۱۰	تئاتر شهر	۲۰	تئاتر شهر

جدول شماره ۳ زمان توقف یک قطار در سکوی ایستگاه را نشان می‌دهد. این زمان شامل باز و بسته شدن درها، جابه‌جایی مسافران و گاهی انتظار برای هماهنگی با برنامه حرکت قطارها است. جدول شماره ٤ زمان فعال سیر و حرکت قطار را نشان می‌دهد که به مدت زمان بین رسیدن دو قطار متوالی به یک ایستگاه مشخص اشاره دارد.

جدول ۳. زمان توقف یک قطار در سکوی ایستگاه

شماره ایستگاه	زمان توقف (بر حسب ثانیه)	شماره ایستگاه	زمان توقف (بر حسب ثانیه)
۱	۲۵	۱۱	۲۵
۲	۲۵	۱۲	۴۰
۳	۲۵	۱۳	۲۵
۴	۳۰	۱۴	۲۵
۵	۳۵	۱۵	۳۰
۶	۳۰	۱۶	۴۵
۷	۳۰	۱۷	۲۵
۸	۲۵	۱۸	۳۰
۹	۲۵	۱۹	۳۰
۱۰	۲۵	۲۰	

جدول ۴. زمان فعال سیر و حرکت قطار

شماره بلاک بین دو ایستگاه	زمان فعال سیر و حرکت قطار (بر حسب ثانیه)	شماره بلاک بین دو ایستگاه	زمان فعال سیر و حرکت قطار (بر حسب ثانیه)
۱	۱۲۰	۱۱	۶۹
۲	۸۵	۱۲	۷۹
۳	۱۱۰	۱۳	۶۹
۴	۸۵	۱۴	۷۷
۵	۷۰	۱۵	۳۰۶۵
۶	۶۵	۱۶	۱۰۰
۷	۷۴	۱۷	۱۹۵
۸	۶۵	۱۸	۹۵
۹	۶۶		
۱۰	۷۰		

جدول ۵ سایر پارامترهای فنی مرتبط با مدل پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۵. سایر پارامترهای فنی مرتبط با مدل پژوهش

پارامتر فنی	مقدار	پارامتر فنی	مقدار
ظرفیت هر قطار	۱۲۰۰ تن	حداقل فاصله زمانی خروج	۳ دقیقه
زمان شانت	۱۹ ثانیه	حداکثر فاصله زمانی خروج	٤ دقیقه
اندازه جمعیت	۷۰	حداقل زمان توقف در ایستگاه	۵۰ ثانیه
تعداد تکرارها	۱۵۰	حداکثر زمان توقف در ایستگاه	۷۰ ثانیه
احتمال تقاطع	۰/۵	h_1	۰/۱
احتمال جهش	۰/۱	h_2	٤
k_1	۰/۵	h_3	۰/٤
k_2	٤	h_4	۰/۲
k_3	۰/٤	بیشینه فراوانی در جمعیت	۱
η	۰/۲	کمینه فراوانی در جمعیت	۰
m	۲		

داده‌های اولیه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه از وب‌سایت رسمی متروی تهران استخراج شده است. تحلیل این داده‌ها نشان می‌دهد که در ایستگاه شماره‌ی ۱۷، تعداد ۱۷ سرویس قطار در جهت شمال، به‌عنوان بخشی از عملیات گردش کوتاه فعال بوده‌اند. همچنین، خطوط نقطه‌چین نمایش‌داده‌شده در شکل مربوطه بیانگر سرویس‌های قطاری هستند که در جهت جنوب و به مقصد ایستگاه شماره‌ی ۱۹ لغو شده‌اند. این گروه در مجموع شامل ۲۲ سرویس قطار بوده است. مطابق با نتایج ارائه‌شده در جدول ٦، زمان‌بندی مجدد قطارها منجر به کاهش چشم‌گیر زمان انتظار مسافران درون سامانه شده است. پس از رفع وقفه‌ی عملیاتی، کلیه‌ی قطارها مجدداً به برنامه‌ی زمان‌بندی عادی و از پیش تعیین‌شده‌ی خود بازمی‌گردند.

جدول ٦. مقایسه نتایج محاسبات

الگوریتم استفاده شده	تابع هدف بر حسب ثانیه	WT_1 بر حسب ثانیه	WT_2 بر حسب ثانیه	WT_3
مقدار اولیه	۱۳۳٤۷۱٤۵۳۱	۲۲۹۷٤۱۰	۳۲٤۸۱۰۸	۷۸۰۱٦۲٤
الگوریتم ژنتیک	۱۲۷۰۷۷۳۲	۲۰٤۰۰٦۳	۲۹۱٦۱۱۰	۷۷۵۱۵۵۸
الگوریتم ژنتیک بهبود یافته	۱۱۱۹۵۱۵۵۵	۱۷۳٦۹۵۷	۱۸٦۹۵٤۷	۷۵۸۸۸۷٤

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت قطارها منجر به کاهش قابل‌توجه تعداد مسافرانی شده است که در ایستگاه‌ها باقی می‌مانند. این کاهش، ضمن جلوگیری از تجمع بیش از حد مسافران، به ارتقای ایمنی سفر نیز کمک می‌کند. همچنین، نتایج حاکی از آن است که تعداد مسافران حاضر در قطارهای خروجی از ایستگاه‌ها پس از اجرای مدل بهینه‌سازی، به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. این امر نه‌تنها موجب هماهنگی بهتر جریان مسافران و ترافیک ریلی می‌شود، بلکه به بهبود کیفیت تجربه سفر نیز منجر می‌گردد. علاوه بر این، تعداد مسافران پیاده‌شده در هر ایستگاه هنگام ورود قطارها نیز پس از بهینه‌سازی کاهش یافته است؛ موضوعی که نشان می‌دهد برنامه‌ی حرکت بهینه‌شده قادر است سفر مسافران را با کارایی بیشتری مدیریت کرده و در نتیجه، تراکم جمعیت در سکوها را به حداقل برساند. در مجموع، هر سه شاخص ارزیابی، کارایی و اثربخشی، مدل پیشنهادی را تأیید می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که این مدل می‌تواند تجمع مسافران را کاهش داده و کیفیت تجربه‌ی سفر در سامانه‌ی ریلی شهری را به‌صورت معناداری بهبود بخشد. در چارچوب این مدل، زمان حرکت (زمان خروج قطار) و زمان توقف در ایستگاه‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده‌اند. پس از حل مدل با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی و تحلیل خروجی‌ها، مقایسه‌ای میان فواصل زمانی حرکت بهینه‌شده (جدول ۷) و زمان‌های توقف بهینه‌شده در ایستگاه‌ها (جدول ۸) با مقادیر اولیه انجام شد.

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که تفاوت‌های قابل‌توجهی میان فواصل زمانی حرکت بهینه‌شده و مقادیر اولیه وجود دارد. در نسخه‌ی اولیه، فواصل زمانی حرکت به‌صورت ثابت و برابر با ۲ یا ۳ دقیقه تنظیم شده بود که اگرچه توزیع متعادلی از زمان‌های حرکت را فراهم می‌کرد، اما با الگوی واقعی تقاضای سفر مسافران سازگاری نداشت.

با این حال، راه‌حل پیشنهادی مدل امکان تنظیم فواصل زمانی پویا بین ۲ تا ۳ دقیقه را فراهم ساخت؛ تغییری که نه‌تنها ایمنی عملیات سیر قطارها را تضمین می‌کند، بلکه انطباق بهتری با نوسانات تقاضای مسافران نیز ایجاد می‌نماید.

جدول ۷ نتایج بهینه‌سازی سرفاصله‌های زمانی سیر و حرکت قطارها را نشان می‌دهد.

جدول ۸ به مقایسه نتایج بهینه‌سازی برای زمان توقف در ایستگاه می‌پردازد.

جدول ۷. نتایج بهینه‌سازی سرفاصله های زمانی سیر و حرکت قطارها

سیر قطار بین بلاک‌های مسیر	قبل از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه	بعد از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه	سیر قطار بین بلاک‌های مسیر	قبل از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه	بعد از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه
۱-۲	۱۰۸	۸۷	۱۰-۱۱	۱۰٤	۱۲۸
۲-۳	۱٦۰	۱۱۰	۱۱-۱۲	۹٦	۱۱۸
۳-٤	۹۵	۷۸	۱۲-۱۳	۱٤۰	۱۰۵
٤-۵	۹۵	۱۳۲	۱۳-۱٤	۹۵	۱۱۰
۵-٦	۱۰٦	۱۱۳	۱٤-۱۵	۹۵	۸۳
٦-۷	۱۰٤	۱۵۰	۱۵-۱٦	۹٦	۸۱
۷-۸	۱۱۰	۱٦۲	۱٦-۱۷	۹۵	۱۱۲
۸-۹	۱۰۲	۱۵۸	۱۷-۱۸	۹٦	۱۱۳
۹-۱۰	۱۰۱	۱۳۵	۱۸-۱۹	۹۵	۱۱۰

جدول ۸ نتایج بهینه‌سازی سرفاصله‌های زمانی سیر و حرکت قطارها

شماره ایستگاه	قبل از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه	بعد از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه	شماره ایستگاه	قبل از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه	بعد از اعمال الگوریتم بر حسب ثانیه
۱	۲۳	٤۲	۱۰	۳۵	۳۰
۲	۲۵	٤۵	۱۱	۳۰	٤۰
۳	۳۰	۳۷	۱۲	٤۰	۳۰
٤	۳۰	۳۷	۱۳	۲۵	۳٦
۵	۲۵	۳٦	۱٤	۲٦	۳۷
٦	۳۰	۳۵	۱۵	۳۰	۳٦
۷	۳۰	۲۵	۱٦	۳۰	۳۹
۸	۳۰	۳۷	۱۷	۳۵	٤۰
۹	۲۵	۳۵	۱۸	۳۰	۳۹

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تطبیق زمان‌بندی حرکت قطارها با الگوی تقاضای سفر مسافران به‌طور مؤثری موجب کاهش کل زمان انتظار مسافران در سامانه شده است. همان‌گونه که در جدول ۸ ارائه شده، زمان‌های توقف بهینه‌شده در ایستگاه‌ها تفاوت قابل‌توجهی با مقادیر ثابت اولیه دارند. به‌طور خاص، ایستگاه شماره‌ی ۱ بیشترین افزایش زمان توقف را تجربه کرده است؛ به‌طوری‌که این مقدار از ۲۳ ثانیه به ٤۲ ثانیه افزایش یافته است. در مقابل، ایستگاه شماره‌ی ۱۳ بیشترین کاهش را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که زمان توقف آن از ٤۰ ثانیه به ۳۰ ثانیه کاهش یافته است.

سایر ایستگاه‌ها، از جمله ایستگاه‌های ۲، ۳ و ٤، افزایش جزئی در زمان توقف داشته‌اند، در حالی که ایستگاه‌های ٦، ۷ و ۱٦ کاهش اندکی را تجربه کرده‌اند. در مجموع، زمان توقف کل در طول مسیر به میزان ۱۲۷ ثانیه افزایش یافته است. این افزایش، با فراهم آوردن فرصت بیشتر برای سوار شدن مسافران در ایستگاه‌ها، منجر به کاهش تراکم جمعیت در سکوها و در نتیجه، بهبود جریان سوار و پیاده شدن مسافران شده است.

در کل نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بروز رویدادهای اختلال در عملکرد شبکه‌ی مترو، به‌کارگیری روش تنظیم عملیات گردش کوتاه همراه با مدل بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت قطار مبتنی بر رفتار انتظار مسافران می‌تواند به‌طور مؤثر موجب کاهش زمان انتظار و ازدحام در سامانه گردد. این رویکرد، در نهایت، به افزایش سطح خدمات سامانه‌ی ریلی شهری در شرایط اختلال و بهبود پایداری عملکرد عملیاتی شبکه منجر می‌شود.

۵-نتیجه‌گیری

این پژوهش با اتخاذ رویکردی جامع، به‌طور هم‌زمان محدودیت‌های ایمنی بهره‌برداری قطار، ظرفیت زیرساخت ریلی و تغییرات زمانی تقاضای سفر را مدنظر قرار داده و راهکاری مؤثر برای مدیریت رخدادهای اختلال عملکرد در سامانه‌های ریلی شهری ارائه کرده است.

هدف اصلی تحقیق، توسعه‌ی مدلی برای زمان‌بندی حرکت قطارها با تمرکز بر کاهش زمان انتظار مسافران بوده است. با به‌کارگیری روش بهره‌برداری حلقه کوتاه و استفاده از الگوریتم ژنتیکی بازگشتی، این پژوهش موفق شده است رویکردی نوآورانه و قابل اجرا برای مدیریت اختلالات عملیاتی در شبکه‌ی مترو ارائه دهد. اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از طریق بررسی موردی یک رخداد اختلال واقعی در خط ٤ متروی تهران، کارایی و اثربخشی مدل را به‌صورت تجربی تأیید کرده است. یافته‌های حاصل نشان می‌دهد که اجرای طرح بهره‌برداری حلقه کوتاه در زمان بروز اختلال امکان ادامه‌ی فعالیت بخشی از قطارها را فراهم می‌آورد و با محدودسازی دامنه‌ی اثرات اختلال، از گسترش آن به کل شبکه جلوگیری می‌کند. این راهکار، ضمن افزایش اعتمادپذیری عملیاتی شبکه، با کاهش ازدحام در

ایستگاه‌ها و کاهش زمان انتظار مسافران، به افزایش سطح رضایت کاربران سامانه منجر می‌شود.

افزون بر این، بهینه‌سازی فاصله زمانی حرکت قطارها در بازه‌ی ۱٫۵ تا ۳ دقیقه موجب ایجاد انطباق بهتر با تغییرات تقاضای سفر مسافران شده و ضمن حفظ ایمنی بهره‌برداری قطارها، به‌طور مؤثر کارایی سامانه‌ی ریلی شهری در شرایط اختلال را ارتقا می‌دهد. این دستاوردها بیانگر برتری مدل پیشنهادی نسبت به برنامه‌ریزی‌های سنتی و ایستا است که از انعطاف لازم برای پاسخ‌گویی به تغییرات تقاضای سفر برخوردار نبودند. از منظر نظری، این پژوهش توانسته است شکاف‌های موجود در ادبیات مدیریت اختلال عملکرد در سامانه‌های ریلی شهری را پوشش داده و مدلی یکپارچه برای ارتقای کیفیت خدمات در شرایط غیرعادی ارائه کند. با این حال، چالش‌هایی نظیر وابستگی مدل به دقت داده‌های تقاضای سفر و دشواری محاسباتی الگوریتم بهینه‌سازی از جمله محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شوند. در این راستا، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی:

–پیش‌بینی تقاضای متغیر سفر با دقت بالاتر توسعه یابد؛

–الگوریتم‌های محاسباتی کارآمدتر برای حل مدل در مقیاس‌های بزرگ‌تر مورد بررسی قرار گیرند؛

–کاربرد مدل در سایر خطوط مترو با ویژگی‌های بهره‌برداری متفاوت ارزیابی شود تا توان تعمیم‌پذیری نتایج افزایش یابد.

در مجموع، این پژوهش با ارائه‌ی چارچوبی علمی، منسجم و کاربردی، گامی مؤثر در جهت ارتقای مدیریت اختلالات در شبکه‌های ریلی شهری برداشته و زمینه‌ای برای افزایش کارایی، پایداری و کیفیت خدمات حمل‌ونقل ریلی در شرایط بحرانی و ناپایدار فراهم نموده است.

٦- مراجع

–جعفری، خلج، مهران و صالحی، پژمان (۲۰۲٤). طراحی مدلی پایدار برای مساله زمان‌بندی قطارهای متروی تهران با رویکرد بهینه‌سازی استوار. *محاسبات نرم*، ۱۳(۱)، ۹۵–۷٦.

–خاکباز، نوروزی، کامبوزیا، یلداشخان و ماهان (۲۰۲٤). تحلیل عددی و فنی کفایت ریل و اثرگذاری لایه‌های الاستیک در زیرسازی بتنی قطارهای شهری (مطالعه موردی: خط قطار شهری شیراز). *نشریه جاده*، ۳۲(۱۲۰)، ٤۸–۳۳.

-Bafandkar, S., Shafahi, Y., Eslami, A., & Yazdiani, A. (2025). Digitalizing railway operations: An optimization-based train rescheduling model for urban and interurban disrupted networks. *Digital Engineering,* 5, 100033.

-Bian, F., Hu, Z., & Zhou, Y. (2025). Going off the rails? Metro as a hedge against the decapitalisation effects of state-backed reference price polices on housing values. *Cities,* 164, 106072.

-Dragu, V., Oprea, F. C., & Roman, E. A. (2025). Assessment of Bucharest Metro Expansion and Its Correlation with the Territorial System. *Land,* 14(5), 946.

-Fernández-Rodríguez, A., Domínguez, M., Cucala, A. P., & Fernández-Cardador, A. (2025). Transport capacity maximization in rail mass transit stations under uncertainty. *IEEE Access*.

-Güngüneş, R., Ateş, V., & Çam, E. (2025). Energy Efficient Dynamic Driving Technique Modeling with Flower Pollination and Grey Wolf Optimization Algorithms in Urban Rail Transportation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,* 18758967251358114.

-Ishaq, M., Shukla, P. K., Ashfaq, H., & Maurya, V. K. (2025, May). Optimization of time-headway of a sub-urban rail transport system using communication based train control system. In AIP Conference Proceedings *AIP Publishing LLC.,* Vol. 3305, No. 1, 040005-040006.

-Klahn, V., & Stolting, V. (2025). A new approach for planning and optimisation of urban railway systems. *WIT Transactions on The Built Environment,* 18.

-Kozhabek, A., & Chai, W. K. (2025). Robustness assessment of urban road networks in densely populated cities. *Applied Network Science,* 10(1), 29.

-Ma, Z., Hu, D., Chien, S. I. J., Liu, J., Liu, Y., & Wu, K. (2025). Robustness of urban rail transit networks considering cascade failure under attacks: A case study of Nanjing, China. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems,* Part A: Civil Engineering, 11(1), 04024093.

-Mahajan, K., Tomar, S., & Saini, V. (2025). Job Search: Bridging the Miles to Non-Metro Locations. Available at SSRN 5286027.

-Rziki, M. H., Hadbi, A. E., Boutahir, M. K., & Abounaima, M. C. (2025). Adaptive Predictive Maintenance and Energy Optimization in Metro Systems Using Deep Reinforcement Learning. *Sustainability,* 17(11), 5096.

-Sruthilaya, D., Vilventhan, A., & Gopal, P. R. C. (2025). Development of a project complexity measurement model for metro rail projects. Engineering, *Construction and Architectural Management,* 32(4), 2728-2744.

-Yousefi, M. (2025). Characterizing the Performance of Fixed-Block and Moving-Block Signal Systems in Urban Rail Transit: A Microscopic Simulation Approach. *In Transportation Research Board Annual Meeting*.

-Ramli, M. F., Che Hashim, H. I., Jamalludin, Z., Muhamad Tamyez, P. F., Mohd Lazi, M. K. A., & Abd Aziz, N. A. (2025). Financial Contingency Planning of the Operation and Maintenance in Global Urban Railway: A Narrative Review. *Global Business & Management Research,* 17.(۱)

-Rani, V., & Kumar, S. (2025). Type-2 picture fuzzy VIKOR approach based on TODIM for evaluating last-leg delivery in metro cities in India. *Applied Soft Computing,* 113640.

Robust Optimization of Train Timetabling under Operational Disruptions to Reduce Passenger Waiting Time in Tehran Metro

Pejman Salehi, Department of Industrial Engineering, Robat Karim and Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.
***Mehran Khalaj,** Department of Industrial Engineering, Robat Karim and Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.*
Davood Jafari, Department of Industrial Engineering, Parand and Robat Karim Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.
Parisa Mousavi Aharanjani, Department of Industrial Engineering, Robat Karim and Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran.

E-mail: khalaj@iau.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT
Operational disruptions in urban rail transit systems can significantly impair service performance, causing overcrowding, passenger confusion, and unscheduled train halts. This study introduces an innovative strategy based on short-turn operations to mitigate such impacts and enhance service quality during disruption periods. An optimization model is developed that accounts for train safety constraints, fleet capacity, and dynamic passenger demand, aiming to minimize total passenger waiting time. The model enables rapid generation of alternative train schedules under abnormal conditions, improving travel efficiency through coordinated dispatching and optimal resource allocation. To solve the model, an Improved Genetic Algorithm (IGA) is proposed and applied to a case study on Line 4 of the Tehran Metro. Results show that the approach maintains train headways between 3–5 minutes, ensuring operational safety and better alignment with demand fluctuations. This leads to reduced platform waiting times and improved overall service levels. Comparative analysis with a conventional genetic algorithm highlights the IGA's superior convergence speed and computational efficiency.

Keywords: Urban Rail Transit, Operational Disruptions, Genetic Algorithm, Train Timetable Rescheduling, Robust Optimization