

بازیابی جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای متروی تهران با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار

مقاله علمی - پژوهشی

پژمان صالحی*، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران
مهران خلج، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران
داود جعفری، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: pejmansalehi.metro@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۲۱۲-۱۹۳

چکیده

متروی تهران به طور معمول در معرض بروز اختلال‌های ناخواسته‌ای است که می‌تواند سبب ایجاد تغییرات جزئی یا کلی اجتناب‌ناپذیر در نظم جداول زمان‌بندی اولیه گردد. نتیجه بروز این قبیل وقایع برنامه‌ریزی‌نشده می‌تواند با غیرقابل اجرا نمودن جداول از پیش طراحی‌شده، بر وقت‌شناسی حرکت‌های مسافری و در نتیجه میزان مطلوبیت سفرهای مترو تأثیر بگذارد. در وضع موجود شبکه متروی تهران، مسئولیت مدیریت و بازیابی جداول زمانی در شرایط بروز اختلال بر عهده راهبران مرکز کنترل ترافیک قرار دارد. آنها از طریق ارائه راهکارهای مبتنی بر اصول مدیریت اختلال به حذف اعوجاجاتی نظیر پیشامد بروز تأخیر در حرکت‌ها، لغو اعزام‌ها، ازدحام بیش از حد و غیره... اقدام می‌نمایند. با این حال راهکارهای اجرایی شده توسط راهبران مرکز کنترل ترافیک از کیفیت مطلوب برخوردار نیست. افزون بر آن، به طور معمول در شبکه مترو لازم است اختلال‌ها ظرف چند دقیقه مرتفع گردد تا از بروز اثر تجمعی و پراکندگی در ترافیک سیر و حرکت قطارها و خطوط جلوگیری شود که این امر یکی از مسائل چالش‌برانگیز در مدیریت ترافیک خطوط مترو به شمار می‌رود. از سوی دیگر با توجه به مقیاس و گستره خطوط متروی تهران، لازم است پیچیدگی‌های محاسباتی و فضای جواب برای رویکردهای حل مسئله دقیقاً معین و در دسترس باشد تا تصمیم‌گیری بهینه امکان‌پذیر شود. طی سال‌های اخیر مدل‌های برنامه‌ریزی مجدد ترافیک مترو برای افزایش سرعت بازیابی جداول و پشتیبانی از تصمیمات مراکز کنترل ترافیک توسعه‌یافته است. یک الگوی اخیر استفاده از شبکه «رویداد - فعالیت» است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. روابط ریاضی حاکم بر این چارچوب مبتنی بر نمودارهای شبکه‌ای است که می‌تواند طیف وسیعی از وظایف و فعالیت‌های زمان‌بندی مجدد را مورد پشتیبانی قرار دهد؛ بنابراین تحقیق حاضر با استفاده از شبکه «رویداد - فعالیت» و با لحاظ عامل زمان به بررسی حرکت چرخشی ناوگان قطارها در عملیات ورود و خروج قطارها از پایانه‌ها و سایر ایستگاه‌های طول مسیر پرداخته است. با توجه به آنکه استقرار مدل‌های بهینه‌سازی، ضریب توفیق نتایج و احتمال عملیاتی‌شدن تصمیمات کنترل‌کننده ترافیک در مجموعه موجه جواب مسئله افزایش می‌دهد؛ لذا در الگوی پیشنهادی تحقیق حاضر با در نظر گرفتن عوامل مرتبط با ظرفیت ناوگان و حجم مسافری سکوها به تدقیق و محاسبه روابط بازیابی جداول زمان‌بندی پرداخته شده است. در روش پیشنهادی تحقیق حاضر با استفاده از تدقیق ازدحام مسافری سکوها و داشتن مقدار متغیر تأخیرهای در فضای حالت پیشامدها، اقدامات کنترلی مرتبط را برای افزایش کارآمدی بازیابی جداول زمان‌بندی پیاده‌سازی نمود. علی‌رغم آنکه روش حل مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با توجه به طیف استفاده از متغیرهای باینری دشوار به نظر می‌رسد با این حال مسیر محاسباتی را به‌منظور تعیین دقیق زمان انتظار، حجم مسافری و کنترل ازدحام و تأخیر امکان‌پذیر می‌نماید. همچنین برای تحلیل تقاضای مسافری و بهبود کارایی سیستم در مواجهه با پیچیدگی‌های ناشی از تعدد اعزام‌های مسافری از الگوریتم جستجوی همسایگی استفاده شده است. در این تحقیق الگوریتم جستجوی همسایگی می‌تواند با استفاده از تکمیل جواب راه حل مناسب با فضای حالت مسئله را به‌صورت کارآمد کشف نموده و به‌این‌ترتیب یک توازن منطقی میان زمان حل مسئله و کیفیت جواب‌ها ایجاد نماید. مطالعه موردی پژوهش حاضر با استفاده از برنامه زمان‌بندی ناوگان خط چهار متروی تهران حداقل ایستگاه‌های «کلاهدوز» تا «بیمه» انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته، نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته در تحقیق حاضر با لحاظ حجم مسافری قطارها، زمان انتظار در سکوها و تأخیر قطارها در ایستگاه‌های تقاطعی به‌منظور بازیابی جدول از طریق رویکرد عدد صحیح مختلط و الگوریتم جستجوی همسایگی می‌تواند راه‌حل‌هایی با کارایی و کیفیت بهتر ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: بازیابی جداول زمان‌بندی، متروی تهران، مدیریت اختلال، ایستگاه‌های تقاطعی، ظرفیت مسافری

۱- مقدمه

بهینه به‌ویژه در مواقع بروز اختلال و مدیریت شرایط بحرانی کمک شایانی می‌نمایند (فرهی و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال مطالعه پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که مدیریت اختلال و بازیابی جداول خطوط مترو در تحقیقات گذشته به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق وانگ و فانگ (۲۰۱۷)، محققان با تمرکز بر کاهش تأخیرهای برنامه‌ریزی نشده در سیر و حرکت ناوگان قطارها، به‌منظور حصول اطمینان از اعزام به‌موقع قطارها و عدم تداخل با زمان سیر سایر قطارهای فعال در شبکه، به ارائه رویکردی برای برنامه‌ریزی مجدد جداول زمان‌بندی بدون تأثیر بر سایر ارکان عملیات سیر و اعزام در برنامه‌ریزی شبکه مترو نظیر برنامه توقف و خروج قطار از ایستگاه‌های طول مسیر، برنامه زمان‌بندی کارکنان و غیره پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بازیابی جداول زمانی بر اساس بروز اختلال در شبکه مترو به دلیل دامنه اثرگذاری تأخیرها بر لغو حرکت‌های مسافری، از اولویت بالاتری برای برنامه‌ریزی مجدد نسبت به زمان‌بندی ناوگان و کارکنان مترو برخوردار است. در برخی دیگر از مطالعات، محققان با استفاده از مدل‌های ماکروسکوپی، اثرهای مداخله‌ای را برای سایر جزئیات فنی نظیر سیگنال‌ها، سوزن‌ها، قطعات ریلی، سوئیچ‌ها و غیره، از روند پژوهش خود حذف نموده و از طریق کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی مدل‌های ماکروسکوپی به تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر زمان‌بندی شبکه‌ها و تأثیر کلی اختلال‌ها پرداخته‌اند. یک جنبه تازه از مدل‌های ماکروسکوپی، رویکرد «رویداد - فعالیت» است که می‌تواند طیف وسیعی از اقدامات کنترلی مرکز ترافیک مترو را برای نیل به راهکارهای عملی در کنترل اعوجاج‌ها پشتیبانی نماید (معاونی و نجفی، ۲۰۲۰). در مطالعاتی که از رهیافت «رویداد - فعالیت» استفاده می‌شود، عمدتاً تمرکز محققان بر مراحل برنامه‌ریزی سیر و حرکت قطارها به معنای تدقیق زمان‌های ورود و خروج قطارها از مبادی اعزام و ایستگاه‌های طول مسیر بوده است که با استفاده از شبیه‌سازی گردش قطارها در مسیر مترو، جریان سیر و اعزام را بر اساس جداول زمان‌بندی از پایانه‌ها و سایر ایستگاه‌ها تدقیق نموده و بدون در نظر گرفتن نقش مداخله‌گر مبادی حرکت و اعزام، راه‌حل‌های ممکن را از فضای موجه برای شرایط واقعی و در نهایت مدیریت اختلال با تأکید بر زمان بافر در نظر گرفته‌اند. در سال‌های اخیر در تحقیقات بیشتری، محققان عامل زمان انتظار و ازدحام مسافری را در شبکه مترو لحاظ نموده و اثرات اختلال‌های شبکه را بر رفتار مسافری در مسیرهای اصلی

مترو یکی از شبهه‌های مهم و سریع برای حمل‌ونقل شهروندان در کلان‌شهرها محسوب می‌شود. سطح پیچیدگی‌های ساختاری در جداول زمانی شبکه مترو به تراکم جمعیت هر منطقه جغرافیایی و اهمیت ایستگاه تقاطعی در انتقال مسافران سایر خطوط بستگی دارد (خسروسرشکی و معاونی، ۲۰۲۱). مدیریت جداول زمان‌بندی در مترو، بسته به تقاضای مسافری، زمان انتظار و سرفاصله زمانی می‌تواند در مواجهه با اختلالات ترافیکی، درجه‌ی متفاوتی از آسیب‌پذیری را از خود نشان دهد (مانینو و ماسکیس، ۲۰۱۵). یکی از نمونه‌های قابل‌توجه از شبکه حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری با تقاضای مسافری بالا، زمان معمول و تعداد ناوگان کم متروی تهران است (آرشیو اسناد رسمی مترو، ۱۴۰۲). متروی تهران روزانه بیش از دو میلیون مسافر را جابه‌جا می‌نماید. بررسی آمارهای ترافیکی متروی تهران نشان می‌دهد که به طور متوسط در طول هر روز ۱۰ اختلال (در طیف کوچک تا بزرگ) در شبکه متروی تهران رخ می‌دهد که می‌تواند اجرای کامل و دقیق جداول زمان‌بندی از پیش طراحی‌شده را غیرمقدور نموده و سطح رضایت مسافری را متأثر سازد (همان منبع، ۱۴۰۲). از این رو یافتن جواب‌های مؤثر برای بهینه‌سازی زمان سفر و بازیابی جداول پس از وقوع اختلال می‌تواند راندمان عملیات را حدود زیادی افزایش دهد (میرید و دهقانی، ۲۰۲۳). کنترل و مدیریت اختلال‌ها و اعوجاجات ترافیکی در شبکه مترو از جمله وظایفی است که بر عهده مرکز کنترل ترافیک قرار داده شده است. کنترل تأخیر در اعزام و دریافت قطارها از مبادی حرکتی و ایستگاه‌های طول مسیر با توجه به مقیاس شبکه و پیچیدگی‌های موجود تا حدودی دشوار به نظر می‌رسد (شانزنباخر و همکاران، ۲۰۲۱). از این رو اغلب برای مواجهه با انحراف‌های غیرمترقبه نظیر تأخیر و خرابی قطارها، از الگوهای پشتیبان تصمیم و ترکیب آن با تجارب راهبران مرکز فرمان استفاده می‌شود (استهلی و همکاران، ۲۰۲۳). رویکرد مزبور اگرچه برای بازیابی جداول زمان‌بندی با توجه به طراحی اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما نتایج به‌ندرت به نقطه بهینه نزدیک است و این بدان علت است که برنامه‌ریزی مجدد جداول زمان‌بندی توسط کاربران سامانه‌ها در حالت‌های بروز اختلال ترافیکی از منظر محاسباتی گاه فرایندی بسیار پیچیده و زمان‌بر است (خسروسرشکی و معاونی، ۲۰۲۱). در طی سال‌های اخیر عناصر سخت‌افزاری کامپیوتر (نظیر RAM و CPU) و نیز الگوریتم‌های حل مسئله، پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌اند که در نتیجه به کنترل‌های مرکز فرمان در بازیابی جداول

پسا کرونا مسئله مهم فراروی متروی تهران، ازدحام بیش از حد خطوط ریلی است. در یک مطالعه که توسط مورالس و همکاران (۲۰۲۰) انجام شده است، محققان با استفاده از روش برنامه ریزی خطی عدد صحیح به طراحی جداول زمانی بر اساس تخمین میزان تأخیر و ازدحام مسافری پرداخته و به ارائه مدلی برای توصیف رفتار شبکه در شرایط بروز اختلال پرداخته اند. با این حال مدل ارائه شده در مطالعه مزبور با توجه به پیچیدگی محاسباتی بالا برای حل مسائل زمان بر بوده و تعداد متغیرهای بالای موجود در آن، زمان محاسبات را افزایش داد. از این رو یافتن یک الگوریتم مناسب که میان زمان حل و کیفیت راه حل در فضای جواب تعادل ایجاد نماید، اهمیت می یابد. با توجه به آنچه در فوق گفته شد استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی، یک رویکرد معمول برای مسائل مسیریابی ناوگان قطارها و طراحی مجدد جداول زمان بندی در شبکه مترو به شمار می رود که می تواند بر اساس رهیافت «رویداد - فعالیت» به مدیریت اختلالات و بازیابی جداول مترو کمک نماید.

به سمت مقاصد و در ایستگاه های تقاطعی بررسی کرده اند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین فعالیت های مرتبط با زمان بندی مجدد شبکه مترو در شرایطی نظیر بروز تأخیر یا لغو اعزام ها می تواند بر جریان مسافری در ایستگاه های تقاطعی تأثیر گذارده و انتقال مسافران میان خطوط مترو را با اشکال روبرو سازد (تانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در مطالعه ای که توسط ویلکی انجام شده است محقق مسئله مسیریابی در خطوط مترو را با لحاظ الگوی تغییر جهت جریان مسافری و به طور خاص تأثیر اقدامات برنامه ریزی مجدد بر رفتار مسافری در تحقیق خود منعکس کرده است (ویلکی و همکاران، ۲۰۱۸). با این حال افزایش پیچیدگی های محاسباتی در مدل های بازیابی جداول، مسئله مسیریابی مجدد را متأثر ساخته و همگرایی میان خروجی های کارکردی مدل و قابلیت پیاده سازی را ضروری نموده و در نتیجه می تواند بر مسیریابی مسافری به ویژه در شرایط بروز اختلال و ازدحام مسافری قطارها و ایستگاه تأثیر گذار باشد (ون پروژم و همکاران، ۲۰۱۱). از سوی دیگر در دوران

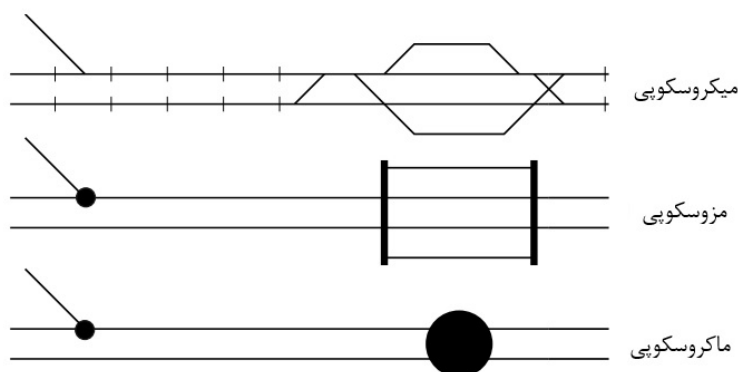
۲- پیشینه تحقیق

برای مدل سازی شبکه مترو، معمولاً از رویکردهای سه سطحی مرسوم برای تبیین جزئیات استفاده می شود که در برخی مطالعات و کتاب ها از آن با عنوان الگوهای میکروسکوپی، ماکروسکوپی و مزوسکوپی یاد شده است که با توجه به اهداف تحقیق، در یک سطح خاص می تواند بر دیگری ترجیح داده شود (شن و همکاران، ۲۰۲۳). در شیوه های میکروسکوپی، هدف یافتن راهکارهایی است که با توجه به شرایط دنیای واقعی و با لحاظ سطح کاملی از تمامی جزئیات نظیر سیگنال، سوزن، سوئیچ های ردیابی قطار در مسیر و غیره قابل پیاده سازی باشند؛ اما با این حال کارایی این مدل با افزایش مقیاس شبکه به دلیل زیاد شدن پیچیدگی کاهش می یابد؛ از این رو عمدتاً از این مدل برای تعیین پروفایل سرعت قطار با توجه به ویژگی های قطعات ریلی در مواجهه با تأخیر استفاده می شود (لی و همکاران، ۲۰۲۱). الگوی ماکروسکوپی در شبکه مترو در سطحی قدری کلان تر، اغلب جزئیات را نادیده می گیرد. در این مدل ایستگاه های مترو به عنوان گره (رأس) و خطوطی که رأس ها را به هم متصل می نمایند یال های شبکه در چارچوب یک سامانه گرافی در نظر گرفته می شوند. در این شیوه سایر جزئیات نظیر قطعات ریلی برای کاهش بار محاسباتی کنار گذاشته می شوند (والستروم و همکاران، ۲۰۱۶)؛ بنابراین با استفاده از مدل های ماکروسکوپی

مطالعه ادبیات موضوع نشان می دهد که کمتر مدل های ارائه شده برای مدیریت اختلال در شبکه مترو به ظرفیت مسافری در تحقیقات خود اشاره ای داشته اند که این امر عمدتاً ریشه در پیچیدگی های محاسباتی با توجه به زمان انتظار و ازدحام و شدت پیشامد اختلال دارد. لذا مشاهده می شود که این امر با افزایش تقاضای برای استفاده از مترو طی سال های اخیر، نمود بیشتری یافته است (خسروسرشکی و معاونی، ۲۰۲۱). بنابراین، لحاظ کردن زمان انتظار و حجم مسافری در مدیریت و کنترل اختلالات می تواند به تدقیق و تحویل خروجی های قابل اطمینان برای مدل پیشنهادی منجر شود. از این رو مسئله اصلی تحقیق حاضر آن است که در شرایط بروز اختلال در شبکه مترو چگونه می توان رابطه ای را برای مدیریت زمان انتظار و حجم مسافر در ساختار ترافیک تدوین و راهبری مسافر را به ویژه در ایستگاه های تقاطعی به صورت کارآمد برای حالت های نظیر تأخیر، لغو اعزام و ازدحام بهینه سازی نمود؟ برخی پرسش های فرعی تحقیق حاضر به شرح زیر است: مدل بهینه مدیریت ترافیک شبکه مترو با توجه به حجم مسافری و تعداد ناوگان قطارها کدام است؟ رویکرد مناسب مدیریت مؤثر اختلال ها در ایستگاه های تقاطعی با توجه به تقاضای مسافری کدام است؟

ماکروسکوپی به شمار می‌رود که برخی جزئیات اضافی نظیر مسیرهای ورود و خروج قطار از ایستگاه‌ها یا سیگنالینگ قطعات ریلی را در خود داشته و در مقایسه با الگوی ماکروسکوپی، با حفظ سطحی معقول از پیچیدگی‌های محاسباتی، مدیریت شبکه‌های گسترده ریلی را در شرایط نزدیک به واقعیت امکان‌پذیر نماید. شکل ۱ خطوط ریلی، تشکیلات منطقه ایستگاهی، اتصال میان ایستگاه‌ها و منطقه تعویض خط (شانت) را در خطوط مترو برای سطوح میکروسکوپی، مزوسکوپی و ماکروسکوپی نشان می‌دهد.

منطقه شانت (تعویض خط)



شکل ۱. خطوط ریلی، تشکیلات منطقه ایستگاهی، اتصال میان ایستگاه‌ها و منطقه تعویض خط (شانت) در خطوط مترو برای سطوح میکروسکوپی، مزوسکوپی و ماکروسکوپی (منبع: آرشیو اسناد فنی متروی تهران، ۱۴۰۲)

وجود دارد، نخست: خطوط ریلی درون شهری مانند خط چهارم و دوم؛ دوم: خطوط ریلی حومه‌ای نظیر «تهران - کرج» و «تهران - پرند». در مبادی و مقاصد مختلف متروی تهران، برخی منابع شبکه همان سکوها، سیگنالینگ، قطعات ریلی و نظایر آن هستند که بر اساس جدول زمان‌بندی به ناوگان قطارها تخصیص داده می‌شود. در خط پنجم متروی تهران، سوزن‌ها امکانی را فراهم می‌نمایند که هر یک از قطارها بتوانند از هم سبقت گرفته و در مسیر ریلی به سیر و حرکت بپردازند. شبکه متروی تهران دارای ۲۱۷ رام قطار است که می‌توانند به طور متوسط روزانه بیش از ۲/۵ میلیون مسافر را جابه‌جا نماید؛ بنابراین، مشاهده می‌شود که تعداد اعزام قطارها در متروی تهران نسبتاً بالا بوده و از این رو هر مسافر در متروی تهران گاه ممکن است چندین جابجایی مختلف بین خطوط ریلی را داشته باشد. به این ترتیب و بر اساس مقاصد ریلی، مسافران می‌توانند با توجه به جداول زمان‌بندی مسیر حرکت خود را برنامه‌ریزی نمایند. در خط پنجم متروی

می‌توان شبکه‌های در مقیاس بزرگ را با تولید حد معقولی از پیچیدگی توصیف کرد. نتایج مرتبط با خروجی‌های مدل ماکروسکوپی به طور معمول زمان ورود و خروج قطار از ایستگاه‌های طول مسیر را در شرایط بروز تعارض با سایر قطارها در قطعات ریلی فرموله می‌نماید. از دیگر سولازم است. نتایج مدل‌های ماکروسکوپی در سطوح جزئی‌تر با خروجی‌های میکروسکوپی در شرایط واقعی هماهنگ باشد (همایون و همکاران، ۲۰۲۲). الگوی مزوسکوپی حالتی ما بین شیوه‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی است که در وهله اول یک مدل

توصیف شبکه‌های مترو و تأثیر ایجاد اختلال در سیر و حرکت قطارها در مسیر ریلی با استفاده از الگوهای مختلف انجام می‌شود. ساده‌ترین طرح ممکن به صورت یک مسیر ریلی تک خطه است که عمدتاً در ایستگاه‌های جزیره‌ای مترو نظیر مسیرهای خاص حلقوی کاربرد داشته به گونه‌ای که در این حالت در هر لحظه تنها یک قطار از هر قطعه ریلی عبور کرده و تا خالی شدن کامل آن قطعه، قطار دیگری به آن وارد نمی‌شود، به این ترتیب ضمن حفظ فاصله ایمنی، تردد قطارهای متوالی در مسیرهای بیضوی مترو امکان‌پذیر می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال آرایش متداول شبکه‌های مترو به صورت طرح‌های دو خطه است که در آن قطارها براساس تنظیمات سامنه سیگنالینگ در هر دو جهت به سیر و حرکت می‌پردازند. گاهی نیز شبکه‌های مترو دارای بیش از دو خط هستند که از آن در حالت کلی با عنوان مسیرهای N خطه یاد می‌شود (تزیاتور و همکاران، ۲۰۲۲). در متروی تهران عمدتاً دو نوع مسیر ریلی

تهران بر خلاف خطوط درون شهری، قطارها لزوماً در تمامی ایستگاه‌های مسیر توقف نداشته و برای قطارهای سریع‌السیر خط پنج، عبور از ایستگاه‌های طول مسیر تا ایستگاه گلشهر بدون توقف است. از دیگر سو به هنگام بودن و وقت‌شناسی یکی از ارکان مهم رضایت مسافری در شبکه مترو به شمار می‌رود (دیمیترو، ۲۰۲۲). در شرایط نرمال و بدون وجود اختلال، قطارها می‌توانند بر اساس جداول زمان‌بندی از پیش تعیین شده، مبادی اعزام را ترک نموده و به مقاصد برسند خود. با این حال بروز رویدادهای غیرمترقبه نظیر ازدحام مسافری، خرابی تجهیزات ثابت و متحرک و یا شرایط بد آب و هوایی می‌تواند سبب بروز اختلال در عملیات سیر و حرکت قطارها گردد. نمود واضح بروز اختلال در مترو تأخیر در متروی تهران، دریافت قطارها در مقاصد مسافری است؛ از این رو معمولاً در فرایند طراحی و اجرا، زمان‌هایی با عنوان زمان بافر در برنامه ریزی سیر و حرکت لحاظ می‌گردد که با استفاده از آن، یک قطار دارای تأخیر می‌تواند با افزایش سرعت سیر و یا کم‌کردن زمان توقف در ایستگاه‌های طول مسیر، انحراف از جداول زمان‌بندی را جبران نماید (تونگ و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال در برخی موارد ممکن است شدت و دامنه تأخیرها تا حدی باشد که زمان‌های بافر کارایی خود را از دست داده و در اثر تعارض با عملیات سیر و حرکت سایر قطارها اجرای دقیق اقدامات اصلاحی و بازیابی کامل جدول برای بازگشت به شرایط نرمال را ناممکن گرداند (لو و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین لازم است به منظور بازیابی جداول زمانی و مواجهه با اختلال‌های شبکه مترو اقدامات مؤثرتری طراحی و پیاده‌سازی شود که دامنه شمول آن نه تنها برنامه‌ی حرکت قطارها بلکه کارکنان، خدمه قطار، ایستگاه و سایر منابع را نیز در برگیرد (تبسم، ۲۰۲۳). در حالت کلی شبکه مترو با احتمال بروز دو دسته اختلال «جزئی و اصلی» روبرو است. اختلال جزئی بدان معناست که در اثر بروز اغتشاش بخشی از مسیر ریلی دچار انسداد شده، لیکن قطارها همچنان می‌توانند در خطوط موازی یا بخش‌های دیگر با ظرفیتی هرچند کمتر از مقدار اسمی به سیر و حرکت خود ادامه دهند در حالی که در اختلال کلی به علت انسداد کامل مسیر، اجرای جدول زمان‌بندی از پیش طراحی شده تقریباً ناممکن می‌گردد (مینگ و همکاران، ۲۰۲۳). معمولاً با توجه به ویژگی‌های مدل‌های ماکروسکوپی در تبیین عوامل و مقیاس‌های بزرگتر با پیچیدگی‌های محاسباتی کمتر، معمولاً برای مدیریت اختلال در

شبکه مترو مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا مدیریت اختلال در شبکه مترو دارای سه مرحله اصلی است که عبارتند از نخست: انتقال از جدول زمان‌بندی اولیه به جدول جایگزین (جدول تنظیم شده برای حالت اختلال)، دوم: مرحله عبور از اختلال و سوم: مرحله بازگشت به شرایط نرمال (هو و همکاران، ۲۰۲۱). در مرحله آغازین اختلال، حجم تردد قطارهای مترو به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. از آنجا که لازم است خدمات مسافری در ایستگاه‌های مترو همواره در دسترس باشد از این رو اعزام قطارها از مبادی طبق جدول زمان‌بندی اولیه ادامه می‌یابد. در مرحله دوم جدول زمان‌بندی جایگزین که برای شرایط اختلال تنظیم شده، اعمال می‌گردد و با کاهش تعداد قطارها در مسیر ریلی مرحله سوم که گام پس از رفع اختلال است، شروع می‌شود. در این مرحله عملیات سیر و حرکت قطارها طبق جدول زمان‌بندی از پیش طراحی شده، از سر گرفته می‌شود. اجرای این الگوریتم به‌ویژه در گام‌های اول و سوم عملاً اقدامی دشوار به نظر می‌رسد زیرا بانک اطلاعات تعبیه شده برای خبرگان ترافیکی از گستردگی لازم برخوردار نبوده و همچنین دستورالعمل‌های کم و گاه متنقضی برای راهبران مرکز کنترل ترافیک برای تبیین و شناسایی جنبه‌های مختلف اغتشاش‌ها در نظر گرفته شده است (وُ و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین مطالعه تحقیقات صورت‌گرفته، نشان می‌دهد که عمدتاً بخشی از مراحل یاد شده برای مواجهه با اختلالات مترو در نظر گرفته شده است. در یک مطالعه که توسط ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) انجام شده، محققان به ارائه مدلی برای مدیریت اختلال در شبکه مترو پرداخته و با استفاده از اصول مدیریت اختلال، زمان‌های بافر بازیابی جداول زمان‌بندی را در شرایط بروز اغتشاش در خطوط طراحی نموده‌اند. به طور مشابه در مطالعه‌ای که توسط خسروسریشکی و معاونی (۲۰۲۱) به مدل‌سازی ترافیک شبکه مترو در شرایط واقعی ایستگاه‌های تبادلی برای خطوط متقاطع متروی تهران پرداخته شده است. در تحقیق مزبور محققان از یک رویکرد بهینه‌سازی برای همگام‌سازی سیر و حرکت قطارها پس از وقوع اختلال پرداخته شده است. از طرفی برنامه‌ریزی زمانی شبکه مترو یک فرایند طولانی و زمان‌بر است که معمولاً به چندین رویه‌ی فرعی تقسیم می‌گردد که طی نمودن این مراحل مدیریت و کنترل ترافیک شبکه مترو را در حالت بروز اختلال امکان‌پذیر می‌نماید (خسروسریشکی و معاونی، ۲۰۲۱). در یک نگاه طراحی و پیاده‌سازی یک جدول زمان‌بندی منظم، دارای

مدیریت اغتشاش‌ها در شبکه مترو لازم است راهبران مرکز کنترل ترافیک، جداول زمان‌بندی حرکت قطارها را به گونه‌ای بازطراحی نمایند که تعارض میان قطارها حذف و تأخیرها به کمترین مقدار ممکن تقلیل یافته و زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی بر اساس اصول مدیریت اختلال تعدیل گردد (کیو و همکاران، ۲۰۱۸). در حالت کلی فعالیت‌های مرتبط با طراحی مجدد جداول بر اساس مدیریت اختلال‌های شبکه مترو، به منظور رفع تعارض‌های احتمالی و مرتفع نمودن تأخیرهای جزئی به سه دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از: زمان‌بندی مجدد، مرتب‌سازی پایدار و مسیریابی دوباره ناوگان (کاکیان و همکاران، ۲۰۲۳). در برنامه‌ریزی مجدد جداول برای حالت‌های بروز اختلال، فعالیت‌هایی از قبیل لغو اعزام‌ها، عدم توقف قطارهای دارای تأخیر در برخی ایستگاه‌ها، اضافه‌کردن زمان توقف برای قطارهای پشت‌سری، افزایش سرعت سیر قطارهای جلویی و اعزام قطار فوق‌العاده انجام می‌شود؛ از این رو زمان‌بندی مجدد در شبکه مترو فرآیند تغییر زمان سیر و حرکت و عبور قطارها از قطعات ریلی در حین اختلال و پس از آن است (چی و همکاران، ۲۰۲۲). اقدامات مرتبط با زمان‌بندی مجدد در شکل ۲ نشان داده شده است. در بازطراحی جداول زمان‌بندی، قطارهای فعال در فضای اختلال معمولاً با تأخیر مواجه می‌شوند و این بدان علت است که قطارها نمی‌توانند زودتر از برنامه اولیه ایستگاه را ترک نموده و به مسیر اعزام شوند. همچنین تعجیل در اعزام نیز می‌تواند برنامه مسافران را بر هم زده و از این جهت ممکن است نامطلوب باشد. تغییر طرح زمانی از منظر هدایت و ناوبری قطارها یک اقدام اصلاحی به شمار آمده و گاه سبب می‌شود قطار در ایستگاه‌های مجاور مدت بیشتری متوقف بماند. در زمان‌بندی مجدد همچنین لازم است امکانی فراهم شود تا جداول بر اساس شرایط جدید به گونه‌ای تنظیم شوند تا مسافران بتوانند از سایر قطارهای فعال در خطوط تقاطعی به‌ویژه در ساعات پایانی کار مترو استفاده نمایند (فروتوس برنال و همکاران، ۲۰۲۲). در کنترل ترافیک شبکه مترو لغو اعزام قطار از مبدأ یک اقدام کنترلی محسوب می‌شود که از آن برای کنترل پاره‌ای اختلالات جزئی استفاده می‌کنند. شکل ۳ لغو یک حرکت مسافری را نشان می‌دهد که در آن قطار از مبدأ اعزام نشده و در محوطه شانت باقی می‌ماند.

گام‌هایی است که عبارت‌اند از آنالیز تقاضای سفر، برنامه‌ریزی مسیر ریلی، برنامه‌ریزی ناوگان قطارها، برنامه‌ریزی تجهیزات ثابت و متحرک، برنامه‌ریزی کارکنان و خدمه قطار و ایستگاه (ژو و همکاران، ۲۰۲۳). تنظیم و تدوین جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها بخشی از برنامه‌ریزی راهبردی شبکه مترو محسوب می‌شود که غالباً به صورت سالانه تنظیم می‌گردد. معمولاً در پاره‌ای از تحقیقات برای سطوح کلان زمان‌بندی، برخی حالات خاص که ممکن است در فرایندهای روزانه عملیات سیر و حرکت قطارها رخ دهد در برنامه‌ریزی مجدد اختلال‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته و این بدان علت است که فضای جواب با قدری عدم قطعیت روبرو است و در نتیجه مدل سازی کامل پیشامدها را ناممکن ساخته است (ستیوکو و همکاران، ۲۰۲۲). در سطح تاکتیکی نیز اقدامات اغلب محدود به برنامه‌ریزی ناوگان قطارها، سایر وسایل نقلیه ریلی (مانند لکوموتیوها) و عملیات روزانه سیر و حرکت قطارها در مسیر ریلی است. در تنظیم مجدد و برنامه‌ریزی سیر و حرکت قطارها ابتدا زمان ورود و خروج هر قطار به خطوط ریلی مشخص می‌گردد و سپس جدول زمان‌بندی اولیه به‌عنوان ورودی اصلی برنامه‌ریزی مجدد قطارها مورد استفاده قرار می‌گیرد و در گام بعد به هر اعزام مسافری در جدول زمان‌بندی حرکت قطارها، یک قطار تخصیص داده می‌شود و در انتها نیز به زمان‌بندی مجدد خدمه پرداخته می‌شود و به هر قطار مترو دو راهبر (راهبر اصلی و کمکی) اختصاص داده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که هر قطار توسط یک راننده خاص هدایت می‌شود و در نهایت برنامه مجدد با توجه به زمان‌های بافر پیاده سازی می‌شود (ای و لو، ۲۰۲۱). خسروسرشکی و معاونی (۲۰۲۱) در مطالعه خود استدلال می‌کنند که در بسیاری از مدل‌های برنامه‌ریزی مجدد شبکه مترو، رویکردهای یکپارچه حد بیشتری از بهینگی را به همراه داشته و پایداری ترافیکی به‌ویژه در انتقال تأثیر اختلال به سایر ایستگاه‌ها به‌ویژه در خطوط تقاطعی را کاهش می‌دهند. در یک مطالعه دیگر که توسط باوشرت و همکاران (۲۰۱۷) انجام گردیده، محققان مسئله برنامه‌ریزی مجدد سیر و حرکت قطارها را در توازن با فعالیت‌های ورود و خروج قطارها از پایانه بر اساس تعداد وسایل نقلیه ریلی و ازدحام مسافری از طریق اصول مدل مدیریت اختلال مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌منظور



شکل ۲. فعالیت‌های زمان‌بندی مجدد قطارها در مسیر ریلی (منبع: سامانه جامع کنترل ترافیک متروی تهران، ۱۴۰۲)



شکل ۳. فعالیت‌های لغو اعزام قطار از مبدأ در مسیر ریلی (منبع: سامانه جامع کنترل ترافیک متروی تهران، ۱۴۰۲)

اصلی نماید. همچنین در راستای مدیریت اختلالات یکی از اقدامات می‌تواند افزایش زمان توقف قطار در برخی ایستگاه‌های طول مسیر باشد. این امر در شکل ۴ نشان داده شده است.

معمولاً در فرایند کنترل اعوجاج‌ها، اعزام قطار فوق‌العاده، آخرین مرحله در زمان‌بندی مجدد سیر و حرکت قطار محسوب می‌شود، اعزام قطار فوق‌العاده، اپراتور مرکز کنترل را قادر می‌سازد تا قطارهای اضافی را از محوطه شانت پایانه‌ها وارد خط



شکل ۴. فعالیت‌های مرتبط با افزایش زمان توقف قطار در برخی ایستگاه‌های طول مسیر (منبع: سامانه جامع کنترل ترافیک متروی تهران، ۱۴۰۲)

احتمالی رخ‌دادن تأخیر و لغو حرکت‌های مسافری است. با این حال بررسی ادبیات مربوط به مدیریت اختلال در شبکه مترو عمدتاً «کاربر - محور» بوده و اغلب بر حداقل رساندن تأخیرها و کاهش لغو حرکات مسافری تمرکز دارد (کونینگ، ۲۰۲۳). در سال‌های اخیر نظام مدیریت اختلال در مترو با توجه به نوع توپولوژی شبکه و ساختار مسئله به سمت «مسافر - محوری» تغییر داشته است. در یک مطالعه که توسط کورمن و همکاران

تدقیق زمان توقف هر قطار در ایستگاه‌های مترو به ویژه در هنگام بروز اغتشاش، هنگامی امکان‌پذیر است که قطارها بر اساس جداول زمان‌بندی در ایستگاه‌ها توقف و یا از آن عبور نمایند. در این صورت زمان انتظار مسافران در هر ایستگاه، زمان پاسخ به تقاضای مسافری از طریق اعزام قطارها و اقدامات کاهش ازدحام از جمله مؤلفه‌های مدل بهینه‌سازی سیر و حرکت قطارها محسوب می‌شود. محدودیت مهم تابع، ناظر بر چارچوب

۵ دقیقه برای جریان مسافر مدل نموده است. در مطالعه مزبور برنامه‌ریزی مجدد جدول و مدیریت اختلال، دارای ساختار «مسافر – محور» بوده و در آن بر مسیر حرکت مسافران بر اساس جدول زمان‌بندی طراحی شده در ایستگاه‌های تقاطعی تأکید شده است. در مطالعه یاد شده پیچیدگی زمان انتظار و اندازه مسافری از طریق تخصیص مسیرهای ثابت به جریان مسافری تحت کنترل درآمده است. جدول ۱. اطلاعات مرتبط با نمادهای اندیس‌ها و پارامترهای مسئله را نشان می‌دهد.

(۲۰۲۰) انجام شده، محققان تقاضای مسافری را با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح در شبکه مترو به صورت وابسته به زمان مدل‌سازی نموده و با لحاظ سری‌های زمانی، ایستگاه‌های تقاطعی و مسیرهای انتقالی مترو، نقطه بهینه مدیریت اختلال را بدون تغییر در مسیر با فرض قطعی بودن پارمترهای مسئله محاسبه نموده‌اند. در یک مطالعه دیگر که توسط شوپل (۲۰۱۰) انجام گردیده، محقق روابط حاکم بر شاخص‌های جریان مسافری در ایستگاه‌های تقاطعی را در قالب روابط ریاضی از طریق گسسته نمودن سری‌های زمانی با لحاظ زمان تقریبی

جدول ۱. اطلاعات نمادهای مربوط به اندیس‌ها و پارامترهای مسئله

نماد	تعریف
M_{event}	زمان برنامه‌ریزی شده، مدون و اصلی با توجه به رویداد e
$Sevent$	ایستگاهی است که رویداد خروج در آن به وقوع می‌پیوندد
v_{event}	قطاری که رویداد انتقال مسافر از مبدأ تا مقصد را در شرایط اختلال پوشش می‌دهد
$U_{line,e}$	مسیر ریلی برای قطار مرتبط با رویداد $event$
$v_{type,e}$	نوع قطاری است که به هر رویداد $event$ انتساب یافته
direction	جهت حرکت قطار در عملیات سیر و حرکت
μ_{event}	رویداد ورود و خروج‌های متوالی قطار
E_{da}	وقایع ورود و خروج متوالی قطارها
M_e	توصیف زمانی برای وقوع واقعه برنامه‌ریزی نشده
$Sevent$	ایستگاهی که رویداد برنامه‌ریزی نشده در آن به وقوع پیوسته
$Edum$	مجموع کل وقایع برنامه‌ریزی نشده
$A_{boarding}$	رویداد پیاده شدن مسافر از قطار
$A_{transfer}$	رویداد انتقال مسافر بین خطوط در ایستگاه‌های تقاطعی
E_{arr}	واقعه ورود قطار به ایستگاه
$A_{waiting}$	واقعه ورود قطار به ایستگاه
$u_{g,e}$	دسترس پذیری رویداد برای گروه‌های مسافری
$N_{g,e}$	تعداد فعالیت‌های مرتبط با $A_{g,e}$
$w_{before,g,e}$	گروه‌های مسافری در حال انتظار هنگام بروز سانحه
x_e	زمان وقوع رویداد قبلی
w_{after}	گروه مسافری خاص بعد از رویداد $event$
$\theta_{trains,g,e}$	مجموع کل مسافران در انتظار را برای هر گروه مسافری
$\theta_{want ,g,e}$	تعداد مسافرانی که به علت محدود شدن دسترسی امکان استفاده از مسیر دلخواه را در خطوط تقاطعی ندارند
$\theta_{can,e}$	تعداد مسافران حاضر در قطار
$\theta_{remain,e}$	ظرفیت باقی مانده یک قطار

مدلسازی مدیریت اختلالات سیر و حرکت قطارها با توجه به ظرفیت قطارها و زمان انتظار و حجم مسافری

قطارها و اقدامات مسیریابی حرکت مسافران در ایستگاه‌های تقاطعی به‌عنوان مفروضات مدل در نظر گرفته می‌شود.

باز طراحی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها در یک شبکه «فعالیت - رویداد» از زمان انتظار و جریان مسافری تأثیر می‌پذیرد. در این شیوه زمان انتظار مسافری در سکو، ظرفیت

ممکن است برخی مسیرها به علت بروز اختلال در دسترس نباشند. در این صورت مسافران در ایستگاه منتظر می‌مانند تا اختلال بر طرف شود.

جریان مسافری در ایستگاه‌های مترو به‌صورت مقادیر عددی پیوسته فرض می‌شود.

شبکه با یک رویداد تحت عنوان خروج متوالی و پیوسته توسعه می‌یابد و از این طریق می‌توان جریان مسافری را در مدل یکپارچه نمود. از رویداد خروج تکراری می‌توان برای ایجاد فعالیت‌های زمان انتظار و انتقال مسافری استفاده نمود. در مقایسه با رویداد خروج مرسوم در مترو، رویداد خروج مکرر ویژگی اضافه‌تری را نیز در خود دارد که می‌تواند رویدادهای فضای قطار و سکو را به رویداد خروج از ایستگاه به سمت قطار دیگر در ایستگاه‌های تبادلی پیوند بزند که آن را با μ_{event} نشان داده می‌شود.

برخی از ویژگی‌های رویداد خروج، در ادامه آورده شده است.

شبکه «فعالیت-رویداد» در رویکرد مسافر - محور

یک شبکه «فعالیت - رویداد» از طریق عوامل مرتبط با مسافر و جریان آن در شبکه مترو توسعه می‌یابد. در این روش پس از تعیین تعداد زمان انتظار و حجم مسافری، اقدامات بهینه‌سازی از طریق رویدادهای ورود و خروج در سکوه‌های مسافری انجام می‌شود.

مفروضات مدل

-تقاضای مسافری در مبدأ، ایستگاه‌های طول مسیر و مقصد مستقل از زمان فرض می‌شود زیرا در شبکه متروی تهران نرخ ورودی در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه، تغییر چندانی نخواهد داشت.

-مسافران عمدتاً پس از پیاده‌شدن از قطار اولین مسیر ممکن را با توجه به تسهیلات ایستگاه (آسانسور، پله برقی، ویلچر و غیره ...) انتخاب می‌کنند و این بدان معناست که پس از پیاده‌شدن از قطار هر مسیر به‌ازای هر رویداد خروج، دارای یک دسترسی است.

- M_{event} : که عبارت است از زمان برنامه‌ریزی شده، مدون و اصلی که با توجه به رویداد e با لحاظ اختلال و یا بدون لحاظ اختلال در جدول زمان‌بندی لحاظ شده است.

-ایستگاه S_{event} که بیانگر ایستگاهی است که رویداد خروج در آن به وقوع می‌پیوندد.

-قطار در حال سرویس که با V_{event} و نیز نشان‌دهنده قطاری است که رویداد انتقال مسافر از مبدأ تا مقصد را در شرایط اختلال پوشش می‌دهد.

-مسیر ریلی برای قطار مرتبط با رویداد $event$ با $v_{line,e}$ نشان داده می‌شود که ناظر بر مبدأ، مقصد، توقف‌های قطار در مسیر ریلی و بسامد تعداد عملیات سیر و حرکت هر قطار است. لازم به توضیح است که هر خط ریلی شامل تعدادی قطار در حال ارائه سرویس است. $v_{type,e}$ نشان‌دهنده نوع قطاری است که به هر رویداد $event$ انتساب یافته است. در متروی تهران انواع قطارها بر حسب سرعت عملیاتی آنها به دو نوع (DC و AC) تقسیم شده است.

- $Track_{re}$ نشان‌دهنده یک قطعه خاص از خط ریلی است که به رویداد $event$ تخصیص داده می‌شود. در متروی تهران، شبکه دارای دو خط موازی (شمالی - جنوبی یا شرقی - غربی) است.

- $direction$ جهت حرکت قطار در عملیات سیر و حرکت که می‌تواند در خط چهار متروی تهران به سمت شرق به غرب یا برعکس باشد. رویداد ورود و خروج‌های متوالی قطار از ایستگاه‌های مبدأ که در ارتباط با μ_{event} است در فرایند تنظیم زمان‌های اعزام لحاظ می‌گردد.

-مجموعه وقایع ورود و خروج متوالی قطارها از ایستگاه‌های مترو با E_{da} نشان داده می‌شود. یک واقعه برنامه‌ریزی‌نشده برای هر ایستگاه از طریق مقادیر اولیه به متغیر زمان انتظار و ازدحام مسافران در آن ایستگاه خاص نشان داده می‌شود.

-نخستین پیشامد خروج قطار در ایستگاه بر اساس پنجره‌های زمانی در یک رویداد برنامه‌ریزی‌نشده دارای ویژگی‌های زیر است.

-زمان برنامه‌ریزی M_e در واقع نشان‌دهنده توصیف زمانی برای وقوع واقعه برنامه‌ریزی‌نشده $event$ است که بر اساس آن، زمان بهینه‌سازی از آن نقطه آغاز می‌شود.

$Sevent$ نشان‌دهنده ایستگاهی است که رویداد برنامه‌ریزی‌نشده در آن به وقوع پیوسته است.

-مجموع کل وقایع برنامه‌ریزی‌نشده با E_{dum} نشان داده می‌شود.

فعالیت‌ها

فعالیت‌های میان دو رویداد مختلف به‌عنوان یک دنباله متوالی شناخته می‌شوند که رفتار مسافری را در هنگام بروز اغتشاش نشان می‌دهند. روابط مترتب بر این امر به‌صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$A_{boarding} = \{(e, e'): e \in E_{da}, e' \in E_{dep}, \mu_e = e'\} \quad (1)$$

در رابطه (۱) E_{dep} نشان‌دهنده واقعه خروج قطار از ایستگاه بوده و فعالیت‌های مرتبط با پیاده‌شدن مسافران از قطار در ایستگاه‌های تقاطعی این امکان را برای مسافران فراهم می‌آورد تا از قطاری که دچار نویز شده، پیاده شوند و از قطار دیگری برای سفر استفاده نمایند. (۲)

$$A_{transfer} = \{(e, e'): e \in E_{arr}, e' \in E_{dep}, M_e - M_{e'} \geq L_a, v_e \neq v_{e'}, s_e = s_{e'} = e'\}$$

در رابطه (۲) E_{arr} نشان‌دهنده واقعه ورود قطار به ایستگاه بوده و فعالیت‌های انتقال مسافر نیز اجازه می‌دهد مسافران از یک قطار به قطار دیگر در ایستگاه‌های تقاطعی جابه‌جا شوند.

$$A_{waiting} = \{(e, e'): e \in E_{dum}, e' \in E_{dum}, M_{e'} - M_e \leq\} \quad (3)$$

فعالیت‌های مرتبط با زمان انتظار و ازدحام مسافر که این امکان را برای مسافران فراهم می‌آورد تا در یک مبدأ واحد و در یک خط خاص منتظر قطار در حال سرویس در خط دیگری برای ایستگاه‌های تقاطعی باشد.

محدودیت‌های مرتبط با مسافر محوری

توجه به صف وظایف به ارائه رابطه‌ای جدید برای محاسبه زمان انتظار مسافران و رویدادهای بعدی نظیر انتقال مسافران به قطارهای دیگر در خطوط انتقالی پرداخته‌اند.

قلمرو یک شبکه «فعالیت - رویداد» با استفاده از برخی کارکردهای وظیفه‌ای نظیر سوارشدن به قطار، پیاده‌شدن از آن و زمان انتظار توصیف می‌شود. در یک مطالعه که توسط خسروسرشکی و معاونی (۲۰۲۱) انجام شده است، محققان با

مسیریابی مسافری در ایستگاه‌های تقاطعی

- O_g مبدأ گروه مسافری g است و D_g مقصد گروه مسافری g محسوب می‌شود.

-مجموعه گروه‌های مسافری در یک خط خاص به‌صورت g نشان داده می‌شود.

-برای هر گروه مسافری میان مبدأ و مقصد یک مسیر تعریف می‌شود.

-این مسیرها عمدتاً در طول خطوط ریلی و میان وقایع خروج از ایستگاه‌های طول مسیر و دریافت در ایستگاه مقصد تعریف می‌شود.

-مسیر هر گروه مسافری عمدتاً بر اساس سری‌های زمانی و داده‌های تاریخی تعیین می‌شود؛ بنابراین فعالیت‌های هر گروه مسافری در هر رویداد ریلی با $A_{g,e}$ نشان داده می‌شود.

به‌منظور انجام اقدامات مرتبط با برنامه‌ریزی مجدد سیر و حرکت قطارها لازم است، مسیرهای مسافری به‌طور دقیق توصیف شود. این مسیرها را در ایستگاه‌های تقاطعی می‌توان با استفاده از مختصات کامل ایستگاه مبدأ و مقصد شناسایی و تنظیم نمود. در این تحقیق فرض بر آن است که تقاضا برای مبدأ و مقصد مسافری مستقل از زمان است؛ بنابراین با فرض عدم تغییرات قابل‌توجه در نرخ مسافری، می‌توان اختلال را برای یک دوره زمانی کامل سیر و حرکت لحاظ نمود. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در دوره زمانی نسبتاً کوتاه، نرخ مسافر چندان تغییری نخواهد داشت (فرهی و همکاران، ۲۰۲۰). در تحقیق حاضر مسافران با مبدأ و مقصد یکسان برای یک دوره زمانی خاص در یک گروه مسافری لحاظ می‌شوند که دارای ویژگی‌های زیر است.

چنانچه پس از رویداد e مسیر برای گروه مسافری g در دسترس باشد $u_{g,e}$ دارای مقدار یک و در غیر این صورت مقدار آن برابر صفر خواهد بود. مسیرهای مسافری تنها زمانی در دسترس هستند که تمام فعالیت‌های مسیر بر اساس اولویت‌های زمانی در دسترس بوده و قطارها با توجه به جدول زمانی مقرر به طور نرمال به سیر و حرکت خود ادامه دهند.

از طرفی برخی از گروه‌های مسافری در جریان سیر خود در ایستگاه‌های تقاطعی میان خطوط جابه‌جا می‌شوند. به دلیل بروز اختلال در مسیر ریلی و انجام اقدامات مرتبط با زمان‌بندی مجدد، ممکن است برخی از مسیرها غیرقابل دسترسی شوند. از این رو برخی از مطالعات نظیر شانزنباخ و همکاران (۲۰۲۱) یک متغیر دودویی را به مسیری از گروه خاص مسافری g تخصیص داده‌اند که رویدادهای متوالی e مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو

$$u_{g,e} \leq (1 - c_e), \forall (e, e') = a \in A_{g,e} \forall g \in G, \forall e \in E_{da} \quad (4)$$

$$u_{g,e} \geq \sum c_e - (N_{g,e} - 1), \forall (e, e') = a \in A_{g,e} \forall g \in G, \forall e \in E_{da} \quad (5)$$

لغو نشده است. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر آنچه مقدار متغیر $u_{g,e}$ را تعیین می‌نماید فعالیت‌های $A_{g,e}$ است که امکان انتقال یک گروه مسافری خاص را در تمامی دوره زمانی برای حالت‌های سوار و پیاده‌شدن از قطار، انتظار در سکوی مسافری تا انتقال به قطار دیگر در ایستگاه تقاطعی در بر می‌گیرد. این مهم حتی می‌تواند حالتی را که قطار انتقالی در دسترس نیست را نیز پوشش دهد.

در روابط فوق $N_{g,e}$ ناظر بر تعداد فعالیت‌های مرتبط با $A_{g,e}$ است. از این رو محدودیت‌های فوق تضمین می‌نماید که برای یک مسیر مسافری در ایستگاه‌های تقاطعی، چنانچه یکی از مسیرها لغو گردد ($c_e = 1$) در این صورت مقدار ($u_{g,e} = 0$) خواهد بود. همچنین محدودیت شماره ۵ تضمین می‌نماید که مسیر جابه‌جایی مسافر در دسترس است و لذا $u_{g,e} = 1$ می‌باشد و این امر برای زمانی است که هیچ‌یک از فعالیت‌های مسافری

زمان انتظار مسافری

که سوار قطار می‌شوند و یا برای استفاده از خطوط دیگر سکو را ترک می‌کنند، تغییر می‌یابد. بنابراین چنین فرض می‌گردد که نرخ ورود مسافران به سکو ثابت باشد. در این صورت تعداد مسافران منتظر بر روی سکو را می‌توان برای هر گروه مسافری پیش از رویداد ترک سکو توسط قطار، محاسبه نمود.

به منظور محاسبه تعداد مسافران در حال انتظار برای هر ایستگاه لازم است به دو جزء مهم توجه شود: نخست تعداد قطارهایی که از هر ایستگاه خارج می‌شود و دوم: نرخ ورود مسافران به سکوی مسافری در روزهای هفته. با روی‌دادن یک واقعه خروج، نسبت تعداد مسافران حاضر بر روی سکو به آن تعدادی

$$W_{before,g,e} = W_{after,g,e'} + \eta_g(x_e - x_{e'}) + \theta_{trains,g,e}, \forall g \in G, e \in E_{da} \quad (6)$$

متغیری است که تعداد مسافران در انتظار را بلافاصله بعد از رویداد event نشان می‌دهد. $\theta_{trains,g,e}$ مجموع کل مسافران در انتظار را برای هر گروه مسافری نشان می‌دهد.

در رابطه (۶) x_e زمان وقوع رویداد قبلی، η_g تعداد مسافرانی را نشان می‌دهد که در یک لحظه خاص وارد ایستگاه می‌شوند. W_{after} برای یک گروه مسافری خاص به نام g نشان دهنده

$$W_{before,e} = \sum_{g \in G} W_{before,g,e}, \forall e \in E_{da} \quad (7)$$

مسافرانی که در رویداد خروج قطار از ایستگاه (e) سوار قطار هستند را می‌توان از مجموع کل مسافران در انتظار برای تمام گروه‌های مسافری به دست آورد. در این صورت می‌توان رابطه آن را به صورت رابطه ۸ نوشت.

هنگامی که در فرآیند سیر و حرکت قطارها یک رویداد برنامه ریزی نشده و غیرمترقبه رخ می‌دهد، برخی از مسافران حاضر در قطار از طریق همان وسیله نقلیه به مقصد می‌رسند. با این حال تعداد مسافران باقی‌مانده که مایلند از طریق قطار در شرایط اغتشاش به مقصد برسند با یک متغیر پیوسته مانند $\theta_{want,g,e}$

نشان داده می‌شود که مقدار عددی آن عبارت است از تعداد مسافرانی که به علت محدود شدن دسترسی، امکان استفاده از مسیر دلخواه را در خطوط تقاطعی ندارند. بنابراین تعداد کل

$$\theta_{want,g,e} = \sum_g \theta_{want,g,e}, \quad \forall g \in G \in E_{da} \quad (8)$$

سوار قطار شوند برابر است با حداقل تعداد مسافران منتظر بر روی سکو و آن مقداری که باقیمانده (جامانده) از قطاری هستند که ایستگاه را ترک نموده است. از این رو چنین نوشته می‌شود.

چنانچه قطاری در آستانه حداکثر مقدار ظرفیت خود قرار داشته و همه مسافران نیز نتوانسته‌اند سوار قطار شوند، در این صورت می‌توان ابراز محاسبه‌ی تعداد مسافرانی حاضر در قطار را با متغیر $\theta_{can,e}$ نشان داد. در این حالت تعداد مسافرانی که می‌توانند

$$\theta_{can,e} = \min(\theta_{can,e}, \theta_{remain,e}), \quad \forall e \in E_{da} \quad (9)$$

در رابطه شماره ۹ $\theta_{remain,e}$ ناظر بر ظرفیت باقی‌مانده قطار در رویداد e است. هنگامی که یک رویداد تأخیر به وقوع می‌پیوندد تعدادی از مسافران سوار قطار می‌شوند. بنابراین تعداد مسافرانی که پس از ترک قطار در سکوی مسافری باقی‌مانده‌اند از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$W_{after,g,e} = W_{befor,g,e} - \theta_{can,e} \quad \forall g \in G \in E_{da,e} \quad (10)$$

بنابراین ظرفیت باقی‌مانده یک قطار به ظرفیت کل، تعداد مسافران در حال پیاده‌شدن و تعداد کل مسافران داخل واگن‌های قطار بستگی دارد. در این صورت چنین نوشته می‌شود.

$$\theta_{remain,e} = C - \theta_{after,g,e'} + \theta_{alight,e}, \quad \forall g \in G \in E_{da,e} \quad (11)$$

زمان‌بندی، در این تحقیق فرض می‌شود تأثیر اختلال بر اندازه ازدحام و رفتار مسافری و تعداد قطارهای آماده در سایر مناطق غیر از پایانه در خط چهار مشخص باشد. در مطالعه موردی تحقیق حاضر، بخشی از خط ۴ متروی تهران با استفاده از قطارهای AC100، DC، AC300، AC500 و DC+ مورد بررسی قرار گرفته است. برنامه‌ریزی دقیق مسیر ریلی بین ایستگاه‌های شهید «کلاهدوز» تا «بیمه» در شکل ۵ نشان‌داده شده است. چنانکه در این تصویر مشاهده می‌شود ایستگاه‌های تقاطعی خط چهار با خطوط شش، دو، سه، یک و هفت نشان داده شده است. در این ایستگاه‌های تقاطعی مسافران می‌توانند میان خطوط چهار و سایر خطوط متروی تهران جابه‌جا شوند. اطلاعات دقیق تر در مورد ایستگاه‌های تقاطعی در جدول ۱ آورده شده است.

به‌منظور بهینه‌سازی مدل از پنجره زمانی ساعات ۹:۰۰ تا ۱۲:۰۰ استفاده شده است. همچنین فرض می‌گردد یک اختلال بین ساعات ۹:۵۰ تا ۱۰:۲۰ بین سیگنال بلاک‌های ایستگاه‌های این سینا تا فردوسی رخ داده باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر فرض می‌گردد اختلال به انسداد کامل مسیر، منجر شده و مسیرها از دسترسی خارج شده باشند. با این حال فرض می‌گردد جابجایی بین ایستگاه‌های خط چهار و سایر ایستگاه تبادلی در خطوط تقاطعی تا پایان اختلال امکان‌پذیر باشد. پارامترهای بهینه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است. تمامی وقایع فضای حالت با استفاده از نرم افزار سیپلکس در کامپیوتری با مشخصات فنی RAM (با اندازه ۸ گیگا بایت) و CPU (با ویژگی Intel(R) Pentium(R)) انجام شده است. جدول ۲ اطلاعات و پارامترهای بهینه‌سازی خط ۴ را نشان می‌دهد.

در رابطه فوق C حداکثر کل ظرفیت قطار است و $\theta_{after,g,e'}$ نشان‌دهنده گروهی از مسافران است که پس از رویداد خروج قطار از ایستگاه در جا مانده‌اند. برای پیشامد پیاده‌شدن مسافران از قطار می‌توان تعداد مسافران باقی‌مانده را برای گروه‌های هدف مسافری در فرایند انتقال مسافران به قطار دیگر در ایستگاه‌های تقاطعی و یا ادامه مسیر تا مقصد برآورد نمود. در نهایت آنکه از این طریق می‌توان تعداد مسافران قطار را پس از رویداد خروج قطار از ایستگاه توصیف نمود. همچنین با استفاده از تعداد مسافران در انتظار بر روی سکو، سطح ازدحام را تخمین زد (خسروسرشکی و معاونی، ۲۰۲۱).

در تحقیق حاضر برای موردکاوی بخشی از خط چهار متروی تهران حفاصل ایستگاه «کلاهدوز» تا «ارم سبز» بررسی شده است. براساس برنامه ترافیکی خط چهار با سرفاصله زمانی فعلی، عملاً ۳۱ رام قطار به این خط تخصیص یافته است. کمترین سرفاصله زمانی حرکت قطارها در این خط ۲ دقیقه می‌باشد. قطارهای فعال در این خط بسته به شیب و فراز خط از نوع سری های AC، DC و DC+ بوده و لذا دارای پروفایل‌های سرعت‌های متفاوتی می‌باشد. در این خط ایستگاه‌های مبدأ و مقصد دارای پایانه می‌باشند. این مسئله در جدول ۱. نشان‌داده شده است. همچنین در این خط پایانه‌ها از نوع حیات دار بوده و عمل شانتینگ قطارها را می‌تواند مستقل از خط اصلی و یا به صورت پیوسته با آن پوشش داده شود. از طرفی نیز لازم است مد نظر قرار داد که در مدل‌سازی خط چهار متروی تهران به علت کمبود قطار، امکان پوشش اعزام‌های فوق‌العاده به صورت کامل وجود ندارد. برای ارزیابی سطح و گستره‌ی اختلال‌ها و تغییرات پیش بینی نشده در جداول



شکل ۵. شبکه مترو لحاظ شده در تحقیق حاضر

جدول ۲. اطلاعات و پارامترهای بهینه‌سازی خط ۴

ردیف	عنوان پارامتر	مقدار عددی
۱	حداقل سرفاصله زمانی حرکت قطارها	۱۵۰ ثانیه
۲	حداکثر سرفاصله زمانی حرکت قطارها	۶۰۰ ثانیه
۳	حداقل زمان توقف قطار در سکوی مسافری	۳۰ ثانیه
۴	زمان لازم برای بازیابی جدول	۴۲۰۰ ثانیه
۵	حداکثر زمان تأخیر	۲۱۰۰ ثانیه

بر اساس اولویت‌های سیستم ترافیک وزن برخی از ایستگاه‌های خط چهار نظیر «نیروی هوایی» و «ابن سینا» با توجه به حجم مسافر و زمان انتظار خط چهار برای سهولت محاسبات متغیر ازدحام قابل چشم پوشی فرض گردیده، با این حال ظرفیت مسافری در زمان‌های معین ارائه سرویس معین و ثابت فرض شده است. برخی پارامترهای ترافیکی خط چهار متروی تهران برای یک ماه عادی سال در جدول ۳ نشان داده شده است.

در این حالت به منظور حل مسائل از طریق روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط لازم است تقاضای مسافری برای تمامی وقایع فضای حالت تعیین و در نهایت محدودیت‌های مدل تدقیق گردد. داده‌های مرتبط با تقاضای مسافری بر اساس خروجی‌های سامانه جامع ترافیکی متروی تهران به دست آمده است. ساعات اوج سفر در خط چهار متروی تهران در ساعات صبحگاهی و عصرگاهی است که برای این مطالعه بخشی از بازه زمانی سرویس دهی بین ساعت ۹ تا ۱۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. برخی پارامترهای ترافیکی خط چهار متروی تهران برای یک ماه عادی از سال (منبع: سامانه جامع ترافیکی متروی تهران)

تعداد کل حرکت‌های برنامه‌ریزی شده	تعداد کل حرکت‌های مسافری انجام شده	تعداد کل حرکت‌های فوق‌العاده مسافری	تعداد کل حرکت‌های کنسل شده	تعداد کل حرکت‌های تأخیری	زمان کل تأخیرات (بر حسب ثانیه)	تأخیر متوسط هر حرکت مسافری (ثانیه)
۱۱۱۵۱	۱۱۱۳۳	۳۱	۱۸	۲۸	۵۳۷۰	۱/۰۳

جدول ۴ تقاضاهای مبادی، ایستگاه‌های طول مسیر و مقاصد خط چهار را بر اساس خروجی‌های سامانه ترافیکی نشان می‌دهد.

جدول ۴. تقاضاهای مبادی، ایستگاه‌های طول مسیر و مقاصد خط چهار متروی تهران بین ساعات ۹ تا ۱۲

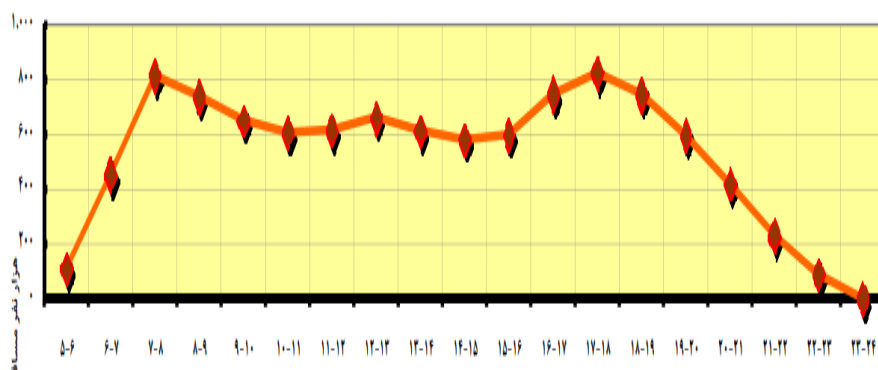
(منبع: سامانه جامع ترافیکی متروی تهران)

نام ایستگاه	ساعت	۹-۱۰	۱۰-۱۱	۱۱-۱۲
شهید کلاهدوز		۳۵۷۹۸	۲۸۳۴۸	۲۱۷۷۳
نیروی هوایی		۵۳۴۷۲	۴۳۸۱۶	۳۵۸۵۹
نبرد		۴۸۵۶۷	۳۷۱۰۶	۳۶۹۳۶
پیروزی		۲۵۴۵۱	۲۰۸۸۷	۱۷۱۶۶
ابن سینا		۴۰۹۴۷	۳۰۳۰۸	۲۴۲۱۵

نام ایستگاه	ساعت	۱۰-۹	۱۱-۱۰	۱۲-۱۱
میدان شهدا		۵۲۸۶۱	۴۲۲۸۲	۳۶۳۰۸
دروازه شمیران		۷۶۲۱	۸۱۴۱	۸۷۳۳
دروازه دولت		۱۳۹۵۹	۱۵۳۵۸	۱۶۸۶۱
فردوسی		۱۷۵۰۴	۳۱۲۷۱	۲۴۱۳۶
تئاتر شهر		۱۷۵۷۷	۲۵۳۱۹	۳۴۳۸۹
میدان انقلاب اسلامی		۳۲۱۵۳	۴۴۸۹۴	۶۷۷۴۱
توحید		۲۱۶۵۳	۲۶۶۸۳	۳۱۶۱۴
شادمان		۲۵۲۲۹	۲۵۴۸۱	۲۵۸۱۴
حبیب اله		۲۰۶۰۴	۲۱۲۱۰	۲۶۲۱۴
استاد معین		۲۱۴۸۰	۲۸۲۲۷	۴۶۲۶۳
میدان آزادی		۸۴۳۲۱	۷۱۱۸۰	۶۲۵۷۷
بیمه		۷۸۶۰۴	۶۰۸۰۷	۵۱۶۳۸

بهینه‌سازی زمان انتظار و ظرفیت مسافری در مطالعه موردی خط چهار متروی تهران به‌عنوان مقیاسی کوچک از یک شبکه ۲۹۶ کیلومتری مترو انجام گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با کاهش تعداد قطارها و در نتیجه حرکت‌های مسافری،

پیچیدگی‌های محاسباتی تا حد قابل‌توجهی کاهش یافته و در نتیجه اثربخشی نسبتاً مطلوبی را در شرایط ازدحام خطوط به ویژه در ایستگاه‌های تقاطعی از خود نشان داد.



شکل ۶. توزیع مسافر در ساعات بهره برداری از خط چهار متروی تهران (سامانه جامع ترافیکی متروی تهران، ۱۴۰۲)

برای بررسی اثربخشی الگوی مبتنی بر مسافر به ارزیابی مدل‌های بهینه‌سازی بر اساس دو تابع هدف با اوزان متفاوت پرداخته می‌شود. در این توابع حالات لغو حرکت‌های مسافری در اثر اختلال به صورت $\Omega_{cancel} = 100$ و برای سایر حالات نیز نظیر وجود تأخیر $\Omega_{cancel} = 1$ و برای حالتی که $\Omega_{sc} = 4200$ است نیز به همین صورت است. به این ترتیب می‌توان از منظر بررسی و لحاظ شدن ازدحام مسافری در ایستگاه‌ها اطمینان حاصل کرد. جدول ۵ فرایند لغو حرکت‌های مسافری و تأخیر قطار را در فرآیند اجرای جداول و سیر و حرکت قطارها در خط

چهار متروی تهران نشان می‌دهد. در شکل ۷ هر خط ممتد در نمودار نشان‌دهنده سطح ازدحام یک ایستگاه خط چهار مترو تهران در طول زمان بهره برداری عملیاتی است. خط چین‌ها در نمودار نشان‌دهنده شروع و پایان اختلال با توجه به سطح ازدحام زمان انتظار است زیرا بسیاری از مسافران به دلیل آثار ناشی از اختلال نمی‌توانند به مقصد برسند. بنابراین، از وسیله دیگری برای تردد به سمت مقصد استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال مسافرانی که در ایستگاه «میدان آزادی» برای رسیدن به ایستگاه «ارم سبز» در انتظار قطار هستند تا زمانی که اختلال به پایان نرسد

با کمی تأخیر به خط تزریق می‌شوند که در نتیجه این اطمینان حاصل می‌شود که در کوتاه‌ترین زمان ممکن تعداد مسافران در ایستگاه‌های طول مسیر کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود تأخیر در ورود قطار به هر ایستگاه در طول مسیر با افزودن قطارهای اضافی، بیشتر می‌شود که در اینجا کاهش سطح ازدحام مسافری در ایستگاه‌ها از اولویت بالاتری برخوردار می‌شود. با لحاظ نمودن میزان مسافر و زمان انتظار، بهینه‌سازی می‌تواند از طریق ایجاد تعادل میان انحراف از جدول زمان‌بندی اولیه و ازدحام مسافری حاصل شود. در مدل مبتنی بر ازدحام مسافری برای هنگامی که $\Omega_{sc} = 4200$ است، ایستگاه‌های طول مسیر با استفاده از حجم و میزان مسافران منتظر در ایستگاه ارزش‌گذاری می‌شود.

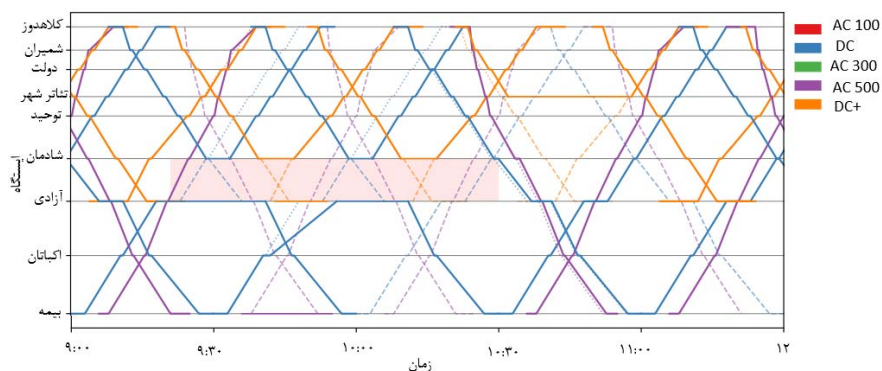
نمی‌توانند برای رسیدن به مقصد از طریق قطار به سفر خود ادامه دهند. جدول ۶ حداکثر میزان ازدحام مسافری را در خط چهار نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود چنانکه مشاهده می‌شود در اکثر ایستگاه‌ها با توجه به حجم مسافر، میزان ازدحام روندی کاهشی داشته است. این امر به طور ویژه در ایستگاه‌های «فردوسی» و «دروازه دولت» محسوس تر است. در مقابل مشاهده می‌شود که در ایستگاه‌های «توحید» و «شادمان» افزایش قابل‌توجهی در ازدحام مسافری را نشان می‌دهد. جدول ۶ بهینه‌سازی جدول زمان‌بندی را برای هر دو تابع هدف در مدل بهینه‌سازی به تصویر کشیده است. کاهش مقدار ازدحام در سطح $\Omega_{sc} = 4200$ را می‌توان از طریق قطارهای اضافی DC توضیح داد. پس از وقوع اختلال؛ یک قطار AC500 و DC+

جدول ۵. فرایند لغو و تأخیر قطار

تأخیرها	لغوی‌های قطار	
۲۱۰۰	۱۸	$\Omega_{sc} = 0$
۴۲۰۸	۱۸	$\Omega_{sc} = 4200$

جدول ۶. حداکثر میزان ازدحام هر ایستگاه با توجه به حجم مسافری

وزن	شهد	نیرو	نبرد	پیروز	ابن	میدان	دروازه	دروازه	فردوس	توحید	شادمان	حبیب	میدان	بیمه
	کلاهدو	هوایی		ی	سینا	شهدا	شمیران	دولت	ی		ن	اله	آزادی	
$\Omega_{sc}=0$	۱۰۴/۰	۰۰۴ ۲	۰۰۲۳	۰۰۱۴۵	۰۰۱۴۴	۰۰۱۷۷	۰۰۲۶۴	۰۰۳۶۲	۰۰۱۹۱	۰۰۱۵ ۱	۰۰۱۸۳	۰۰۲۸ ۸	۰۰۱۶ ۷	۰۰۲۵ ۴
$\Omega_{sc}=4200$	۹۲	۰۰۲۸	۰۰۱۹ ۳	۰۰۱۴۵	۰۰۱۴۷	۰۰۱۶۱	۰۰۲۵۴	۰۰۱۰۵	۰۰۱۰۵	۰۰۲۰ ۲	۰۰۲۴۷	۰۰۲۸ ۸	۰۰۱۳ ۷	۰۰۲۴ ۴



شکل ۷. جدول زمان‌بندی برای اختلالات ترافیکی مطالعه موردی ($\Omega_{sc} = 4200$)

۵- نتیجه‌گیری

ایستگاه برای محاسبه تعداد مسافران منتظر و زمان انتظار استفاده نمود. بنابراین به ازای هر اعزام می‌توان از طریق تعیین فاصله زمانی میان دو دنباله متوالی از رویدادهای خروج، نرخ ورود مسافران به ایستگاه را تعیین نمود. از این رو تأثیر تأخیر بر زمان انتظار مسافران در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین در صورتی که پس از محاسبه تعداد مسافران، قطار دارای ظرفیت مازاد بر آن نباشد امکان سوار شدن به قطار وجود ندارد. از سوی دیگر تقاضای مسافری با زمانبندی مجدد دستخوش تغییر می‌شود که از این طریق می‌توان جریان مسافری را با جزئیات کافی از ازدحام ایستگاه توصیف نمود. نتایج مورد کاوی نشان می‌دهد که بکارگیری رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلف در حالت‌های مبتنی بر مسافر در زمان‌های محاسباتی طولانی و برای شبکه‌های کوچک از اثربخشی کافی برخوردار است. از سوی دیگر چنین برداشت می‌شود که برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ممکن است برای بازیابی جداول و زمانبندی مجدد کارایی لازم را نداشته باشد. یکی از شیوه‌های جایگزین در این حالت می‌تواند روش جستجوی همسایگی باشد از طرفی به منظور ارتقای سطح کارآمدی مؤلفه‌های متعدد دخیل در مدل لازم است به دقت طراحی و تدقیق شوند. الگوریتم جستجوی همسایگی در این شیوه می‌تواند فضای جواب را برای اکتشاف جواب بهینه کوچک نماید. در ادامه عملگر بازیابی جواب راه حل بهینه همسایگی را جستجو می‌نماید. از سوی دیگر مدل به یک جواب اولیه نیاز دارد که علاوه بر تعیین ترتیب رویدادها بر جدول زمانبندی، امکان به حداقل رساندن انحراف از جدول زمانبندی اولیه را میسر سازد. از سوی دیگر انعطاف‌پذیری روابط ریاضی در برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به دلیل پایداری مقطعی رویدادها از نقاط قوت این روش است. یافته‌های مطالعه موردی نشان می‌دهد که روش جستجوی همسایگی در مقیاس کوچک از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط سریعتر است. یافته‌های مطالعه موردی نشان می‌دهد که روش جستجوی همسایگی توانست یک جواب را در ۵۲۳ ثانیه در مجموعه موجه پیدا کند. این در حالی است که روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در حدود ۱۱ ساعت یک راه حل موجه را در مجموعه جواب به دست آورد.

مطالعه موردی خط چهار متروی تهران، امکان ارزیابی اثربخشی و سودمندی ناوگان حمل‌ونقل ریلی و انجام مقایسه میان مدل‌های تئوری بهینه‌سازی سیر و حرکت قطارها در شرایط بروز اختلال و مدل‌های عملی را فراهم نمود. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر مسافر در ایستگاه‌های تبادلی به ارائه راه‌حل‌های مطلوبتری منتهی می‌گردد. با این حال در مقام عمل جداول زمانی در هنگام مواجهه با اختلال به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای به لغو حرکت‌های مسافری به دلیل کافی نبودن مبادی خروجی قطارها و انسداد قطعات ریلی در خط دچار اختلال، نیاز دارد؛ بنابراین ارائه مدل‌هایی که بتواند با لغو حرکت‌های مسافری مواجه شود استراتژی‌های مناسبی را برای روبروشدن با اختلال ارائه می‌دهد. از سوی دیگر مدلی که در آن قطار آماده در طول مسیر و در مکان‌های بافر مناسب مستقر هستند عملکرد کلی خطوط مترو را در هنگام بروز اختلال بهبود می‌بخشد، زیرا زمینه‌ای را فراهم می‌آورد تا قطارها برای اقدامات کنترلی در مرحله بعدی مورد استفاده قرار گیرند. در این روش بجای کنارآمدن با تأخیر زیاد در هر ایستگاه به ویژه ایستگاه‌های تبادلی می‌توان از مقادیر بافر درج شده در جداول و ایستگاه‌های میانی بهره‌گرفت که این خود برای حداقل رساندن تأخیر کل راهکاری مطلوب، کافی به نظر می‌رسد. در مطالعه موردی این تحقیق با توجه به افزایش قابل‌ملاحظه پیچیدگی‌های محاسباتی، مدل‌های بهینه‌سازی در یک مقیاس کوچک‌تر پیاده‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده در این پژوهش می‌تواند با ایجاد تغییر جزئی در جدول زمانی، حداکثر سطح ازدحام را تا حدود قابل‌توجهی کاهش دهد. از سوی دیگر در مدل ارائه شده در این تحقیق می‌توان بین انحراف از جدول زمان‌بندی اولیه و سطح ازدحام مسافری ایستگاه‌ها یک تعادل متناسب ایجاد نمود. در این پژوهش رابطه‌ای جدید برای سیر و حرکت قطارها در شرایط بروز اختلال ارائه گردید. در مدل ارائه شده این تحقیق اقدامات اصلاحی مرتبط با مواجهه با اختلال در ایستگاه‌های طول مسیر، ایستگاه‌های مبدأ و یا اعزام‌های ورودی از پایانه‌ها در نظر گرفته شد و بر آن اساس از طریق رویکرد شبکه‌ای «رویداد-فعالیت» روابط محاسباتی جدیدی ارائه شد. در این روش بدون ثابت فرض کردن حجم مسافری می‌توان از تعداد مسافران منتظر در هر ایستگاه و نیز نرخ ورود مسافر به آن

۶- مراجع

- Hou, Z., Gao, S., Nicholson, G., Chen, L., Chen, F., Roberts, C., & Dong, H. (2021). November. A hybrid intelligent algorithm for real time metro traffic regulation in cases of disturbance. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 3929-3934. IEEE. **doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569974**
- Humayun, M., Afsar, S., Almufareh, M. F., Jhanjhi, N. Z., & AlSuwailem, M. (2022). Smart Traffic Management System for Metropolitan Cities of Kingdom Using Cutting Edge Technologies. *Journal of Advanced Transportation*. **doi.org/10.1155/2022/4687319**
- Khosrosereshki, F., & Moaveni, B. (2021). Practical Descriptor Modeling of Traffic in Intersecting Metro Lines and Robust Controller Design for Train Synchronization at Transfer Stations. *IEEE Systems Journal*, 15(4), 5549-5556. **doi.org/10.1109/JSYST.2020.3040322**
- Khosrosereshki, F., & Moaveni, B. (2021). Traffic modeling and validation for intersecting metro lines by considering the effect of transfer stations. *IEEE Access*, 10, 1946-1955. **doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139470**
- König, E. (2023). A review on railway delay management. *Public Transport*, 12(2), 335-361. **doi.org/10.1007/s12469-020-00233-1**
- Li, S., Yang, L., & Gao, Z. (2021). Efficient real-time control design for automatic train regulation of metro loop lines. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(2), 485-496. **doi.org/10.1109/TITS.2018.2815528**
- López-Leyva, J. A., Talamantes-Álvarez, A., Ramos-García, V. M., Ponce-Camacho, M. A., Estrada-Lechuga, J., & Mejía-González, E. A. (2019). November. Optimized pointing to improving the performance of optical metro networks based on mono-static free-space-optical transceivers. In *2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, IEEE, 1-5. **doi.org/10.1109/ROPEC48299.2019.9057131**
- Luo, J., Tong, Y., Cavone, G., & Dotoli, M. (2021). September. A Service-Oriented Metro Traffic Regulation Method for Improving Operation Performance. In *2021 IEEE International Intelligent Transportation*
- Bauschert, T., Büsing, C., D'Andreagiovanni, F., Koster, A. M., Kutschka, M., & Steglich, U. (2017). Network planning under demand uncertainty with robust optimization. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 178-185. **doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736760**
- Cacchiani, V., Qi, J., & Yang, L. (2023). Robust optimization models for integrated train stop planning and timetabling with passenger demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 136, 1-29. **doi.org/10.1016/j.trb.2020.03.009**
- Corman, F., D'Ariano, A., Marra, A. D., Pacciarelli, D., & Samà, M. (2020). Integrating train scheduling and delay management in real-time railway traffic control. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 213-239. **doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294651**
- De Leenheer, M., Tofigh, T., & Parulkar, G. (2016). March. Open and programmable metro networks. In *Optical Fiber Communication Conference, Optica Publishing Group*. Th1A-7. **doi.org/10.1364/OFC.2016.Th1A.7**
- Dimitrova, E. (2022). September. Analysis of automatic control systems for metro trains. In *2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, IEEE, 1-4. **doi.org/10.1109/BulEF48056.2019.9030782**
- Farhi, N., Van Phu, C. N., Haj-Salem, H., & Lebacque, J. P. (2020). May. Traffic modeling and real-time control for metro lines. Part II-The effect of passenger demand on the traffic phases. In *2017 American Control Conference (ACC)*, IEEE, 3828-3833. **doi.org/10.23919/ACC.2017.7963541**
- Frutos Bernal, E., & Martín del Rey, A. (2022). Study of the structural and robustness characteristics of madrid metro network. *Sustainability*, 11(12), 3486. **doi.org/10.3390/su11123486**
- Hernández, J. A., Quagliotti, M., Serra, L., Luque, L., da Silva, R. L., Rafel, A., & Larrabeiti, D. (2020). Comprehensive model for technoeconomic studies of next-generation central offices for metro networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(12), 414-427. **doi.org/10.1364/JOCN.402167**

- problem. In *Algorithmic Methods for Railway Optimization: International Dagstuhl Workshop, Dagstuhl Castle, Germany, June 20-25, 2004, 4th International Workshop, ATMOS 2004*, Bergen, Norway, September 16-17, 2004, Revised Selected Papers, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 145-170.
doi.org/10.1007/978-3-540-74247-0_7
- Setioko, S., Fitriani, Y., & Munawaroh, K. (2022). Strategi Peningkatan Usaha Kecil Mikro dan Menengah (UMKM) di Era Pandemi Covid-19 Pada Kota Metro. *Journal of Community Development*, 2(2), 60-65.
doi.org/10.47134/comdev.v2i2.24
- Shen, F., Zhao, L., Du, W., Zhong, W., & Qian, F. (2023). Large-scale industrial energy systems optimization under uncertainty: A data-driven robust optimization approach. *Applied Energy*, 259, 114199.
doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114199
- Stahley, L., O'Brien, P. B., Lowe, M., Porteous, P., & Austin, S. (2023). The impact of bed traffic control and improved flow process on throughput measures in a metropolitan emergency department. *Journal of Emergency Nursing*, 46(5), 682-692.
doi.org/10.1016/j.jen.2019.10.019
- Tabassum, K. 2023. An intelligent metro tracking system for Riyadh Smart City. *International Journal of Information Technology*, 12(4), 1103-1109.
doi.org/10.1007/s41870-020-00435-7
- Tang, L., Zhao, Y., Cabrera, J., Ma, J., & Tsui, K. L. (2021). Forecasting short-term passenger flow: An empirical study on shenzhen metro. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(10), 3613-3622.
doi.org/10.1109/ITITS.2018.2879497
- Tessitore, M. L., Sama, M., D'Ariano, A., Hérouët, L., & Pacciarelli, D. (2022). A simulation-optimization framework for traffic disturbance recovery in metro systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 136, 103525.
doi.org/10.1016/j.trc.2021.103525
- Tong, Y., Xu, W., Dotoli, M., & Cavone, G. (2022). An integrated model predictive control method for the rescheduling of metro traffic with backup trains. In *2022 American Control Conference (ACC)*, IEEE. 4648-4653.
doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867359
- Van Breusegem, V., Champion, G., & Bastin, G. (2011). Traffic modeling and state feedback *Systems Conference (ITSC)*, IEEE. 3533-3538.
doi.org/10.1109/ITSC48978.2021.9564503
- Mannino, C., & Mascis, A. (2015). Optimal real-time traffic control in metro stations. *Operations Research*, 57(4), 1026-1039.
doi.org/10.1287/opre.1080.0642
- Mathew, A., Das, T., Gokhale, P., & Gumaste, A. (2018). Multi-layer high-speed network design in mobile backhaul using robust optimization. *Journal of Optical Communications and Networking*, 7(4), 352-367. **doi.org/10.1364/JOCN.7.000352**
- Meng, F., Yang, L., Wei, Y., Li, S., Gao, Z., & Shi, J. (2023). Collaborative passenger flow control on an oversaturated metro line: a path choice approach. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 8(1), 376-404.
doi.org/10.1080/21680566.2020.1777219
- Mirbod, M., & Dehghani, H. (2023). Smart Trip Prediction Model for Metro Traffic Control Using Data Mining Techniques. *Procedia Computer Science*, 217, 72-81.
doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.203
- Moaveni, B., & Najafi, S. (2020). Metro traffic modeling and regulation in loop lines using a robust model predictive controller to improve passenger satisfaction. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(5), 1541-1551.
https://doi.org/10.1109/TCST.2017.2735945
- Morales, F., Gifre, L., Paolucci, F., Ruiz, M., Cugini, F., Castoldi, P., & Velasco, L. (2020). Dynamic core VNT adaptability based on predictive metro-flow traffic models. *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(12), 1202-1211.
doi.org/10.1364/JOCN.9.001202
- Qi, Q., Meng, Y., Zhao, X., & Liu, J. (2022). Resilience Assessment of an Urban Metro Complex Network: A Case Study of the Zhengzhou Metro. *Sustainability*, 14(18), 11555. **doi.org/10.3390/su141811555**
- Qiu, T., Chen, N., & Zhang, S. (2022). Preliminaries of Robustness Optimization. In *Robustness Optimization for IoT Topology*, 17-39. Singapore: Springer Nature Singapore.
doi.org/10.1007/978-981-16-9609-1_2
- Schanzenbacher, F., Farhi, N., Leurent, F., & Gabriel, G. (2021). Comprehensive passenger demand-dependent traffic control on a metro line with a junction and a derivation of the traffic phases. *arXiv preprint arXiv:1811.08347*.
doi.org/10.48550/arXiv.1811.08347
- Schöbel, A. (2010). Integer programming approaches for solving the delay management

doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071820

-Yang, J., Jin, J. G., Wu, J., & Jiang, X. (2020). Optimizing passenger flow control and bus bridging service for commuting metro lines. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(6), 458-473.

doi.org/10.1111/mice.12265

-Ye, H., & Luo, X. (2021). Cascading failure analysis on Shanghai metro networks: An improved coupled map lattices model based on graph attention networks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), 204. [mdpi.com/1660-4601/19/1/204#](https://doi.org/10.3390/ijerph19010204).

-Zhang, H., Li, S., & Yang, L. (2022). Real-time optimal train regulation design for metro lines with energy-saving. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 1282-1296.

doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.019

-Zhou, L., Yang, X., Wang, H., Wu, J., Chen, L., Yin, H., & Qu, Y. (2023). A robust train timetable optimization approach for reducing the number of waiting passengers in metro systems. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 558, 124927.

doi.org/10.1016/j.physa.2020.124927

control for metro lines. *IEEE Transactions on automatic control*, 36(7), 770-784.

doi.org/10.1109/9.85057

-Wahlström, M., Karvonen, H., & Norros, L. (2016). May. Rehearsing for a major accident in a metro control centre: A naturalistic analysis of situation awareness. *In The 11th International Conference on Naturalistic Decision Making Marseille*. France.

-Wang, J., & Fang, W. (2017). A structured method for the traffic dispatcher error behavior analysis in metro accident investigation. *Safety Science*, 70, 339-347.

doi.org/10.1016/j.ssci.2014.07.014

-Wang, S., Lv, Y., Peng, Y., Piao, X., & Zhang, Y. (2022). Metro Traffic Flow Prediction via Knowledge Graph and Spatiotemporal Graph Neural Network. *Journal of Advanced Transportation*.

-Wilkie, D., Sewall, J., Li, W., & Lin, M. C. (2018). Virtualized traffic at metropolitan scales. *Frontiers in Robotics and AI*, 2, 11.

doi.org/10.3389/frobt.2015.00011

-Wu, Z., Gao, C., & Tang, T. (2021). A virtually coupled metro train platoon control approach based on model predictive control. *IEEE Access*, 9, 56354-56363.

Retrieving Timetables of Tehran Metro Trains Using Robust Optimization Approach

Pejman Salehi, Assistant Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Tehran, Iran.

Mehran Khalaj, Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Tehran, Iran.

Davood Jafari, Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Parand Branch, Tehran, Iran.

E-mail: pejmansalehi.metro@gmail.com

Received: November 2025- Accepted: February 2025

ABSTRACT

Tehran subway is usually exposed to unwanted disturbances that can cause inevitable partial or total changes in the order of the initial timetables. The result the occurrence of such unplanned events can affect the punctuality of passenger movements by making the pre-designed schedules unworkable and thus the level of desirability of subway trips. In the current situation of the Tehran metro network, the responsibility of managing and restoring timetables in the event of a disruption is the responsibility of the traffic control center managers. By providing solutions based on the principles of disturbance management, they eliminate delays such as delays in movements, cancellation of dispatches, overcrowding, etc. However, the solutions implemented by the drivers of the traffic control center are not of good quality. In addition, usually in the subway network, it is necessary to resolve the disturbances within a few minutes to prevent the cumulative effect and dispersion in the traffic of trains and lines, which is one of the challenging issues in managing the traffic of subway lines. It is counted on the other hand, considering the scale and extent of Tehran subway lines, it is necessary to have the computational complexities and the solution space for problem-solving approaches precisely defined and available so that optimal decision-making is possible. In recent years, metro traffic rescheduling models have been developed to increase the speed of table retrieval and support the decisions of traffic control centers. A recent model is the use of the "event-activity" network, which is used in this research. The mathematical relationships governing this framework are based on network diagrams that can support a wide range of tasks and rescheduling activities. Therefore, the current research has investigated the rotational movement of the train fleet in the operation of the arrival and departure of trains from the terminals and other stations along the route by using the "event-activity" network and considering the time factor. Because the establishment of optimization models increases the success rate of the results and the probability of operationalization of the traffic controller's decisions in the justified set of the solution to the problem, therefore, in the proposed model of the current research, considering the factors related to the fleet capacity and the passenger volume of the platforms, And the calculation of recovery relations of scheduling tables has been discussed. In the proposed method of the present research, by using the verification of the passenger congestion of the platforms and having a variable amount of delays in the space of the incidents, relevant control measures were implemented to increase the efficiency of the recovery of the timetables. Although the method of solving the integer linear programming problem seems difficult due to the spectrum of using binary variables, however, it enables the calculation path to accurately determine the waiting time, passenger volume, congestion and delay control. Also, a neighborhood search algorithm has been used to analyze passenger demand and improve the efficiency of the system in the face of the complications caused by the number of passenger dispatches. In this research, the neighborhood search algorithm can efficiently discover the solution appropriate to the problem state space by using the completion of the answer and in this way create a logical balance between the problem-solving time and the quality of the answers. The case study of the current research has been done using the schedule of the fleet of Line 4 of the Tehran Metro between "Kahdouz" and "Bemeh" stations. The results obtained from the simulations show that the model developed in the current research in terms of train passenger volume, waiting time at the platforms and the delay of the trains at the intersection stations to recover the table through the mixed integer approach and algorithm Neighborhood search can provide solutions with better efficiency and quality.

Keywords: Retrieving Timetables, Tehran Metro, Disruption Management, Intersection Stations, Passenger Capacity