دوره پانزدهم، شماره پاییز و زمستان ۱۴۰۱

مجله فناوری اطلاعات در طراحی مهندسی

Information Technology in Engineering Design

http://ited.sinaweb.net

طراحی یک مدل استوار برای برنامه مسیریابی و جداول زمان‌بندی حرکت قطارها (مطالعه موردی: شبکه ریلی متروی تهران)

داود جعفری [۱] مهران خلج [۲] پژمان صالحی*[۳]

(۱) گروه مهندسی صنایع، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

(۲) گروه مهندسی صنایع، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

(۳) گروه مهندسی صنایع، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران*

(تاریخ دریافت :۱۴۰۱/۰۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰)

چکیده

یکی از مهم‌ترین دلایل بروز تأخیر در شبکه ریلی متروی تهران به محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت قطارها در شبکه ریلی برای جابجایی مسافران با توجه به تقاضای روزافزون استفاده از مترو در این کلان‌شهر بازمی‌گردد. توزیع بهینه‌ی قطارها در متروی تهران از منظر ابعاد زمانی و تناسب فضایی با تسهیلات می‌تواند تأثیر به سزایی بر استواری و میزان تحمل اعوجاج شبکه ریلی مترو برای جابجایی مسافری ایفا نماید. عملکرد شبکه ترافیک مترو با بروز تأخیرها در حرکت‌های مسافری ارتباط مستقیم دارد. ازاین‌رو در این مطالعه ارتقای استواری شبکه مترو با توجه به محدودیت‌های موجود برای بهینه‌سازی راهکردها مدنظر بوده است. لذا در این تحقیق به ارائه الگویی پرداخته می‌شود که با استفاده از یک برنامه‌ی مسیریابی پویا و یک جدول زمان‌بندی دوره‌ای که بسته به اهمیت، محدودیت‌های مرتبط با عواملی نظیر زیرساخت را لحاظ نموده، استواری اعزام‌های مسافری شبکه مترو را بهینه نماید. بنابراین با استفاده از یک مدل مسیریابی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، تخصیص هر قطار به خطوط متناظر شبکه متروی تهران پیشنهادشده است، به‌طوری‌که از این طریق بتوان حداکثر زمان توقف یک قطار در هر گره (ایستگاه) به حداقل مقدار ممکن کاهش داد و از طرفی نیز بتوان تعداد دفعات عبور هر قطار از گره‌های شبکه ریلی در یک لوپ کامل از مسیر را به‌عنوان جریمه مرتبه دوم در تابع هدف مدل لحاظ نمود. بنابراین یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای تدوین جداول زمان‌بندی به‌منظور تعیین زمان‌های تلف‌شده در گره‌های شبکه برای هر قطار فعال در مسیر تخصیص یافته است. همچنین در این مدل تعدادی از گره‌های خطوط ریلی که توسط مدل مسیریابی به دست آمده است، به‌عنوان رزرو در نظر گرفته شده است. رویکرد مورداستفاده در تحقیق حاضر برخلاف سایر رهیافت‌های پیشنهادی در مطالعات پیشین، قبل از طراحی و ایجاد جداول زمان‌بندی بر بخش زیرساخت شبکه مترو متمرکز نموده است. خروجی‌های این مدل در ایستگاه متروی صادقیه (تهران) به‌عنوان نمونه آزمایشی اجرا و نتایج آن از طریق شبیه‌سازی مورد صحت آزمایی قرار گرفت. یافته‌های پیاده‌سازی مدل نشان می‌دهد که برنامه مسیریابی و طراحی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها تا ۱۱ ٪ در مقایسه با سایر برنامه‌های زمان‌بندی پیشنهادی در مطالعات قبلی بهتر است. همچنین خروجی‌های مدل از طرح‌های معمول مسیریابی که توسط بخش برنامه‌ریزی ترافیک متروی تهران به‌صورت اسمی و مکتوب تدوین‌شده تا حدود ۲ ٪ بهبودیافته است.

کلمات کلیدی: مسیریابی، جداول زمان‌بندی حرکت قطارها، استواری، متروی تهران

*عهده‌دار مکاتبات:

پژمان صالحی

نشانی: گروه مهندسی صنایع، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

پست الکترونیکی: pejmansalehi.metro@gmail.com

۱- مقدمه

مسائل عمده‌ی صنعت مترو عمدتاً در بخش کنترل ترافیک سیر و حرکت قطارها و زیرساخت‌های مرتبط با آن شناخته می‌شوند [۱] که خود عاملی برای ارزیابی عملکرد کلی شبکه مترو و برنامه‌ریزی سیر و حرکت قطارها محسوب می‌شود. از سوی دیگر بررسی مطالعات نشان می دهد اعوجاجات جزء لاینفک شبکه مترو هستند که لازم است قبل از طراحی و پیاده‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها مدنظر کاربران سامانه‌های اطلاعاتی مرکز فرمان قرار گیرند [۲]. در این صورت طراحی برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها قابل‌تعمیم به‌کل شبکه مترو بوده و می‌توان آن را با لحاظ محدودیت‌های مرتبط با شرایط غیرمترقبه ترافیکی اجرایی نمود. لذا در تحقیق حاضر هدف اصلی آن است که یک جدول زمان‌بندی استوار طراحی شود که در صورت بروز نویز برای یکی از قطارها در مسیر ریلی، سایر قطارها و شبکه از انحراف به وجود آمده، متأثر نگردند. در چنین وضعیتی ناوگان قطارها در یک زیرساخت مشترک و در یک بازه زمانی واحد با لحاظ عدم تداخل در جدول عمومی با بروز نقص فنی یک واحد، با مسئله اعوجاج کل مسیر مواجه نمی‌شوند و در نتیجه به انسداد کل مسیر منجر نمی‌گردد. حال با توجه به آنکه نیاز مهم کنترل ترافیک حرکت‌های مسافری، زمان سیر کوتاه‌تر و مسیر قابل‌اطمینان است لذا در این حالت بهینه‌سازی استوار خدمات مسافری که در آن زمان سیر به هنگام بروز تأخیر همچنان به موقع باقی بماند، می‌تواند رویکرد اصلی مطالعه حاضر باشد. از دیگر سو اجرای تابع هدف با استفاده از روابط ریاضی و اعمال محاسباتی در خطوط ریلی دشوار به نظر می‌رسد زیرا زمان واقعی سفر با توجه به شرایط عملیاتی و بروز تأخیرها به‌عنوان محدودیت‌های مسئله، لازم است در محاسبات لحاظ گردند از این رو طراحی جداول زمان‌بندی و مسیریابی قطارها تنها به سطح تاکتیکی محدود نمی‌شود [۳]. فنون برنامه‌ریزی خطی در سطح ساختاری با لحاظ مداخلات بلادرنگ پارامتر زمان در شرایط بهره‌برداری، می‌تواند تأثیرات نویز بر زمان سفر قطارها و در نتیجه میزان استواری اعزام‌های مسافری سیستم مترو را تا حدودی مطلوب و تقریبی نسبتاً دقیق مدل نماید [۴].

در طراحی جداول زمان‌بندی، عمدتاً مطالعات پیشین بر کاهش اثرات تأخیرهای کوچک در بازه‌های سیر و حرکت قطارها تمرکز داشته و تأثیرات اعوجاجات بزرگ در یافته‌های ایشان کمتر مشاهده می شود بنابراین نوآوری مهم تحقیق حاضر آن است که در طراحی جداول زمان‌بندی بدون ایجاد تداخل با برنامه مسیریابی، اعوجاج‌های دارای مقدار بزرگ‌تر نیز لحاظ شده است. همچنین با توجه به آنکه ازدحام مسافری در برخی از ایستگاه‌های متروی تهران یک محدودیت اصلی است، در مدل‌سازی این تحقیق لحاظ شده است. عرض مؤثر سکو در هر ایستگاه، پارامتر تأثیرگذار بر ظرفیت مسافری است که می‌تواند در محدودیت‌های مدل گنجانده شود. با لحاظ جمیع تفاصیل فوق‌الذکر برخی از اهداف اصلی تحقیق حاضر به شرح زیر فهرست می‌شود:

- شناسایی و تبیین یک مدل مسیریابی بهینه و هم زمان طراحی و پیاده‌سازی جدول زمان‌بندی استوار و عاری از هرگونه تضاد با جدول اسمی
- اعتبار سنجی برنامه مسیریابی شناسایی‌شده و جدول زمان‌بندی طراحی‌شده در شرایط واقعی و به ویژه هنگام بروز اغتشاش در شبکه متروی تهران
- بهبود و ارتقای استواری در جداول زمان‌بندی مکتوب
- لحاظ نمودن محدودیت‌های مناسب در مدل طراحی‌شده برای ارتقای قابلیت اطمینان مدل

در تحقیق حاضر می‌توان فرایند مسیریابی و طراحی جداول زمانی را به‌صورت هم راستا برای ایجاد استواری بکار برد که این مهم نیز خود یکی از نقاط قوت مطالعه حاضر است که در سایر مطالعات دیده نشده است. درعین‌حال نیز این مدل قابلیت کاربرد بخش‌های مختلف آن را به‌صورت مجزا و مستقل دارد که می‌تواند بسته به نیاز ترافیکی شبکه ریلی مورداستفاده طراحان واقع شود. در این تحقیق رویکردهای بهینه‌سازی شده در مطالعه موردی متروی تهران و محدودیت‌های مرتبط با آن برای

مدل‌سازی شکاف‌های تحقیقاتی و بهره‌گیری از بافرها و نیز استفاده مجدد از طرح جامع کنترل ترافیک قطارها برای سرعت بخشیدن به پیاده‌سازی مدل مورداستفاده قرار گیرد.

یک خط مترو شامل ایستگاه‌ها با سکوهای واقع در آن (گره) و مسیرهای بین این گره‌ها (یال‌ها) است. بنابراین یک مسیر ریلی در شبکه مترو، دنباله‌ای از گره‌ها و یال‌های متوالی است. لذا طراحی سیستم مسیریابی مستلزم تخصیص قطار به مسیرهای ریلی است. لازم به ذکر است که یک خط مترو دارای برنامه‌ریزی از قبل تدوین شده و مشخص است که بر آن اساس قطارها وارد ایستگاه شده و از آن خارج می‌شوند [۵].

برنامه‌ریزی مسیر ابزاری برای کنترل ترافیک شبکه ریلی است که مشخص می‌نماید در چه زمانی کدامین قطارها و از کدام یال در جهت خط (خطوط ریلی) به سمت کدام گره‌ها (ایستگاه‌ها) حرکت نمایند [۶]. جدول زمان‌بندی حرکت قطارها از منظر ویژگی‌های میکروسکوپی می‌تواند زمان‌های مرتبط با انسداد یا آزادسازی خطوط ریلی (یال‌ها) و گره‌ها (ایستگاه‌ها) را در فرایند مسیریابی قطارها تعیین نماید. از دیگر سو در جداول زمان‌بندی مایکروسکوپی برنامه‌های مسیریابی لزوماً به‌طور دقیق مشخص نمی‌گردند (همان منبع، ۲۰۱۷). در این قبیل جداول، برنامه زمانی ورود و خروج قطارها به‌طور دقیق برای هر ایستگاه و در هر یک از خطوط ریلی مشخص می‌شود. بنابراین طراحی و بهینه‌سازی برنامه‌های مسیریابی و جداول زمانی کاملاً درهم‌تنیده و وابسته است به‌طوری‌که چنین مسائلی از منظر پیچیدگی، توابع هدف و محدودیت‌ها شرایط نسبتاً مشابهی دارند. ازاین‌رو چنانچه صرفاً مسئله جدول زمان‌بندی حرکت قطارها حل شود، تنها می‌توان به یک رهیافت مایکروسکوپی برای مسیریابی به‌منظور تحقق حل بخش دوم مسائل اکتفا نمود [۷]. درعین‌حال طرح‌های مسیریابی قادرند در هر زمان یک جدول زمان‌بندی میکروسکوپی را اصلاح نموده و یا بهبود بخشند، لذا در این مورد اجرای رهیافت‌های مسیریابی تنها در صورتی امکان پذیر است که برای آن جدول زمان‌بندی میکروسکوپی بدون تداخل زمانی لحاظ شده باشد [۷]. نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد که جداول زمان‌بندی مایکروسکوپی لزوماً بهبود برنامه‌های زمان‌بندی را تضمین نمی‌نماید، بنابراین تنها پس از طی مراحل مختلف حل مسائل مسیریابی، می‌توان در خصوص وجود تداخل یا سازگاری دو برنامه زمانی اظهارنظر نمود [۸]. با شناسایی و تدقیق برنامه مسیریابی می‌توان جدول زمان‌بندی میکروسکوپی را طراحی و اجرا نمود که در این حالت جدول زمان‌بندی توسط برنامه مسیریابی تعیین و محدود می‌شود. بااین‌حال همچنان خلأ وجود برای ایجاد یک جدول زمانی بدون تداخل با هر طرح مسیریابی ضروری به نظر می‌رسد [۸]. به‌این‌ترتیب با داشتن برنامه مسیریابی و جدول زمان‌بندی، می‌توان تعارضات مسیر ریلی را شناسایی نموده و برای رفع آن اقدام کرد. برای شبکه‌های ریلی بزرگ با تعداد ایستگاه‌های زیاد، توپولوژی ساده و غیر پیچیده، با حجم مسافر نسبتاً کم مناسب‌تر است که در این صورت ابتدا لازم است یک جدول زمان‌بندی مایکروسکوپی ابتدائی با گره‌ها و یال‌های اولیه ایجادشده و پس‌ازآن مسیرهای ریلی موردنظر به‌عنوان یال‌ها به گراف پایه افزوده شود. در مسیرهای یک‌طرفه ریلی، با توجه به سطوح متعدد زیرساخت‌های موجود، رویکردهای میکروسکوپی به‌منظور ساخت یک برنامه مسیریابی و جدول زمان‌بندی بهینه می‌تواند سودمند باشد [۹]. با مرور مطالعات پیشین مشاهده می‌شود که رویکردهای مرتبط در حالت کلی به سه دسته تقسیم می‌شود: نخست رویکردهای مرتبط با تعیین یک برنامه مسیریابی به‌طور مجزا، رویکردهای مرتبط با طراحی و استقرار جدول زمان‌بندی و نیز رویکردهایی که طرح‌های مسیریابی و زمان‌بندی را به‌صورت یکپارچه می‌بینند. بنابراین به‌منظور مدل‌سازی لازم است مشخص شود که برای هر رهیافت کدام ورودی‌ها موردنیاز است لذا نوع رویکرد منتخب می تواند اولویت موردنیاز شبکه ریلی مشخص می‌سازد [۱۰]. در تحقیق حاضر به‌منظور جلوگیری از تکرار و همپوشانی، رویکردهای مسیریابی

و زمان‌بندی به‌طور یکپارچه موردبررسی قرار می‌گیرد. هرچند رهیافت پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند با رویکرد یکپارچه حل شود با این‌حال محققان پیشین رویکردهای حل مسئله را از طریق مقایسه رهیافت سطح اول با سطح دوم و تعیین کارآمدی هریک به دست آورده‌اند.

۲- ادبیات موضوع

۲-۱- مسئله مسیریابی

از دیدگاه نظری، مطالعات پیشین غالباً پراکنده بوده و عمدتاً نیز بر مسئله مسیریابی قطارها در مسیر ریلی تمرکز و تأکید داشته‌اند. مطالعه یافته‌های این قبیل پژوهش‌ها نشان می‌دهد که خروجی‌ها به طور معمول از طرحواره یک جدول زمان‌بندی مایکروسکوپی نشئت می‌گیرند، ازاین‌رو مسئله مسیریابی محدود به زمان کلی سیر و یا پارامترهای زمانی مرتبط با ورود و خروج قطار به ایستگاه می‌باشد [۱۱]. بهره‌گیری از رهیافت‌های ترکیبی علاوه بر تنوع در شیوه‌های انتساب قطارها به مسیرهای ریلی، و با ساز و کارهایی که بدون بروز تناقض و تضاد با قوانین ترافیکی عمل نماید، می‌تواند تابع هدف را با رعایت قواعد طراحی مرتبط با جداول زمانی مایکروسکوپی، بهینه نموده و یا تا حدی بهبود بخشد [۱۲]. برخی از شاخص‌های مرتبط با بهینه‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها عبارت است از حداکثر سازی تعداد قطارهای که می‌توان در یک بازه زمانی مشخص در فرایند مسیریابی استفاده نمود؛ به حداقل رساندن تعداد حرکت‌های لغو شده و یا تأخیرهای مسافری، کاهش میانگین زمان سیر و حرکت قطارها، حداقل سازی مصرف انرژی ناوگان قطارها، حداقل سازی زمان توقف قطار بر روی سکوهای مسافری، حداکثر سازی مطلوبیت مسافری، استواری برنامه زمانی و غیره... [۱۳- ۱۵] .

در این مطالعه کوشیده شده است رویکردی متفاوت در پیش گرفته شود لذا بر این اساس مسیریابی از اولویت بالاتری نسبت به مسئله زمان‌بندی برخوردار شده است. همچنین زمان‌بندی به شکل پویا و بدون لحاظ قیود ترتیبی در اعزام قطارها در نظر گرفته‌شده و امکان تخصیص قطارها با توجه به زیرساخت‌های موجود در خطوط ریلی به وجود آمده است. همچنین فرض بر آن است که قطعات کوتاه مسیر ریلی در یک حلقه با یکدیگر دارای ارتباط متقابل باشند. ازاین‌رو می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های اکتشافی راندمان گره‌های تقاطعی در انتقال مسافری به خطوط دیگر و سایر مُدهای حمل‌ونقل در شبکه مترو را ارتقا داد [۱۶]. ازآنجاکه مسیرهای خط پنج و برخی خطوط متروی تهران طولانی‌تر و بعضاً دارای تعداد گره‌های تقاطعی بیشتری هستند لذا در صورت بهینه‌سازی تابع هدف می‌توان از بروز ناهماهنگی زمانی در گره‌های تقاطعی جلوگیری نمود. از دیگر کاربردهای الگوی مسیریابی در این تحقیق ایجاد امکان تخمین و تصمیم سازی در خصوص توسعه یک برنامه مسیریابی با توجه به منطقه موجه و جواب اولیه برای جدول زمان‌بندی طراحی‌شده در متروی تهران است که می‌تواند مقدمه‌ای برای محاسبه و تخصیص یک توزیع همگون از قطارها برای خطوط مترو باشد.

۲-۲- مسئله زمان‌بندی

نگاهی به مطالعه ادبیات موضوع و تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که مدل‌های مرتبط با طراحی و پیاده‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها، عمدتاً بر سطوح مایکروسکوپی تمرکز داشته و لذا در آنها برای حل مسائل ترافیکی از رهیافت مبتنی بر وقایع

دوره‌ای (PESP) بهره گرفته‌شده است. در این رویکرد وقایع ترافیکی، زمان ورود و خروج قطار از ایستگاه، توقف‌های برنامه‌ریزی نشده طول مسیر و غیره... در محدودیت‌های مسئله مورد لحاظ قرار می‌گیرد [۱۶- ۱۸] . نمونه‌هایی از این وقایع برنامه‌ریزی نشده در جداول زمان‌بندی حرکت قطارها می‌تواند زمان ورود و خروج آن دسته از قطارهای مسافری باشد که بنا به دلایلی نظیر نقص فنی و شرایط خاص ناگزیر از یک سکوی ایستگاه (گره) استفاده می‌کند [۱۶]. نتیجه برخی مطالعات نشان می‌دهد که الگوی PESP معمولاً به نتیجه ایدئال نمی‌رسد و در عمل رویکردهای تخصیص در مدل‌های برنامه‌ریزی خطی برای تدقیق زمان‌های بافر به منظور ایجاد جداول زمان‌بندی بسیار کارآمدتر است [۱۹]. علاوه بر گره‌ها (ایستگاه‌ها) و یال‌ها (خطوط ریلی اتصال ایستگاه‌ها)، یک شبکه ریلی دارای سامانه‌های کنترل و سیگنالینگ برای ناوبری و هدایت ایمن قطارها است. در شبکه مترو عمدتاً به مسافت میان دو سیگنال یک قطعه (بلاک) اطلاق می‌گردد. در سیستم‌های ریلی یک قطعه می‌تواند شامل بخشی از خط با تعدادی از یال‌ها (خطوط ریلی) و گره‌ها (ایستگاه‌ها) باشد و در هرلحظه خاص نیز به هر بلاک تنها به یک قطار تخصیص می‌یابد و ساز و کارهای کنترلی گره‌های مرتبط با این قطعه از خط را برای قطار مزبور رزرو می‌نماید و لذا این قطعه خاص برای سایر قطارها به‌صورت انسداد درمی‌آید. با خروج قطار از بلاک مسدود شده، قطعه مزبور و زیرساخت مرتبط با آن آزاد می‌شود. نکته قابل‌ذکر آن است که رزرو و آزادسازی بلاک‌های اشغال‌شده نباید با عملیات مشابه در طول خط تداخل داشته باشد [۲۰]. زمان بافر و مکمل‌های مرتبط با آن دو ویژگی مهم جداول زمانی به شمار می‌روند. زمان بافر میان دو قطار در یک زیرساخت ریلی درواقع به زمان بین اشغال شدن خط در حرکت دو قطار متوالی اطلاق می‌گردد و زمان مکمل نیز مقدار زمانی است که به‌منظور به حداقل رساندن زمان حرکت و یا توقف به جدول افزوده می‌شود [۲۱].

در برخی مطالعات نظیر تحقیق اندرسون و همکاران (۲۰۱۹) و نیز کرون و همکاران (۲۰۰۸) محققان به بررسی نقش زمان‌های بافر و زمان‌های توزیع مکمل برای بهینه‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها پرداخته‌شده‌اند. فیشتی و همکاران (۲۰۰۹) نیز بهینه‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها را به‌منظور بهبود و ارتقای سطح استواری جداول زمانی مترو به یاری مجموعه‌ای از سناریوهای مرتبط با بروز تأخیر در شبکه ریلی موردمطالعه قرار داده‌اند. یکی از مزایای رهیافت پیشنهادی ایشان علاوه بر سهولت پیاده سازی، آن است که در خروجی‌های جداول زمان‌بندی از طریق ایجاد بهبودهای کوچک می‌توان تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر راندمان ترافیکی شبکه ریلی نهاده و بدون هیچ تبعات ناشی از اثر پراکندگی و تجمعی، جابجایی مسافران را با ظرفیت مطلوب میسر نمود. البته الگوی مزبور دارای نقاط ضعفی نیز است از جمله آنکه نتیجه نهایی همچنان به طرح جداول زمانی اولیه بستگی داشته و مستقل از وجود مقادیر ابتدائی نمی توان آن را اجرا نمود. بنابراین با توجه به پیشینه تحقیق در مطالعه حاضر ابتدا یک جدول زمان‌بندی اولیه‌ی میکروسکوپی طراحی می‌شود. لذا لازم است نقشه راه طراحی و ایجاد جدول مدنظر قرار گیرد. از طرفی نیز هدف از ایجاد یک جدول زمان‌بندی میکروسکوپی لحاظ شرایط خاص شبکه نظیر نقص فنی است به‌طوری‌که بتواند راهبردی برای حرکت‌های مسافری در شبکه مترو با استفاده از حداکثر سازی زمان بافر بین سیر و حرکت قطارها برای پوشش این قبیل انحرافات باشد. ازآنجاکه یکی از مفروضات پژوهش حاضر آن است که از یک جدول موجه دلخواه ابتدائی شروع نموده و سپس یک برنامه مسیریابی نهایی طراحی گردد لذا جدول بهینه نهایی به جدول اولیه بستگی چندانی نداشته و جواب بهینه بدون تضاد با جدول زمان‌بندی اولیه ارائه می‌شود.

۲-۳- مسئله مسیریابی و زمان بندی با رویکرد یکپارچه

رهیافت‌های یکپارچه معمولاً از یک جدول زمان‌بندی موجه و ابتدائی شروع می‌شوند. الگوی پیشنهادی در تحقیق حاضر شامل ارائه یک رهیافت مسیریابی مستقل به منظور تولید یک جدول زمان‌بندی بهینه با توجه به بسامدهای استفاده از یک گره با لحاظ زمان‌های بافر است. بنابراین ضریب تأثر گره‌ها (ایستگاه‌ها) از تأخیرهای ناشی از انسدادهای برنامه‌ریزی نشده بلاک‌های اشغال خطوط در طراحی جداول زمانی تسهیل می‌گردد. برخی رویکردهای یکپارچه که از یک جدول زمان‌بندی موجه و اولیه شروع‌شده و تأثیر مثبتی بر بهبود عملکرد سیستم ترافیک سامانه‌های ریلی داشته‌اند در مطالعات دیویلد و همکاران (۲۰۱۴) و نیز بورگگریو[1] و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده می‌شود. در این مطالعات الگوریتم‌ها از یک برنامه مسیریابی اولیه و جدول زمان‌بندی موجه و ابتدائی وابسته به آن شروع‌شده و از طریق ماژول‌های مسیریابی و زمان‌بندی پایه‌ای به‌منظور بهبود میزان استواری حرکت‌های مسافری مستمراً تکرار می‌شود.

شیوه‌های ترکیبی از یک‌پایه مناسب شروع‌شده و با بهره‌گیری از حلقه بازخورد میان سطوح میکروسکوپی و مایکروسکوپی تدریجاً تکمیل می‌شوند [۲۳-۲۲]. در تحقیق حاضر زمان‌های ورود و خروج قطار به گره‌ها، در سطح مایکروسکوپی تعیین می‌شود و سپس یک برنامه مسیریابی موجه و ابتدائی توسعه داده می‌شود و به‌این‌ترتیب پایه‌ی طراحی یک جدول زمانی میکروسکوپی ایجاد می‌شود. بنابراین معمولاً برای حصول اطمینان از عدم تداخل با سایر پارامترهای زیرساختی در شبکه مترو از یک رویکرد شبیه‌سازی تحلیلی استفاده می شود. ازجمله تحقیقاتی که دارای زمینه‌ها و رویکردهای مشابه است می‌توان به مطالعه سلز[2] (۲۰۱۹) اشاره کرد که در شبکه حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری بلژیک پیاده‌سازی و توسعه داده‌شده است و در آن میزان استواری حرکت قطارهای مسافری در شبکه ریلی با استفاده از یک رهیافت برنامه ریزی خطی بهینه شده است. لذا نقطه قوت این مطالعه حاضر در مقایسه با تحقیق یادشده در آن است که محققان کوشیده‌اند تنگناهای فنی متروی تهران را به‌عنوان یک محدودیت اصلی لحاظ نمایند درحالی‌که مطالعه سلز (۲۰۱۶) با وسعت‌بخشی به جغرافیای پژوهش کمتر به محدودیت‌های ترافیکی پرداخته است. وجه تمایز دیگر تحقیق حاضر با مطالعات پیشین تصریح بهره گیری از زمان‌های بافر بین قطارهای مختلف در گره‌های مشترک شبکه از طریق محدود کردن آن‌ها در سرفاصله زمانی حرکت قطارها[3] است. همچنین تحقیق حاضر استفاده از زمان‌های بافر را تحدید نکرده و می‌کوشد در مقیاس میکروسکوپی با بهره به‌جا از آن‌ها، تابع هدف مدل را تا حد ممکن به نقطه بهینه نزدیک نماید. مطالعات دیگر در این زمینه عبارت‌اند از تحقیق زوانولد[4] و همکاران (۲۰۱۲)، کرون و همکاران (۲۰۰۹)، شلکته[5] و همکاران (۲۰۱۴) و کروتین[6] و همکاران (۲۰۱۷) که در آن محققان به ارائه و تدقیق مسائل مسیریابی و جدول زمان‌بندی حرکت قطار از طریق شیوه‌های مختلف مدل‌سازی پرداخته‌اند. نقطه قوت مطالعه ایشان لحاظ نمودن سطوح خرد و کلان برنامه‌ریزی زمانی برای محاسبات پارامترهای مسیریابی و جدول زمان‌بندی است، بااین‌حال تعداد جایگزین‌های مسیر در مطالعه موردی آنها محدود بوده و نیز ابعاد متعدد استواری را مورد لحاظ قرار نداده‌اند. در مطالعه کایمی و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل چند سطحی برای طراحی برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه‌های پرترافیک ریلی پیشنهادشده اما واکنش

[1] - Burggraeve
[2] - Sels
[3] - Head way
[4] - Zwaneveld
[5] - Schlechte
[6] - Korotin

به اعوجاجات و سرعت عمل در این رویکرد مطلوب نبوده و در سطح جزئیات، برنامه مایکروسکوپی ارائه شده برای مورد کاوی؛ می‌تواند خروجی‌های جدول را متأثر نموده و به تبعات دیگری در شبکه بینجامد علاوه بر آن میزان معینی از استواری در نظر گرفته نشده است. در مطالعات بشینوویچ و همکاران (۲۰۲۰)، گوورد و همکاران (۲۰۱۶) و بشینوویچ و همکاران (۲۰۱۷) با توجه به نرخ اشغال زیرساخت‌ها و آستانه‌ی ظرفیت پیشنهادشده است که با گنجاندن مکمل‌های زمانی مناسب در توقف یا حرکت‌های قطار، گسترش تأخیر مدیریت می شود بااین‌حال استفاده از همین رویکرد می‌تواند سبب بروز تداخل و تضادهایی برای مسیرهای دیگر حرکتی شود. در مطالعه حاضر الگویی پیشنهادشده است که پس از شناسایی نقاط متضاد بتوان از طریق بازگشت به سطح مایکروسکوپی و تعیین زمان‌های ورود و خروج جدید، تداخل‌های زمانی برای قطارها در حال سیر به سمت ایستگاه‌ها (گره‌ها) حذف شوند تا در نتیجه جدول زمان‌بندی نهایی جدولی بدون تداخل، باثبات و استوار باشد. همچنین در تحقیق حاضر تمایز حائز اهمیت با سایر مطالعات شیوه چیدمان عناصر و مؤلفه‌های زیرساخت و تراکم ترافیک است که این روش برای آن طراحی‌شده است. در تحقیق بشینوویچ و همکاران (۲۰۲۰) و گوورد و همکاران (۲۰۲۱) از رویکردهای فرا ابتکاری استفاده‌شده است که در طراحی رفع تنگناها برای برنامه مسیریابی و تنظیم جداول زمانی با توجه افزایش پیچیدگی‌های زیرساخت و حجم ترافیک قطارها؛ حجم محاسبات افزایش می‌یابد این در حالی است که در تحقیق حاضر ضمن بهره‌گیری از مدل‌های بهینه‌سازی حجم محاسبات افزایش نمی‌یابد. با بررسی پیشینه مقالات علمی مرتبط با مسیریابی و برنامه ریزی سیر و حرکت قطارها برای یافتن نوآوری تحقیق به صورت اسمی می توان جدول شماره یک را ذکر نمود.

جدول شماره **۱**) مقایسه تطبیقی الگوریتم‌های بهینه سازی جداول زمانبندی و مسیریابی حرکت قطارها در شبکه مترو برای به دست آوردن نوآوری و نقطه قوت مطالعه حاضر

نام نویسندگان	الگوریتم و روش پژوهش	مزایا و معایب		نقطه قوت و نوآوری پژوهش حاضر
		مزایا	معایب	
لی و یانگ (۲۰۱۳)	بهینه سازی جدول زمانی حرکت قطارها با استفاده از الگوریتم تصادفی	بالا بردن کارائی از طریق دسترسی به اعداد تصادفی	رفتار خروجی براساس مقادیر تولید شده توسط یک مولد تصادفی تعیین می شود.	کارایی بالا بر اساس تولید خروجی توسط مولد تصادفی
اسیس و میلانی (۲۰۰۴)، کارل و همکاران (۲۰۱۰)؛ ابرلین (۲۰۰۰)؛ ابرلین و همکاران (۲۰۰۰)، لین و شئو و لین (۲۰۱۱)	کنترل زمان واقعی	اطمینان از اینکه شبکه قادر به حمل و نقل و ترافیک بر اساس عرضه است.	نظارت و تصحیح عملکرد در عمل امکان پذیر نیست.	امکان تصحیح عملکرد در حالت‌های عملیاتی
اودل و ویلسون (۲۰۰۰) ; شن	مدل مدیریت اختلال با الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر	مدیریت رخدادهای پیش بینی نشده و کنترل عملکرد	عدم توجه به اصل کاهش متوسط زمان سفر مسافرین	کاهش متوسط زمان سفر

نام نویسندگان	الگوریتم و روش پژوهش	مزایا و معایب		نقطه قوت و نوآوری پژوهش حاضر
		مزایا	معایب	
(۲۰۰۰) و شن و ویلسون (۲۰۰۱)				
کوری و همکاران (۲۰۰۰)	بهینه سازی سیستم مترو برای ارائه حداقل خدمات ریلی از طریق پایگاه دانش	ارزیابی پایگاه دانش سیر و حرکت قطارها و بهسازی آن	عدم اتخاذ استراتژی مناسب و برنامه ریزی مدون برای اختلالات ریلی	برنامه ریزی اختلالات ریلی برای بازگشت به وضعیت نرمال
داریانو و همکاران (۲۰۰۷)	الگوریتم محدود برای ایجاد یک برنامه زمانبندی سیر و حرکت‌ها	ایجاد زمینه حداقل انحراف از جدول زمانی اولیه	عدم شناسایی دقیق نقطه بهینه در فضای جواب	امکان شناسائی نقطه بهینه در فضای جواب در حالت عملیاتی
آلبرشت (۲۰۰۹)	رویکرد دو سطحی برای مشکل زمانبندی قطار با استفاده از الگوریتم مبتنی بر تقاضا	قدرت پیش بینی بالاتر	نیاز به تعیین فرم تبعی خاص، نیاز به داده‌های آموزشی فراوان و ضعف در یافتن نقطه بهینه سراسری	یافتن نقطه بهینه سرتاسری
فیشی تی و موناچی (۲۰۰۹)	بهینه سازی تحت عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تصادفی	پایداری بیشتر در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک	محاسبات بالا	محاسبات مناسب و کم
کارل و همکاران (۲۰۱۰)	الگوریتم شبکه عصبی	ملاحظات عمده در کنترل ارائه خدمات در خطوط مترو و پشتیبانی از فرکانس‌های بالا سیر و حرکت	وجود مشکل کمینه‌های محلی در سامانه‌های ترافیکی مترو	تقویت سامانه‌های ترافیکی
منگ و ژو (۲۰۱۱)	الگوریتم برنامه ریزی تصادفی چند مرحله ای	استفاده از یک روش حل کارا مبتنی بر تقریب میانگین نمونه	برتری جواب‌های حل به حل قطعی	فضای جواب مسلط
ساتو و همکاران (۲۰۱۳)	الگوریتم تخصیص	حصول ترکیب سیستمی بهینه	کاهش هزینه‌های ناشی از تأخیرات	حذف هزینه‌های تأخیر
نیو و ژو (۲۰۱۳)	الگوریتم برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط	کارآمدی جواب‌های بهینه یا نزدیک بهینه	عدم توجه به محدودیت‌های ناشی از ظرفیت منابع	لحاظ کردن ظرفیت

۳- روش شناسی انجام پژوهش

۳-۱- مدل مسیریابی

مدل مسیریابی می‌تواند هر قطار را به یک مسیر از خطوط مترو تخصیص دهد. در اینجا مسیر ریلی دنباله‌ای از گره‌ها (ایستگاه‌ها) و یال‌های متوالی (فاصله میان ایستگاه‌ها) است. تمرکز تحقیق حاضر بر روی گره‌ها است زیرا گره‌ها به‌طور منحصربه‌فرد جهت یال‌ها (مسیر حرکت قطار) را در شبکه ریلی تعیین می‌نمایند. علاوه بر این در شبکه مترو تداخل میان زمانبندی دو قطار تنها زمانی اتفاق می‌افتد که حداقل یک یال و یا گره مشترک برای آن‌ها در شبکه وجود داشته باشد. از طرفی این امکان وجود دارد که در یک بلاک کامل؛ قطارها فاقد گره یا یال مشترک باشند و یا اینکه در ایستگاه‌های تقاطعی تنها یک گره مشترک داشته باشند. علاوه بر این اشغال بلاک‌ها در زیرساخت‌های مترو را می‌توان با استفاده از روابط میان یال‌ها و گره‌ها در شبکه گراف‌ها تبیین نمود [۲۲]. جداول زمانی عمدتاً در مرحله طراحی فاقد پیش فرض‌های مرتبط با نویزهای برنامه ریزی نشده هستند زیرا طراحی جداول تنها پس از تعیین برنامه مسیریابی امکان‌پذیر می‌شود. با این‌حال طراحی برنامه مسیریابی باید به‌گونه‌ای باشد که به ایجاد یک جدول زمان‌بندی استوار منتهی گردد [۱۶]. در مدل‌های مسیریابی لازم است هر قطار طوری به مسیرها تخصیص یابد که تا حد امکان یال‌های کمتری توسط قطار طی شود که درنتیجه قطارها در ابعاد فضایی خطوط مترو به‌طور یکنواخت توزیع شوند و از زیرساخت‌های خطوط شبکه ریلی و محدوده ایستگاه‌ها به‌گونه‌ای بهینه استفاده شود و خارج نمودن قطارها در طول زمان‌بندی اعزام‌های مسافری تسهیل شود (همان منبع، ۲۰۰۶).

۳-۲- تبیین مدل

به‌منظور کاهش حجم ترافیک و ازدحام در گره‌ها لازم است در طراحی تابلوی اولیه تا حد امکان گره‌های کمتری توسط قطارها طی شود، لذا در این پژوهش کوشیده شده حداکثر استفاده از گره‌ها، حداقل گردد (تکنیک حداکثر – حداقل). حالت مطلوب آن است که به ازای x گره تعداد x رام قطار در سکوها موجود باشد به‌طوری‌که مسیر ریلی شامل توزیع تمامی این گره‌ها باشد اما در مقام واقع چنین مهمی رخ نخواهد داد. علاوه بر این لازم است مجموع مربعات استفاده از تمامی یال‌ها در تابع هدف حداقل سازی شود و هرچه نرخ استفاده از یک گره افزایش یابد، جریمه‌ای که برای آن در تابع هدف در نظر گرفته شود، به صورت متناسب افزایش خواهد یافت. در برخی ایستگاه‌های تقاطعی شبکه متروی تهران مسیرهای انتساب یافته به هر یک از گره‌ها، بیشتر از تعداد قطارها موجود در سکوها است و این خود می تواند به‌عنوان یک محدودیت زائد بر هدف حداقل سازی منطقه موجه تأثیر منفی داشته باشد و نکته دیگر ادغام مسئله حداقل سازی برای مینیمم نمودن حداکثر وزن (H) و ماکزیمم سازی استفاده از گره‌ها برای ارتقای ظرفیت است. در اینجا بزرگی H به‌اندازه‌ی پارامترهای مسئله بستگی دارد.

۳-۳- بیان متغیرهای تصمیم در مسئله

متغیرهای تصمیم مورداستفاده مدل پیشنهادی به شرح زیر فهرست می‌شود:

- مجموعه تعداد قطارها مورد بررسی در خط دوی متروی تهران؛ که در این مورد کاوی با [T] نشان داده می‌شود:

$$T = \{t_1, t_1, \dots , t_{[T]}\}$$

- مجموعه تعداد گره‌های (ایستگاه‌ها) مورد بررسی در مطالعه موردی تحقیق حاضر که با [W] نشان داده می‌شود:

$$W = \{W1, W1, \dots ,W[W]\}$$

- مجموعه یال‌ها (خطوط ریلی مسیر حرکتی) مورد بررسی در مدل که با [R] نشان داده می‌شود:

$$R = \{r1, r2, \ldots, r[R]\}$$

لازم به توضیح است مجموعه مسیرهایی که در آن قطار t می‌تواند به یک خط ریلی خاص در مدل تحقیق، انتساب یابد با توجه به ورودی و خروجی‌های خطوط ریلی به گره‌ها (ایستگاه) تعیین می‌شود:

$$R_t \subseteq R$$

$$l_{t,w} = 1 : if\ r\ \in\ R\ , w\ \in W$$

$$\text{Else}\ \ l_{t,w} = 0$$

بیشترین وزن به‌منظور نشان دادن تسلط حالت مینیمم و مقدار انتساب یافته به تابع هدف مورد استفاده در مدل مسیریابی با H نشان داده می‌شود.

- تعداد دفعات عبور قطار از گره w با این شرط که $w\ \in W$ باشد، به شرح زیر است:

$$g_w \in\ Z^+$$

$$X_{t,r} = 1 : if\ t \in T\ , r \in R_t$$

$$\text{Else}\ \ l_{t,w} = 0$$

۳-۴- تابع هدف مدل

تابع هدف به‌صورت مینی ماکس (Minimax) برای حداکثر وزن عبور قطارها از یک گره و مجموع مربع گره‌ها است که به‌صورت رابطه شماره یک نمایش داده می‌شود:

$$\text{Min H max}\ w\ \in W\ g_w + \sum_{w\ \in W}\ g_w^2 \qquad (۱)$$

در تابع هدف بخش‌ها به‌صورت غیرخطی هستند. در بخش اول تابع هدف در پی مینیمم سازی است و لذا می‌توان به سهولت از طریق تعریف محدودیتی نظیر آنچه در رابطه شماره (۶) نگاشته می شود آن را به‌صورت خطی درآورد و همچنین بخش دوم تابع هدف که خطی نمودن آن قدری دشوار به نظر می‌رسد زیرا رابطه از مجموع حاصل‌ضرب گره‌ها در مربع تعداد بسامدهای ناوگان قطارها در یال‌ها (اعداد صحیح) به دست آمده است از این رو برای آنکه بتوان زمان محاسبات را تا حد قابل‌ملاحظه‌ای بهبود بخشید می‌توان با لحاظ نمودن محدودیت‌هایی نظیر آنچه در رابطه شماره (۷) می آید برای حداقل سازی پارامترهای b_k و w در مدل پیشنهادی استفاده نمود. لازم به ذکر است پیاده‌سازی هر دو تابع مقدار بهینه یکسانی را تولید می‌نماید.

$$Min\ H_z + C \sum_{k=1}^{k} c_k b_{k\ ,w} \qquad (۲)$$

s.t

$$g_w \leq Z\ \forall\ w \in W \qquad (۳)$$

$$g_w = \sum_{k=1}^{k} b_{k,w}\ \ \forall\ w \in W \qquad (۴)$$

$$\sum_{r\ \in\ R_t} x_t = 1\ \forall\ w \in W \qquad (۵)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R_t} l_{r,w} x_{t,r} =\ g_w\ \ \forall\ w\ \in W \qquad (۶)$$

$$g_w\ \in\ z^+\ \ \forall\ w \in W \qquad (۷)$$

$$z \in Z^{+} \quad (۸)$$

$$x_{t,r} \in \{0,1\} \forall t \in T, \forall T \in R \quad (۹)$$

$$b_{k,w} \in \{0,1\} \forall k \in \{1, \ldots .,k\}, w \in W \quad (۱۰)$$

۳-۵- مسیریابی خطی

محدودیت شماره ۵ تضمین می‌نماید که هر قطار تنها به یک مسیر ریلی تخصیص می‌یابد و در واقع ورودی مسیر ریلی را به خروجی آن متصل می‌سازد. از طرفی در محدودیت شماره ۶ ، g_w برابر با تعداد قطارهایی که از گره (ایستگاه) یعنی W عبور می‌نمایند. روابط حدی شماره ۷ و ۹ ، محدودیت‌هایی هستند که بیان می‌کنند میزان بسامدهای عبور قطارها از یک گره الزاماً عددی مثبت خواهد بود. در اینجا $x_{t,r}$ نیز نشان‌دهنده انتساب قطار به یک مسیر ریلی است. چنانچه در روابط بالا b_k و W به‌عنوان متغیرهای پیوسته در بازه [۰,۱] تعریف شوند، می‌توان به‌جای متغیرهای باینری در محدودیت شماره ۱۰ و نیز مؤلفه z به‌عنوان یک متغیر پیوسته در بُرد R_t از اعداد صحیح مثبت Z^{+} که در رابطه شماره ۸ تعریف‌شده و به دست می‌آید، استفاده می‌نماید.

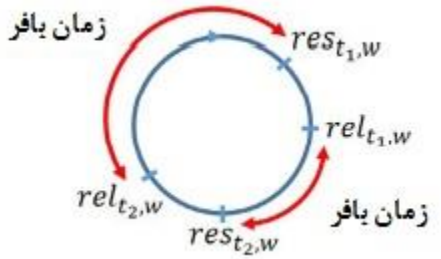
۳-۶- مدل زمان‌بندی

در تحقیق حاضر یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید برای طراحی و ایجاد جداول زمان‌بندی پیشنهادشده که هدف اصلی آن طراحی و پیاده سازی یک جدول زمان‌بندی بدون تداخل برای حرکت‌های مسافری طول خط در مقیاس میکروسکوپی است. اهمیت طراحی این مدل در آن است که برنامه مسیریابی پیشنهادی می‌تواند با استفاده رویکرد پیشنهادی آن تدقیق توسعه یابد. در این مدل زمان توقف و حرکت قطارها و نیز زمان‌های مرتبط با توقف‌های برنامه‌ریزی نشده نظیر مسدودی مسیر ریلی به علت نقص فنی و غیره ... را می‌توان پیش از تنظیم جداول زمان‌بندی بر اساس ویژگی‌های مسیر ریلی و قطعات تعریف شده در آن با استفاده از مکمل‌های زمانی تقویت نمود. طول زمان‌های انسداد خطوط ریلی نیز به‌منظور تثبیت زمان‌های رزرو و رهاسازی بلاک‌های مسیر حرکتی قطار به‌عنوان مقادیر پارامترهای مکمل در مدل جداول زمان‌بندی مورداستفاده قرار می‌گیرد. همچنین زمان‌های رزرو و آزادسازی گره‌هایی که قسمتی از یک بلاک حرکتی هستند برای تمامی قطارها یکسان فرض می‌شود.

۳-۷- تبیین تابع هدف

در تحقیق حاضر تابع هدف در مدل زمان‌بندی در پی حداکثر سازی زمان بافر برای قطارهای در حال سرویس شبکه متروی تهران در گره‌های (ایستگاه) خاص طول مسیر ریلی است که به‌طور نرمال در هر سیکل کامل، حرکتی برای هر دوره تکرار می‌شود (تصویر شماره یک). پارامترهای تصمیم‌گیری برای الگوی استفاده از مکمل‌های زمانی در این مدل لحاظ شده است. در این مدل برای بهینه‌سازی زمان بافر میان قطارها در یک مسیر خاص برای جدول زمانبندی بر دو پارامتر گره و یال تمرکز شده است که رهیافت آن تا حدود زیادی مشابه با مدل مسیریابی است. بنابراین فرض بر آن است که حداقل زمان بافر در تمام گره‌ها به حداکثر مقدار ممکن برسد به‌طوری‌که زمان رزرو و آزادسازی قطعات برای هر قطار در حال سیر در میان گره‌ها و نیز مجموع

حداقل زمان‌های بافر میان دو قطار که حداقل یک گره (ایستگاه) و یا یال مشترک دارند، به حداکثر مقدار خود برسد. بنابراین در این تحقیق با انتساب وزن قابل‌قبول و بالا به تابع هدف (H) کوشیده می‌شود مقدار نقطه بهینه با توجه به ضرائب متغیرهای تصمیم مسئله از طریق محاسبه مجموع تأخیرها حداقل شود.



تصویر شماره ۱) اعمال زمان رزرو و آزادسازی گره (ایستگاه) از طریق بافر برای قطار شماره t_1 با استفاده از پارامترهای زمانی $res_{t1,w}$ و $rel_{t1,w}$ صورت می‌گیرد و برای قطار شماره t_2 نیز بافرهای رزرو و آزادسازی برای گره مشابه با توجه به مؤلفه‌های زمانی $res_{t1,w}$ و $rel_{t1,w}$ اعمال و بافر زمانی دوم میان $res_{t1,w}$ و $rel_{t1,w}$ قرار می‌گیرد.

۸-۳- تبیین پارامترهای مدل

پارامترهای مدل برای تصمیم گیری به شرح زیر تبیین می‌شود.

- r^t عبارت است از مسیر ریلی تخصیص‌یافته به‌قطار $t\epsilon T$ در برنامه مسیریابی
- $S_r(S_{r^t})$ ناظر بر نخستین گره در مسیر ریلی $r(r^t)$ می‌باشد.
- $d^{res}_{t,rt,w}$ $(d^{rel}_{t,rt.w})$ طول بازه زمانی را برای قطار $t\epsilon T$ در حالت رهاسازی بلاک اشغال (آزادسازی) برای گره W نشان می‌دهد که در نتیجه با ورود قطار t به مسیر ریلی توأم است.
- T_w عبارت است از مجموعه قطارهایی نظیر t در شبکه ریلی که برای مسیرهای r^t شامل گره‌ها (ایستگاه) w لحاظ می‌گردد.
- P طول دوره زمانی برای یک حلقه کامل جدول زمان‌بندی است.
- $\overline{H}$ ناظر بر بیشترین وزن ممکنی است که برای پیاده‌سازی وجه تسلط بُعد ماکسیمم تابع هدف بر اساس معیار زمان بافر و ظرفیت در تابع هدف مدل برای جداول زمان‌بندی است.

۹-۳- متغیرهای تصمیم

$\mathcal{E}$ کوچک‌ترین عدد صحیحی است که بر اساس آن، همه مقادیر $d^{res}_{t,rt,w}$ و $d^{rel}_{t,rt.w}$ در محاسبات مربوطه کوچک‌تر از $(\mathcal{E}-1)p$ به دست می‌آید. همچنین در خصوص مقادیر انتساب یافته به متغیرهای رزرو و آزادسازی و نیز بازه مربوطه داریم که

$res_{t,w}, rel_{t,w} \in [0, P]$؛ در این مورد t نشان‌دهنده لحظه‌ای است که بلاک رزرو می‌شود و w در چرخه جداول زمان‌بندی آزاد می‌گردد. همچنین لحظه‌ای که قطار t بلاک را اشغال می‌نماید این رابطه می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود:

$$\forall\, t \in T, w \in r^t$$

همچنین به ازای هر اشغال و آزادسازی گره w توسط قطار t در بازه [ξ, ۰] و نیز برای لحظه‌ای که قطار t به اشغال یک نقطه از قطعه ی میان دو گره می‌پردازد؛ (res_p) لحظه‌ای است که گره w در چرخه جدول زمان‌بندی آزادسازی می‌شود، رابطه‌ای در مدل به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$\forall\, t \in T, w \in r^t$$

پارامتر h در مدل که بر اساس گزاره‌های شرطی بیان می‌شود نشان از آن دارد که چنانچه مقدار آن متعلق به بازه $[h_p, (h+1)p]$ باشد آنگاه رابطه به دست آوردن آن به‌صورت زیر خواهد بود:

$$res_{t,w}^{int}, rel_{t,w}^{int} \in [0,1,\dots,\xi-1] = 1$$

و در غیر این صورت حاصل جمع زمان اشغال یک قطعه ریلی و طول دوره یک سیکل زمانی کامل در جدول زمان‌بندی برای h با تفریق آن از زمان آزادسازی متعلق به بازه [0,P] برای هر قطار i و j به‌صورت زیر تبیین می‌شود:

$$resrel_{t,w}^{int} \in \{-\xi, \dots, \xi\} = h \qquad (۱۱)$$

همچنین زمان بافر برای زمان اشغال خط توسط قطار t_j و زمان آزادسازی توسط قطار t_i در گره W درصورتی‌که دو قطار هم‌سنخ نبوده و W نیز به مجموعه مسیر مشترک دو قطار یادشده تعلق داشته باشد، در بازه [0,P] قرار می‌گیرد. همچنین رابطه مینیمم زمان بافر میان زمان اشغال قطعه‌ای از مسیر توسط قطار j و زمان آزادسازی آن توسط قطار i در گره W با شرط تعلق به مسیر مشترک به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min buf ti , tj , w} \in [0, P]$$

و در حالت کلی مینیمم زمان بافر برای همه گره‌ها با استفاده از قاعده «ماکسی مین» به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{Z} \in [0, P]$$

۱۰-۳- تبیین مدل

در این مدل حداکثر حداقل زمان بافر «ماکسی مین» بر روی همه گره‌ها با فرض آنکه قطارهای i و j یکسان نباشند به‌صورت ضرب کارتزین مجموعه قطارهای موجود در یال‌های منتهی به گره‌های W خواهد بود و در این صورت حداکثر سازی مجموع زمان‌های بافر میان هر دو قطار می‌تواند به‌صورت زیر نشان داده شود:

$$\max Z \sum \min buf_{t,t',w}$$

چنانکه پیش‌تر نیز گفته شد، هر دو بخش تابع هدف خود به‌نوعی از معادلاتی مجزا به شمار می‌رود که می‌تواند در حداکثر سازی زمان بافر برای بهینه‌سازی مدنظر قرار گیرد. ازاین‌رو می‌توان محدودیت مرتبط با آن را به شیوه زیر تعریف نمود:

$$\max HZ + \sum \min buf_{i,j}$$

همچنین با لحاظ نمودن گره W می‌توان محدودیت دیگری را نیز به مسئله افزود که در آن زمان بهینه از زمان بافر کوچک‌تر خواهد بود و معادله آن به‌صورت زیر است:

$$\bar{Z} \leq buf_{t_i,j,w}$$

همچنین برای بخش دوم تابع هدف می‌توان به مقایسه زمان‌های بافر با یکدیگر پرداخت که در این صورت رابطه آن به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\min buf_{t_{min}-t_{max}}$$

بنابراین خطی سازی تابع هدف که به‌صورت ترکیبی ارائه‌شده است می‌تواند مبنای مدل زمان‌بندی برای جداول باشد. از سوی دیگر لازم است محدودیت‌هایی نیز به‌منظور حصول اطمینان از عدم همپوشانی زمان‌های اشغال یک گره و یا بلاک خاص توسط دو قطار حاصل شود. بنابراین در مدل پژوهش رابطه‌ای زیر پیشنهاد می‌شود:

$$res_{tj,w} - rel_{ti,w} \geq -P \cdot res\,rel_{ti,i,w} \qquad (۱۲)$$

در طراحی یک جدول زمان‌بندی خطی و غیر دوره‌ای، زمان‌های اشغال بلاک‌های خطوط توسط دو قطار (t_i, t_j) برای یک گره خاص فاقد همپوشانی خواهد بود. در این حالت چنانچه زمان اشغال بلاک‌ها توسط یکی از دو قطار دیرتر از زمان آزادسازی آن توسط قطار دیگر باشد، رابطه به‌صورت $res_{ti,w} - rel_{ti,w} \geq 0$ یا $res_{ti,w} - rel_{ti,w} \geq 0$ خواهد بود. بااین‌حال در یک جدول زمان‌بندی دوره‌ای لحاظ نمودن چنین شرطی می‌تواند برای زمان‌های اشغال و یا آزادسازی به صورت کمکی و یا غیرکمکی خطوط اصلی باشد و این در حالی است که برای زمان‌های انسداد بلاک‌های ریلی، بعضاً بروز همپوشانی اجتناب‌ناپذیر است. نمونه این مورد در جدول شماره دو آورده شده است. با توجه به آنکه طول یک سیکل زمانی کامل برابر ۶۰ دقیقه است. خروجی به صورت عددی منفی در ستون‌ها آمده است که نشان‌دهنده ی وجود همپوشانی در زمان‌های انسداد است. بنابراین اعمال ابن محدودیت در مدل زمینه‌ای را فراهم می‌نماید تا امکان همپوشانی برای زمان‌های انسداد به حداقل ممکن برسد. ازاین‌رو متغیر کمکی $res\,rel^{int}_{t_i,t_j,w}$ برای شرط $i<j$ در مدل در آورده می‌شود که با افزوده شدن به طول دوره زمانی، برای آزادسازی گره W توسط قطار شماره j تعیین و استفاده می‌شود. همچنین بافر زمانی $buft_{i,t_j,w}$ می‌تواند به‌عنوان یک زمان کمکی به آزادسازی قطار j به متغیر کمکی $res\,rel^{int}_{t_i,t_j,w}$ از طریق ضرب آن در طول دوره، و تفریق از زمان اشغال قطعه ریلی توسط قطار شماره i محاسبه شود. این مسئله در جدول شماره دو برای زمان‌های همپوشانی قطارها در گره‌ها (ایستگاه‌ها) و مسیر حرکتی مترو به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر اساس روابط فوق نشان داده‌شده است.

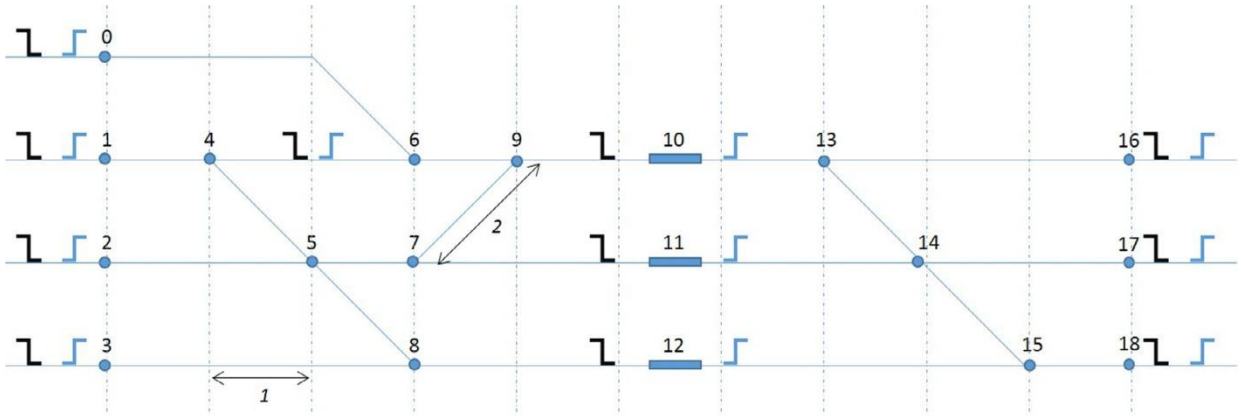
جدول شماره ۲) نمونه‌ای از زمان‌های انسداد آزادسازی قطعات ریلی با لحاظ همپوشانی‌های مستقیم یا غیرمستقیم در خطوط مترو

شماره قطار	مقادیر i و j	زمان مکمل برای اشغال و آزادسازی گره w توسط قطار t_i	زمان مکمل برای اشغال و آزادسازی گره W توسط قطار t_j	نقطه (i,j)	حاصل تفریق زمان‌های مکمل	$res_{t_i,w} - rel_{t_i,w}$
t_1	۱	(۴ و ۹)	(۴ و ۹)	(۳ و ۶)	۷۰-۴=۶۶	۶-۸=-۲
t_2	۲	(۶۵ و ۷۰)	(۵ و ۱۰)	(۴ و ۵)	۶۷-۷=۶۰	۷-۷=۰
t_3	۳	(۶۰ و ۶۵)	(۶۰ و ۵)	(۵ و ۷)	۶۶-۶۰=۶	۶۲-۴=۵۸
t_4	۴	(۶۱ و ۶۶)	(۶۱ و ۶)	(۶ و ۷)	۶۵-۶۱=۴	۶۳-۳=۶۰

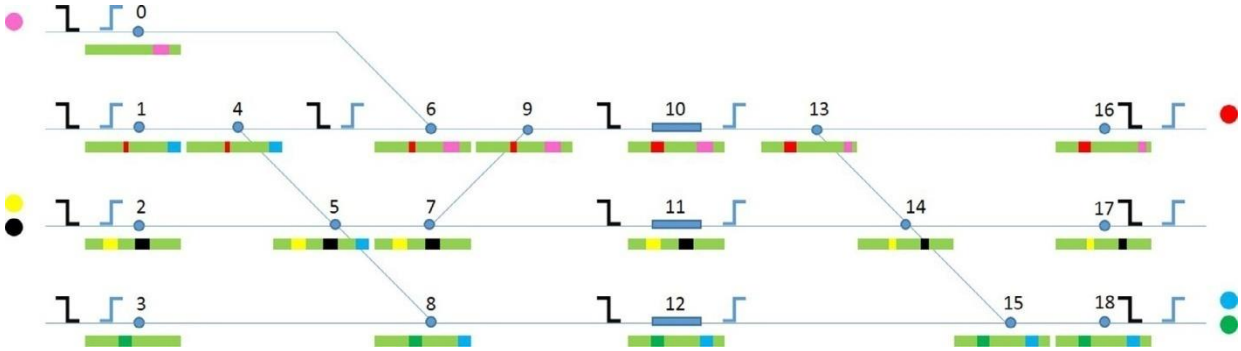
۴- مطالعه موردی: متروی تهران

رویکرد مورداستفاده در تحقیق حاضر به‌صورت شماتیک در تصویر شماره دو نشان داده‌شده است. در این تصویر دایره‌های آبی‌رنگ نشان‌دهنده گره‌ها (ایستگاه‌ها) هستند، مستطیل‌های آبی‌رنگ نشان‌دهنده‌ی سکوی ایستگاه‌های مترو است و پرچم‌ها نیز در این تصویر نشان‌دهنده سیگنال‌هایی هستند که قطعات متوالی و متفاوت در شبکه مترو را مشخص می‌سازند. سیگنال‌های طول مسیر ریلی با نمادهای مشکی رنگ مشخص‌شده‌اند و در این مدل راهنمای قطارهایی به شمار می‌روند که از شرق به غرب و یا به‌عکس حرکت می‌کنند. در اینجا بجای محاسبه زمان دقیق انسداد خطوط ریلی از محاسبات ساده‌تری برای حل مسئله نظیر پارامترهای زمانی استفاده می‌شود. همچنین در مورد پیکان‌های اتصال گره‌ها به یکدیگر (یال‌های جهت‌دار)، اعداد روی یال نشان‌دهنده زمان لازم برای رسیدن از یک گره به گره دیگر برحسب دقیقه می‌باشد. در این مطالعه فرض بر آن است زمان موردنیاز برای خروج کامل قطار از ایستگاه ۲۰ ثانیه باشد. در این مطالعه متوسط زمان توقف قطار در هر ایستگاه را ۱ دقیقه در نظر می‌گیریم. همچنین فرض بر آن است که تعداد شش رام قطار در خط مورد مطالعه موجود باشد. بنابراین هر قطار امکان حرکت در یکی از چهار قطعه از مسیر ممکن را داراست که ورودی و خروجی آن ثابت فرض می‌شود. حداکثر تعداد دفعاتی که یک قطار در یک گره می‌تواند عبور و یا توقف نماید، برابر عدد ۳ است. بنابراین حداقل زمان بافر برای تمامی گره‌های مسیر یادشده نمی‌تواند بیشتر از مقدار ۲۰ دقیقه باشد. با توجه به اینکه طول یک سفر حدوداً ۶۰ دقیقه فرض می‌شود، لذا مجموع مربعات استفاده از گره‌های برابر مقدار ۷۵ خواهد بود. در جدول شماره سه زمان اشغال و آزادسازی در تمام گره‌های طول مسیر نشان داده‌شده است. فرض می‌شود گره‌ها برای هر بلاک از مسیر حرکتی در مجاورت یکدیگر قرار دارند. جدول شماره

۳ حداقل زمان‌های بافر را میان هر دو قطار که دست‌کم در یک گره مشترک هستند را نشان داده است. حداقل زمان بافر به‌طورکلی دارای مقدار ۱۲,۱۳ دقیقه است که میان زمان اشغال و آزادسازی بلاک‌های مسیر توسط قطارها، لحاظ می‌گردد. به‌عنوان‌مثال گره شماره ۵ در یک بازه زمانی ۲۳,۶ دقیقه‌ای توسط سه قطار عبوری مسدود و آزاد می‌شود. بنابراین مجموع حداقل زمان‌های بافر میان هر دو قطاری که حداقل دارای یک گره مشترک هستند ۱۲,۷۹ دقیقه می‌باشد.



تصویر شماره ۲) نمونه کوچک از شبکه مترو در مطالعه موردی



تصویر شماره ۳) برای هر یک از شش قطار یک دایره پر و رنگی وجود دارد که نشان‌دهنده محدوده و ورودی‌های یک گره است. مستطیل‌های کوچک زیر گره‌ها نیز نشان‌دهنده یک بازه زمانی ۶۰ دقیقه‌ای هستند که مشخص می‌کنند چه هنگام یک گره توسط هر قطار اشغال و یا آزاد می‌شود. همچنین قسمت‌هایی از مستطیل‌ها که با رنگ سبز روشن آورده شده‌اند زمان بافر را نشان می‌دهند و سایر رنگ‌ها نیز زمان اشغال شدن خطوط توسط قطارها مختلف است.

زمان اشغال بلاک‌ها و نیز زمان آزادسازی هر بلاک به‌وسیله هر قطار در تمام گره‌های موجود در مسیر حرکتی شبکه مترو در جدول شماره سه آورده شده است.

جدول شماره ۳) زمان اشغال و آزادسازی قطعات مسیرهای ریلی‌ها به ازای هر قطار در هر قطعه در نمونه خط دوی متروی تهران

شماره قطار	رنگ دایره‌ها	شماره گره‌ها (W)	زمان اشغال گره توسط قطار	زمان آزادسازی گره توسط قطار
۰	آبی	۱۲؛ ۱۵ ؛ ۱۸ ۱؛ ۴؛ ۵ ؛ ۸	۴۹/۴۰ ۵۲/۳۰	۵۱/۲۰ ۵۳/۱۸
۱	سبز	۱۲؛ ۱۵ ؛ ۱۸ ۳؛ ۸	۱۱/۱۸ ۱۲/۰۰	۱۲/۱۰ ۱۳/۳۰
۲	قرمز	۱۰؛ ۱۳؛ ۱۶ ۶؛ ۹ ۱؛ ۴	۱۹/۴۰ ۲۱/۱۰ ۲۲/۱۲	۲۱/۱۵ ۲۲/۱۶ ۲۳/۵۵
۳	زرد	۱۱؛ ۷؛ ۵ ؛ ۲ ۱۴؛۱۷	۲۱/۱۹ ۲۲/۴۱	۲۲/۴۸ ۲۲/۴۹
۴	سیاه	۱۱؛ ۷؛ ۵؛ ۲ ۱۴؛۱۷	۲۳/۲۶ ۲۴/۵۰	۲۴/۵۶ ۲۵/۱۳
۵	بنفش	۱۰؛ ۹؛ ۶؛ ۰ ۱۳ ؛۱۶	۲۷/۱۹ ۲۹/۰۲	۲۹/۱۱ ۳۱/۱۹

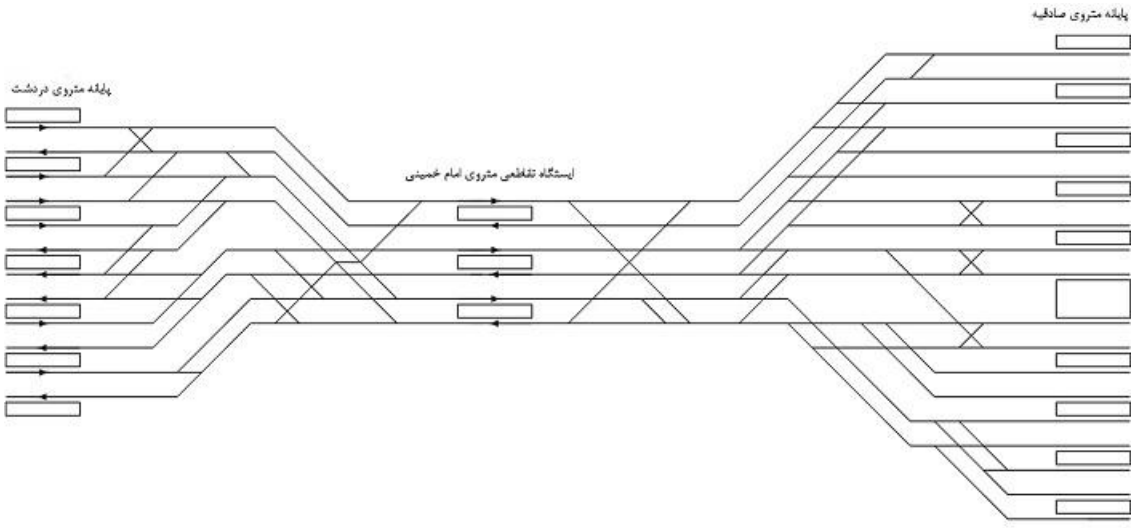
در جدول شماره چهار حداقل زمان کلی بافر ۱۰/۲۲ دقیقه لحاظ شده است. مجموع حداقل زمان‌های بافر بین هر دو قطار که حداقل یک گره مشترک دارد، ۰۹/۵۸ دقیقه است.

جدول شماره ۴) حداقل زمان بافر به ازای قطارهای متوالی در مسیر ریلی نمونه

فاصله هر دو قطار	حداقل زمان بافر (برحسب دقیقه)
۱-۰	۰۱/۶۹

فاصله هر دو قطار	حداقل زمان بافر (برحسب دقیقه)
۲–۰	۰۲/۱۱
۳–۰	۰۱/۴۲
۴–۰	۰۲/۱۱
۵–۲	۰۱/۲۲
۴–۳	۰۲/۰۳

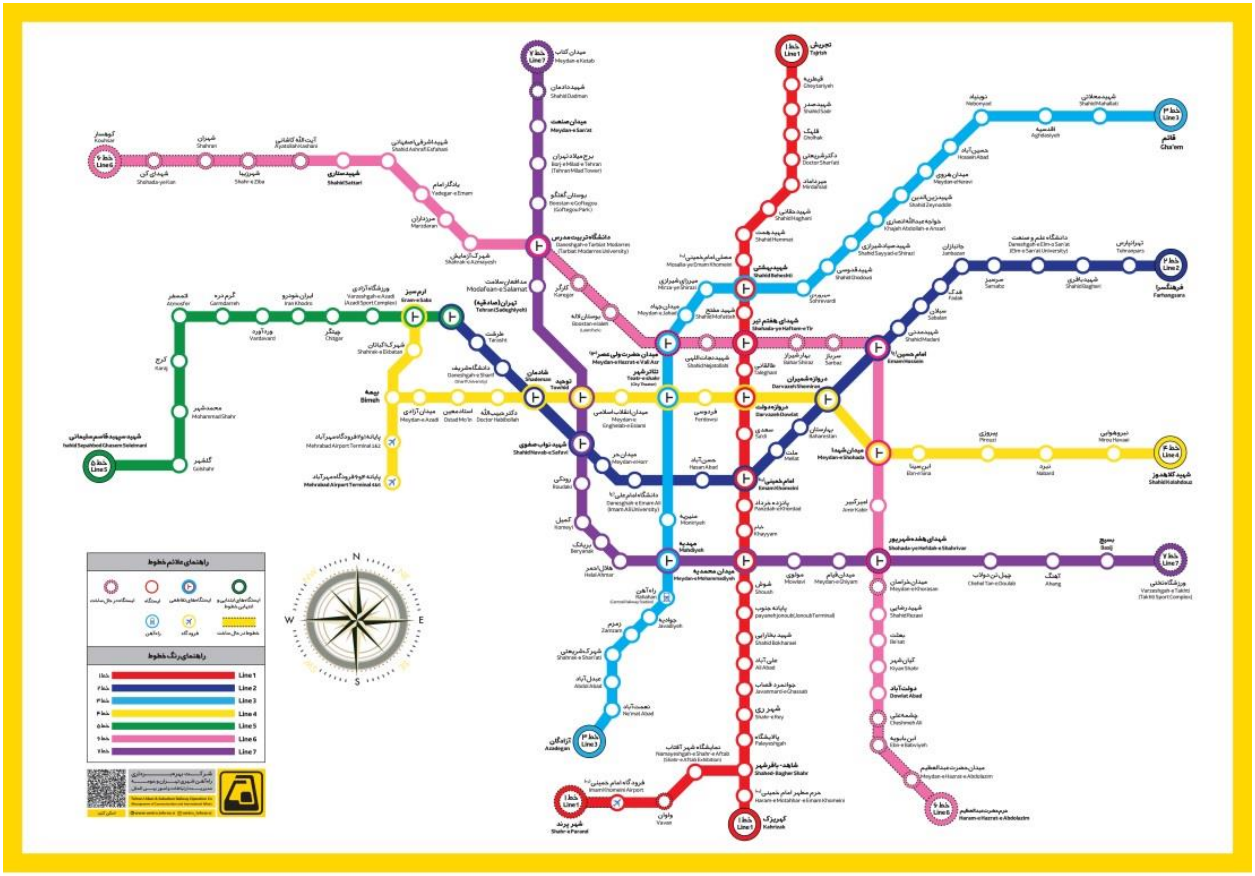
در تصویر شماره چهار، هسته متراکم خط دوی متروی تهران و ایستگاه مرکزی متروی امام خمینی به تصویر کشیده شده است.



تصویر شماره ۴) هسته متراکم خط دوی متروی تهران

به‌منظور سنجش روایی و پایایی مدل و بررسی میزان انطباق با مدل مرجع در تحقیق حاضر، مورد کاوی پژوهش در یک منطقه ایستگاهی خط دوی متروی تهران پیاده‌سازی شده که در آن شلوغ‌ترین ایستگاه‌های متروی تهران قرار دارد. شبکه ریلی موردمطالعه شامل مسیرهای ریلی روباز و تونلی، بخش‌های بیرونی شبکه در پایانه‌ها، ورودی‌های شبکه ریلی به محوطه پایانه و فضای شانت قطار از پایانه و غیره ... بوده است.

نمای کلی خط دوی مترو در کل منطقه ریلی متروی تهران به همراه تقاطع‌های آن با سایر خطوط در تصویر شماره ۵ نشان داده‌شده است.



تصویر شماره ۵) نمای کلی شماتیک منطقه ایستگاهی متروی تهران به‌صورت ساده با لحاظ تقاطع‌ها

با لحاظ محدوده هر گره متناظر با آن یعنی نقطه‌ای که در آن دو خط ریلی با یکدیگر تقاطع دارند و نیز سکوی ایستگاه‌ها در گراف شبکه ریلی مترو که درنهایت خود از طریق خطوط تقاطعی به ۱۴۵ گره منتهی می‌گردد. منطقه ایستگاهی متروی صادقیه خود شامل یک پهنه وسیع و سکوهای موازی است. که دارای ۳ سکوی ایستگاهی در سمت شمال، ۲ سکوی جنوبی، ۱ سکو در سمت شمال به سمت کرج است. ۴۳ رام قطار نیز برای تخصیص عادی در نظر گرفته شده است. این قطارها در ساعات اوج مسافری یعنی بین ساعات ۷ تا ۹ صبح و سایر ساعات غیر اوج از این ایستگاه خاص عبور می‌نمایند. در تحقیق حاضر ابتدا مفروضات مدل برنامه‌ریزی خطی که به‌عنوان ورودی برای مدل مسیریابی استفاده‌شده، موردبررسی قرارگرفته است. سپس زمان‌های اشغال گره‌ها و یا انسداد یال‌ها که به‌عنوان ورودی برای مدل جدول زمان‌بندی مورداستفاده قرار می‌گیرد، توصیف‌شده است. همچنین برنامه‌ریزی خطوط متروی تهران و داده‌های مرتبط با اشغال گره‌ها و مسیر ریلی با داده‌های ترافیکی متروی تهران انطباق کامل دارد. در گام بعدی محدودیت‌های جایگزین و اضافی مورد آزمون قرار می‌گیرد. این محدودیت‌ها می‌توانند از طریق کوچک نمودن منطقه موجه با هدف سرعت بخشیدن به یافتن نقطه بهینه در مدل و مدل‌سازی مجدد برای استفاده در

موارد مشابه، انشعاب و تحدید و اتصال گره‌ها در خطوط (یال‌های گراف)، انتقال‌های میان‌خطی نظیر اعزام قطار به خطوط دیگر و غیره ... در مدل لحاظ می‌شود. بنابراین در این قسمت به توصیفی اجمالی از ابزار شبیه‌سازی که باهدف اندازه‌گیری میزان موفقیت عملکرد برنامه‌ها و جداول مسیریابی مورداستفاده قرار می‌گیرد، می‌پردازیم.

۴-۲- برنامه‌ریزی خطوط ریلی در خط دوی متروی تهران

در فرایند برنامه‌ریزی خطوط ریلی، ۲۱ رام قطار در مسیر شرق به غرب اعزام می‌شوند که از دو پایانه انتهایی وارد شبکه شده و در صورت نیاز نیز قطارها از همین دو مسیر از خط خارج می‌شوند. علاوه بر این ۲۲ رام قطار در جهت غرب به شرق اعزام می‌شوند که از پایانه صادقیه وارد شبکه ریلی می‌شوند. بنابراین ۴۳ رام قطار در کل شبکه تردد می‌کنند. ۱۲ رام قطار دیگر نیز می‌توانند در ساعات اوج از طریق پایانه دردشت وارد مسیر شده و پس از به اتمام رسیدن ساعات اوج از خط خارج شوند. سه قطار از سمت صادقیه در حالت آماده قرار دارند و ۲ قطار در بخش تونل انتقالی میدان امام خمینی آماده اعزام هستند.

۴-۳- زمان‌های اشغال قطعات در خطوط ریلی

داده‌های مورداستفاده در مطالعه موردی برای محاسبه ی طول زمان اشغال خطوط ریلی از بانک اطلاعاتی خطوط متروی تهران استخراج‌شده و موردب ررسی قرار گرفته است. نتیجه این بررسی برای امکان‌سنجی تثبیت پارامترهای زمانی نظیر $d_{t,rt,w}^{res}$ و $d_{t,rt,w}^{rel}$ مورد استفاده قرار گرفته است

در مدل مزبور برای تنظیم جدول زمان‌بندی می‌توان با انتساب مقدار صحیح به پارامترهای زمانی $d_{t,rt,w}^{res}$ و $d_{t,rt,w}^{rel}$در هر قطعه از شبکه مترو، زمان‌های اشغال شدن هر یک از قطعات را به دست آورد. در اینجا دو محدودیت اندازه و پیچیدگی شبکه مترو مطرح است. زمان اشغال قطعات خطوط ریلی در مطالعه پاچل[7] و همکاران (۲۰۱۵) شامل زمان سیر، دریافت سیگنال حرکتی، سیر قطار به سمت قطعه ی پیش رو، پردازش عملیات، پاک‌سازی فرمان در مرکز کنترل ترافیک و در نهایت آزادسازی قطعه است که این مسئله نیز به نوع قطار، مسیری که قطار به آن تخصیص داده‌شده و بلاک تردد قطار بستگی دارد. زمان آزادسازی یک بلاک و نیز زمان اشغال قطعه بعدی با توجه به حاشیه‌های ایمنی خطوط عبارت است از زمانی که انتهای قطار از قطعه خارج و ابتدای آن وارد قطعه بعدی می‌شود که این مقدار برای مسیر ریلی متروی تهران به قطعات ۵۰ تا ۳۵۰ متری تقسیم‌شده و مقدار کاملاً یکسانی ندارند. با تقسیم طول هر بلاک از مسیر ریلی بر سرعت قطار و زمان خروج آن از قطعه، می‌توان با تقریب مناسبی زمان سیر و حرکت قطار را برآورد نمود. اگر قطار وارد قطعه ای شود و سکوی ایستگاه در آن قطعه ی خاص قرار داشته باشد و قطار بر روی سکو توقف نماید، حداقل زمان لازم برای سوار و پیاده شدن مسافران در مترو (از سی ثانیه تا دو دقیقه) به همراه قدری زمان اضافی برای توقف، شتاب ترمزی و شتاب حرکتی برای بازگشت به سقف سرعت مجاز، که می‌تواند تا حداکثر ۹/ دقیقه به این زمان افزوده شود.

[7] - Pachl

خبرگان متروی تهران در طول مصاحبه بر این مسئله اذعان داشته‌اند که دلیل سرعت متوسط نسبتاً پایین قطارهای مترو در منطقه ایستگاهی صادقیه، آن است که یک قطار غالباً به چندین مسافت ترمزی نیاز دارد. مقدار زمان اضافی با توجه به داده‌های مرکز کنترل ترافیک به نحوی تعیین می‌شود که با توجه به نوع قطار، جهت حرکتی، معماری و شیب و فراز ایستگاه تغییر نماید. مطالعه دیوایلد و همکاران (۲۰۱۳) با اضافه نمودن مقداری از مکمل‌های زمانی و نیز افزودن آن به جدول زمانی امکانی را ایجاد می‌نماید که با هر بار توقف بر روی سکو از طریق اضافه کردن زمان‌های مکمل، حداقل زمان توقف برای مسافر گیری بر روی سکو بیشتر شود. به‌علاوه، با لحاظ نمودن زمان اشغال مسیر در سرفاصله زمانی حرکت قطارها، زمان انسداد هر بلاک تا یک دقیقه طولانی‌تر می‌شود تا بتوان زمان سیر و حرکت قطار در قطعات مسیر را به‌طور دقیق‌تر محاسبه نمود. حال اگر قطار در یکی از قطعات و در محدوده گره از شبکه ریلی خارج شود زمان اشغال سکو با توجه به مانور تا چهار دقیقه نسبت به زمان آزادسازی سکو در حالت عادی اضافه می‌گردد. زمان پاک‌سازی ناحیه مزبور در پانل کنترل ترافیک با پارامتر زمانی ثابت و مستقل از سیر قطار برآورد می‌شود. از آنجائی که داده‌های موجود شامل اعدادی برای تنظیم زمان سیر و حرکت، رؤیت سیگنال توسط راهبر قطار، نزدیک شدن به قطعه و تغیر وضعیت سیگنال نیست لذا در مدل پیشنهادی از آن صرف‌نظر می‌شود. از طرفی با توجه به وجود ابهام و عدم قطعیت در داده‌ها نمی‌توان بدون لحاظ سطوح میکروسکوپی از دقت نسبی محاسبات در مطالعه موردی خط دوی متروی تهران اطمینان حاصل نمود بنابراین منطقاً می‌توان برنامه‌های مسیریابی را با جداول زمان‌بندی مقایسه نمود.

۵- بهبود مدل‌های مسیریابی و زمان‌بندی حرکت قطارها

۵-۱- محدودیت حفظ جریان سیر و حرکت قطار برای بهبود مدل مسیریابی

به‌عنوان ورودی برای مدل مسیریابی پیشنهادی؛ به ازای هر قطار، به مجموعه‌ای از یال‌ها (مسیرها) نیاز است که بتوانند گره‌ها و یا ورودی و خروجی سکوها را به هم متصل می‌نماید. از سوی دیگر برای هر یک از ترکیبات قطار و مسیر لازم است متغیری در مدل مزبور گنجانده شود و برای آن محدودیت‌هایی را برای هر گره از مسیر ریلی در نظر گرفت. این تحقیق برای کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی، شبکه ریلی متروی تهران را به چهار بخش برای تولید مسیر تقسیم می‌نماید. این بخش‌ها بر اساس مهم‌ترین گره‌های مسیر تعیین می‌شود. محققان مسیری از شبکه ریلی را که به ایستگاه متروی میدان امام محدودشده را مسیر جزئی می‌نامند. از طریق این تقسیم‌بندی می‌توان به‌طور قابل‌توجهی محدودیت‌های زائد را کاهش داد که درنتیجه با کاهش حجم محاسبات می‌توان مدت‌زمان معقولی را برای تمامی مسیرها فراهم کرد.

جدول شماره ۵) تعداد مسیرهای جزئی در بخش صادقیه – میدان امام در خط دوی مترو برای مسیرهای دوطرفه در جهت‌های شرق به غرب و غرب به شرق)

بخش صادقیه – میدان امام خط دوی متروی تهران	جنوب به شمال	شمال به جنوب
گره (جنوبی) در ایستگاه صادقیه	۳۲	۴۵
گره جنوبی ایستگاه صادقیه به سمت ایستگاه میدان امام خمینی	۷	۴
ایستگاه میدان امام خمینی	۶	۷
سکوی شمالی ایستگاه میدان امام خمینی به سمت صادقیه	۲۲	۲۰

بنابراین در مدل پیشنهادی، توالی زمانی مسیرهای جزئی برای هر قطار لازم است، به طور مستقل در الگو گنجانده شود. نتیجه آزمون‌ها نشان داد که گنجاندن چنین محدودیتی زمان ساخت مدل را کاهش داده و بنابراین زمان محاسبات تا ۰/۰۱ تقلیل یافت. بنابراین می‌توان برخی محدودیت‌های دیگر را نیز به مدل افزود که برخی از آن‌ها به شرح ادامه است. به‌عنوان‌مثال در شرایط ورود قطار به گره و یا خروج آن محدودیت زیر می‌تواند به مدل افزوده شود:

$$\sum_r x_{t,r} = 1 \qquad (۱۳)$$

ازآنجاکه srt و ert به ترتیب گره‌های مرزی موجود در خطوط ریلی برای مبادی ورود و خروج قطار t در شبکه ریلی هستند ازاین‌رو Rt,dep,W(Rt,arr,w) شامل تمامی مسیرهای فرعی است که از گره W در راستای حرکت قطار t هستند. محدودیت‌ها در نظر گرفته‌شده باهدف حفظ جریان هر قطار در مسیر ریلی لحاظ می‌شوند و این اطمینان را به وجود می‌آورند که قطار i دقیقاً به یک مسیر تخصیص یافته که از مرز محدوده گره ورودی مسیر حرکت قطار از مبدأ در جهت صحیح مسیردهی می‌شود و لذا محدودیت فوق‌الذکر یک مسیر فرعی تعیین‌شده برای رسیدن به گره خروجی از مسیر ریلی است. چنانچه قطاری در ناحیه ایستگاهی بدون آنکه در مرز محدوده ی گره شبکه ریلی توقف داشته باشد و به‌صورت برنامه‌ریزی نشده وارد سکوی فرضی P شود، در این صورت به ازای قطار t می‌توان به تعداد سکوهای P ، متغیرهای باینری در آن بخش از مدل گنجاند که در این حالت محدودیت زیر می‌تواند به ازای هر $\forall p \in P$ و $bin_{p,t} \in \{0, 1\}$, به شکل زیر به مدل اضافه گردد:

$$\sum_{p\in P} bin_{p,r} = 1 \qquad (۱۴)$$

بنابراین هر قطار دقیقاً از یک سکو در ناحیه ایستگاهی گره P به سیر و حرکت خود ادامه می‌دهد و در این حالت تنها یک مسیر به حرکت قطار t تخصیص داده می‌شود که مبدأ حرکت آن از سکو شروع می‌شود و درنهایت به یک سکو در مقصد می‌رسد. این مهم در حالی رخ می‌دهد که مقصد از قبل تعیین نشده باشد و لذا محدودیت‌های مزبور به این دلیل در مسئله آورده می‌شود. بر اساس خروجی‌های مدل مسیریابی و نیز طول زمان انسداد مسیر ریلی می‌توان کل زمان اشغال هر گره را در یک دوره از چرخه زمانی پیش از ایجاد و پیاده‌سازی جدول اصلی محاسبه نمود. بر این اساس و با استفاده از داده‌های موجود می‌توان برای مینیمم کردن زمان بافر، کران بالایی را در جدول زمان‌بندی برای آن در نظر گرفت. حداقل زمان بافر در جدول زمان‌بندی همواره از حاصل تقسیم حداکثر زمان عدم اشغال یک گره بر تعداد قطارهای عبوری از آن گره کمتر است. همچنین باید توجه داشت افزودن یک مقدار ثابت به زمان ورود و خروج قطار از گره برای دو جدول زمان‌بندی متفاوت؛ یکسان می‌باشد.

۵-۲- اجرای روش انشعاب - تحدید و استفاده مجدد از قطارها در مدل‌های مسیریابی و زمان‌بندی

چنانچه در یک سکو از منطقه ایستگاهی تقسیمات متناسبی بر اساس متغیر انشعاب صورت پذیرد در این حالت قسمت اول مسئله را برای قطار اصلی و قسمت دوم را برای قطار جدید می‌توان برنامه‌ریزی نمود که درنتیجه مسیر حرکت قطار از همان نقطه سکو که انشعاب در آن اتفاق افتاده، آغاز می‌گردد و هر یک از این دو قطار از آن لحظه به بعد برای قطار دیگر، یک خروجی محسوب می‌شود. بنابراین در صورت پیوستگی و اتصال میان گره‌ها، نخستین قطار به‌صورت برنامه‌ریزی‌شده به سکو می‌رسد و پس‌ازآن قطار دوم با رسیدن به سکو به‌عنوان تالی قطار قبلی به سیر خود ادامه می‌دهد. قطار جدید نیز سیر خود را از همان سکویی که قطار قبل مسیر حرکت خود را به اتمام رسانده، آغاز می‌نماید. انشعاب یا همان مکانی که قطار اصلی سفر خود را در مقصد حرکتی خود به پایان رسانده؛ می‌تواند برای استفاده مجدد، مبدأیی برای حرکت قطارهای جدید باشد. بنابراین برای هر تقسیم و استفاده مجدد از مسیر حرکتی، می‌توان محدودیت دیگری را به شرح زیر در مدل مسیریابی لحاظ نمود. بدان معنا که به ازای $\forall p \in P$ داریم:

$$bin_{p,r} = \sum_{r\in R_f} x_{t,r} \qquad (۱۵)$$

چنانچه t قطار اصلی باشد t′ قطار جدیدی است که پس از فرایند برنامه ریزی خط مجدداً وارد حلقه مسیر حرکتی می‌شود. از طرفی P سکوی توقف یا نقطه مبدأ حرکت قطار در منطقه ایستگاهی است که در آن فرایند تقسیم و یا استفاده مجدد در گره تعریف می‌شود لذا از متغیر $bin_{p,r}$ پیش از پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود اما دقیقاً نمی‌توان تعیین کرد قطار جدید از کدام گره و سکو سفر خود را در شبکه ریلی آغاز می‌نماید لذا برای ایجاد پیوستگی و اتصال در مسیر حرکتی دو قطار به یک گره، می‌توان محدودیت دیگری را به مسئله افزود که در آن t نخستین قطار ورودی و t′ دومین قطاری باشد که وارد می‌شود بنابراین در مدل‌سازی سیر و حرکت، این دو قطار به‌صورت متوالی به سیر خود ادامه می‌دهند. بنابراین بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از مدل اینفرابل (۲۰۱۳)، زمان برنامه‌ریزی‌شده برای آزادسازی سکو برای هر دو قطار موجود در یک قطعه خاص سه دقیقه می‌باشد که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$rel_{t;,p} = rel_{t,p} + 3 \qquad (۱۶)$$

در اینجا انشعاب در سکوی p از گره P پیش می‌آید. این گره قبلاً توسط مدل مسیریابی انتساب یافته است. در این تقسیم t قطار اصلی است و t′ قطار جدیدی است که در بازه زمانی بروز اعوجاج مسیر ریلی ایجاد و افزوده می‌شود. در این حالت برای اطمینان از عدم بروز بی‌نظمی در گره‌ها و انتظار بیش‌ازحد معمول مسافران، پیش از آنکه عملیات اتصال و انتقال (مانور) قطار t و قطار جدید صورت گیرد، می‌توان محدودیت فوق را برای دو قطار درگیر در فرایند مزبور مورداستفاده قرار داد. بنابراین با جایگزینی $rel_{t,p}$ با $res_{t,p}$ برای قطار t به‌عنوان نخستین قطاری که وارد مسیر می‌شود، t′ به‌عنوان دومین قطاری است که وارد مسیر می‌شود. همچنین در این مدل می‌توان عدد ۳ را با یک مقدار مناسب جایگزین نمود و محدودیت را توسعه داد. در ادامه به‌منظور جلوگیری از انتشار تأخیر و برنامه‌ریزی برای حرکت قطارهای دیگر موجود در مسیر، استفاده مجدد از قطار دوم برنامه‌ریزی می‌شود و این در حالی است که قطار دوم در آستانه رسیدن به سکو بوده و قطار قبلی همچنان سکو را ترک ننموده است لذا می‌توان محدودیتی به شرح زیر را در مدل زمان‌بندی لحاظ نمود:

$$0 \le \left(res^{aux}_{t".p} - rel^{aux}_{t.p} + P.resreal^{int}_{t,t".p}\right) - \left(res^{aux}_{t'.p} - rel^{aux}_{t.p} + P.resrel^{int}_{t,t'.p}\right) \le P \qquad (۱۷)$$

جایی که قطار t نخستین قطار باز استفاده‌شده باشد، t′ دومین قطار در استفاده مجدد برای مسیر ریلی و t″ سومین قطار می‌باشد که قرار است از همین سکو برای ورود به مسیر ریلی تردد نماید. وجود این محدودیت‌ها تضمین می‌نماید که قطار رزرو دوم برای استفاده مجدد در مسیر ریلی به زمان آزادسازی بلاک نسبت به زمان رزرو هر قطار دیگری، برای استفاده مجدد نزدیک‌تر است. این محدودیت‌ها تنها در صورتی از اعتبار برخوردارند که مقدار عددی شاخص t کوچک‌تر از t′ و t″ باشد و مقدار آن به علامت $resrelint_{t,t,p}$ و $resrelint_{t,t',p}$ بستگی دارد. ترتیب اولویت بر اساس شاخص‌های قطار در این حالت t، t′ و t″ است که این محدودیت‌ها می‌توانند برای سایر حالت‌های دیگر تغییر نماید و این بدان معنا است که بزرگی مقدار شاخص قطار t بزرگ‌تر از t′ اما از بزرگی مقدار شاخص قطار t″ و سایر قطارهای متوالی بعدی کوچک‌تر است.

۵-۳- جابجایی مسافری در مدل‌های مسیریابی و زمان‌بندی

به‌منظور تسهیل تبادل و جابجایی مسافران و تغذیه قطارهای واسط در ایستگاه‌های تبادلی، می‌توان برای سکوهای خاص در مدل مسیریابی نظیر سکوهای مجاور، برنامه‌ریزی نمود. بنابراین چنانچه فرض شود که p یک سکو در گره باشد که برای انتقال مسافری برنامه‌ریزی‌شده است و V_p به‌عنوان مجموعه‌ای از سکوها برای قطارهای واسط فرض شوند در این صورت با رسیدن قطار مسافری به سکوی p، تسهیل جابجایی مسافری برای ارتقای ظرفیت با اضافه کردن محدودیت زیر برای هر p صورت می‌گیرد:

$$\sum_{r \in R_{f,arr.p}} x_{t,r} = \sum_{r' \in \cup p' \in v_p R_{t',dep,p'}} x_{t',r'} \qquad (۱۸)$$

در اینجا قطار t تغذیه‌کننده و t′ قطار واسط است. علاوه بر این زمان جابجایی مسافران را می‌توان با افزودن محدودیت زیر به مدل تدقیق نمود:

$$L \leq rel^{aux}_{t'.p'} - res^{aux}_{t.p} + P.relres^{int}_{t,t'.p} \leq U \qquad (۱۹)$$

در اینجا t و t′ مجدداً به شبکه ریلی تزریق‌شده و به‌صورت متناوب به سیر خود ادامه می‌دهند. p و p′ نیز سکوهای فضای ایستگاهی هستند که در مدل مسیریابی به گره‌ها انتساب داده شده‌اند. در این مدل $reres^{int}_{t,t',p}$ یک متغیر عدد صحیح برای محاسبه این تناوب می‌باشد و L و U کران‌های بالا و پائین برای تعیین زمان جابجایی هستند. لازم به ذکر است در اینجا به تفاوت میان زمان آزادسازی مسیر و زمان رزرو آن توجه می‌شود و تفاوت ناشی از برخی محدودیت‌ها در نظر گرفته نمی‌شود لذا متغیرهایی مانند $resrel^{int}$ را نمی‌توان مستقیماً در مدل مورداستفاده قرار داد. از این رو متغیر دیگری نظیر $relres^{int}$ تعریف می‌شود. بنابراین می‌توان متغیر $resrel^{int}$ را به سایر متغیرها نظیر $relres^{int}$ نگاشت نمود. بااین‌حال استفاده از متغیرهای یادشده برای ساخت مدل ضروری نیست. همچنین می‌توان متغیر آزادسازی مسیر ریلی مانند rel^{aux} و متغیر ذخیره‌سازی مانند res^{aux} را با متغیرهای دیگری جایگزین نمود که زمان ورود و خروج قطار از/ به سکو را نشان دهد. ازاین‌رو لازم است محدودیتی در مدل گنجانده شود تا بتواند رابطه میان متغیرهای ورودی و خروجی و متغیرهای rel^{aux} و res^{aux} را نشان داده و با مقداردهی مناسب به L و U تغییر نماید.

۵-۴- شبیه‌سازی

آزمون جدول زمان‌بندی طراحی‌شده و برنامه‌های مسیریابی تعیین‌شده از طریق ابزارهای شبیه‌سازی در این بخش تشریح می‌گردد. در این مرحله از ابزار ارائه‌شده توسط دیویلد و همکاران (۲۰۱۴) استفاده می‌گردد زیرا شباهت محاسباتی از منظر پارامترهای زمانی برای شناسایی طول زمان اشغال و آزادسازی خطوط ریلی با نتایج و داده‌های مورداستفاده در تحقیق مزبور مطابقت دارد. در اینجا ابزار شبیه‌سازی می‌تواند ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی را با همان اسلوب پیاده‌سازی نماید. در هر مورداجرا، یک تأخیر برای ورود قطار به شبکه ریلی لحاظ می‌گردد که این مهم برای ۵۰ درصد قطارها از توزیع نمایی برخوردار بوده و میانگین آن در بازه زمانی صفر تا ۵ دقیقه‌ای ([۰ , ۵]) بر اساس سوابق داده‌ها و خروجی‌ها ابزارهای شبیه‌سازی تعیین می‌گردد.

۶- بحث و یافته‌ها

در این قسمت عملکرد مدل مسیریابی توسعه‌یافته و نیز مدل زمان‌بندی در مطالعه موردی متروی تهران موردبررسی قرار می‌گیرد. بنابراین در ابتدا نتایج مدل مسیریابی و سپس خروجی‌های مدل زمان‌بندی بر اساس شبیه‌سازی ارائه می‌شود. جدول شماره ۶ نتایج و خروجی‌های مدل مسیریابی را برای مقادیر مختلف از قطارهای اعزام‌شده در طول مسیر ریلی نشان می‌دهد. با توجه به آنکه گره پایه در این مطالعه ایستگاه صادقیه در نظر گرفته‌شده است که در آن نیمی از قطارها به سمت شرقی خط دوی متروی تهران و نیز نیم دیگر از ایستگاه صادقیه به سمت غربی در حال حرکت هستند لذا محاسبات و شبیه‌سازی‌ها در بهینه‌ساز نرم‌افزار GAMS با عنوان CPLEX انجام می‌شود.

در این مطالعه برای دو سطر نخست از شیوه‌ی مسیریابی به‌دست‌آمده از مطالعه اینفرابل و همکاران (۲۰۱۳) استفاده‌شده است. همچنین در ستون نخستین جدول به پرسش مربوط به اعمال برخی محدودیت‌ها برای تحقق تابع هدف، با استفاده از

اندازه‌گیری‌ها پاسخ‌داده‌شده است. ستون دوم نیز ناظر بر تعداد قطارهایی است که به یک مسیر خاص انتساب یافته است. در ستون سوم این جدول، زمان به‌دست‌آمده توسط محاسبات نرم‌افزار بهینه‌سازی در راستای معادلات و روابط ریاضی ساخته‌شده؛ آورده شده که مقدار آن با افزایش تعداد قطارها به‌سرعت زیاد می‌شود که برای تمامی قطارهای موردمطالعه قابل‌قبول است. بااین‌حال همچنان زمان به‌دست‌آمده برای حل مدل مسیریابی در ستون چهارم با افزایش تعداد قطارها زیاد می‌شود که پایداری آن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کوتاه است. این مقادیر برای حداکثر تعداد قطار مورداستفاده (۴۳ رام) برابر ۱۲ خواهد بود و با توپولوژی و هندسه خطوط متروی تهران قابل توضیح است زیرا ۱۲ رام قطار از طریق مرز محدوده گره‌ها وارد شبکه مترو می‌شوند لذا مشاهده می‌شود که مربع حاصل جمع استفاده از گره در ستون ششم با استفاده از روش پیشنهادی در مطالعه حاضر در مقایسه با شیوه اینفرابل بهبودی ۱۳/۱۳ درصدی را نشان می‌دهد. در سطر آخر نیز خروجی‌های مدل‌سازی با استفاده از محدودیت‌های رویکرد برگیو و همکاران (۲۰۱۵) به‌دست‌آمده که مشاهده می‌شود زمان طراحی هر دو مدل تقریباً یکسان است اما زمان لازم برای حل نهایی مدل به طرز چشمگیری متفاوت است زیرا مدل با لحاظ محدودیتی حتی تا سقف ۶ ساعت به حالت بهینه نمی‌رسد و این در حالی است که تابع هدف در مدل پژوهش حاضر با لحاظ چند ثانیه بافر قابل‌حل بوده و به مقدار بهینه می‌رسد.

جدول شماره ۷ نتایج استواری را برای گزینه‌های مدل مسیریابی پیشنهادی و نیز مدل زمان‌بندی نشان می‌دهد. در این حالت کوشیده شده خروجی‌های تابعی با نتایج یک جدول زمان‌بندی مرجع و نیز یک برنامه مسیریابی که به تأیید خبرگان متروی تهران رسیده و از تحقیق دیولید و همکاران (۲۰۱۴) گرفته‌شده، مقایسه گردد. در این مطالعه تلاش شد از طریق گنجاندن مقادیر متفاوت از مکمل‌های زمانی، آزمون‌هایی به ترتیب روبرو انجام شود: افزودن مقادیر زمانی ۰ ٪ ، ۲۵ ٪، ۴۱٪ و ۵۰٪ به‌عنوان مکمل‌های زمانی برابر جدول زمان‌بندی مرجع (دیولید و همکاران، ۲۰۱۴) که شامل زمان‌های توقف و حرکت قطار و نیز مکمل‌های زمانی (برای زمان توقف و حرکت غیر برنامه‌ریزی‌شده) با شبیه‌سازی جدول زمان‌بندی مرجع اینفرابل مقدار به‌دست‌آمده ۲۰۳ دقیقه بود. لازم به ذکر است که بدون لحاظ کردن مکمل‌های زمانی امکان جذب تأخیر وجود نخواهد داشت. در یکی از یافته‌های این مطالعه مشاهده شد که استفاده از مقدار ۴۱٪ برای مکمل‌های زمانی، مقدار کل زمان‌های بافر را تا حدود زیادی به مقادیر جدول زمان‌بندی مرجع اینفرابل و همکاران (۲۰۱۳) نزدیک می‌نماید. محاسبات در این بخش با استفاده از پردازنده و مقدار مناسبی از حافظه انجام شد. صرف‌نظر از تفاوت در زمان انجام محاسبات و مقدار حافظه موجود، تمامی اجزای برنامه جداول زمان‌بندی، با بهره‌گیری از یک طرح مسیریابی خود را به‌روز می‌نمایند اما مقدار زمان‌های مکمل به‌طور محسوس متفاوت است. در ستون شماره ۳ جدول زمان‌بندی (ستون بهبود) در مقایسه با جداول زمان‌بندی مرجع اینفرابل، شاهد بهبود استواری خدمات مسافری به میزان ۱۱/۴۲ درصد هستیم و این مقدار در مقایسه با کار میدانی دیولند و همکاران (۲۰۱۳) که در آن مقدار بهبود برابر ۹/۴۳ درصد است؛ بهتر می‌باشد. بااین‌حال هراندازه به مقادیر مکمل‌های زمانی توقف در ایستگاه‌ها افزوده شود قطارهای کمتری، قطعات شبکه مترو را با تأخیر ترک می‌نمایند (ستون تأخیر) و درنتیجه بهترین زمان ممکن برای بافرهای موقت حاصل می‌شود. پس از بهینه‌سازی در یک بازه زمانی سه‌ساعته (ستون حداقل زمان بافر)، زمان بهبودیافته و اعوجاج کمتر شده است. همچنین مشاهده می‌شود چنانچه مکملی در جداول زمان‌بندی در نظر گرفته نشود میزان استواری تا پایین‌ترین سطح

خود برای حرکت‌های مسافری تنزل می‌یابد. چنانچه مکمل‌های زمانی بیشتری به جدول افزوده شود میزان استواری درحرکت‌های مسافری بهبود می‌یابد. همچنین اگر تا ۵۰٪ مکمل‌های زمانی به توقف‌های قطار در ایستگاه‌های مترو تخصیص یابد، مشاهده می‌شود که وضع بدتر خواهد شد.

چنانچه میزان استواری در حرکات مسافری با افزودن مکمل‌های زمانی بیشتر؛ بهبود نیابد، تعادل میان مکمل‌های زمانی و زمان‌های بافر بی‌حاصل خواهد بود. مقدار اسمی ستون زمان سفر نشان می‌دهد که مدل مسیریابی در مطالعه حاضر با برنامه مسیریابی در مطالعه طاهری و همکاران (۲۰۲۰) و دیویلد و همکاران (۲۰۱۴)، علاوه بر انطباق در اهداف، از منظر زمان سیر در جدول زمان‌بندی حرکت قطارها نیز نسبتاً بهبودیافته تر است. این مقدار همان زمان اسمی است که درواقع زمان سفرِ برنامه‌ریزی‌شده بوده و در آن تفاوتی میان مؤلفه‌های زمان سیر و حرکت قطار در مسیر ریلی و یا توقف‌های قطار در ایستگاه‌ها و یا زمان شانت قطار، در نظر گرفته نشده است. چنانکه در جدول شماره ۵ نیز دیده شد بهترین زمان بافر به‌دست‌آمده برای سیر و حرکت قطارها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبودیافته و تعداد قطارهایی که با تأخیر گره‌های شبکه مترو را ترک می‌کنند به‌طور چشمگیری کاهش‌یافته است و این در حالی است که میزان استواری حرکت‌های مسافری در وضع بهتری قرار نگرفته است و توجیه آن این است که مدل‌های بهینه‌سازی به‌طورمعمول ظرفیت مسافری را در برنامه‌ریزی سیر و حرکت قطارها لحاظ نمی‌نمایند. تأثیر تأخیر بر میزان استواری اعزام‌های مسافری متناسب با زیادشدن حجم مسافری برای قطارهای دارای تأخیر افزایش می‌یابد.

ستون آخر جدول نیز تعداد بن‌بست‌ها که توسط ماژول شبیه‌سازی به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. این مهم نشان‌دهنده تعداد سناریوهایی ممکن است که مورداستفاده قرار نگرفته و قطارهای متوالی در پنجره زمانی به‌صورت برنامه‌ریزی‌شده در پی یکدیگر گره‌ها را طی نمی‌کنند که خود یک نقص برای ماژول شبیه‌سازی به شمار می‌آید زیرا نمی‌تواند وضعیت‌ها را به‌طور کامل پیش‌بینی و یا برحسب شرایط غیر برنامه‌ریزی‌شده، خطوط ریلی مدیریت نماید و صرفاً تکنیک‌های مرتبط با حل تداخل‌های مستقیم در جدول زمانبندی را لحاظ می‌نماید. بااین‌حال می‌توان اعداد به‌دست‌آمده را در جداول ۳ و ۵ را مورد مقایسه قرار داد و درنهایت آن را با جدول زمان‌بندی دیولید و همکاران (۲۰۲۰) مقایسه نمود. یافته‌ها نشان می‌دهند که می‌توان یک برنامه مسیریابی و جدول زمان‌بندی را از ابتدا طراحی و آن را بهتر از الگوریتم مسیریابی جدول مرجع دیولید و همکاران (۲۰۱۹) محاسبه نمود.

جدول شماره ۶) نتایج مدل مسیریابی پیشنهادی

تعداد قطارها	زمان ساخت	زمان ترکیب	$\text{Max } g_w$	$\sum w \in W\ g_w^2$	بهبود
۴۳	بر اساس رابطه اینرفرابل	بر اساس رابطه اینرفرابل	۸	۱۳/۲۳۴	–
۴۳			۸	۱۳/۲۰۵	۰/۲۳٪

تعداد قطارها	زمان ساخت	زمان ترکیب	Max g_w	$\sum w \in W\ g_w^2$	بهبود
	بر اساس رابطه دیوایلد	بر اساس رابطه دیوایلد			
۱۰	۴۴ ثانیه	۴ ثانیه	۳	۹۱۰	–
۴۰	۲۳۲ ثانیه	۷ ثانیه	۴	۳۱۲۳	–
۶۰	۶۰۷ ثانیه	۱۷ ثانیه	۶	۱۳/۱۹۸	–
۸۵	۱/۴۰۳ ثانیه	۲۶ ثانیه	۴	۱۱/۴۷۲	۱/۱۳٪–
۸۵	۱/۳۷۷ ثانیه	۶ ساعت <	۴	۱۱/۴۸۹	۱۳/۰۱٪–

جدول شماره ۷) نتایج مدل جدول زمان‌بندی

جدول زمان‌بندی	استواری مسافری (برحسب دقیقه)	میزان بهبود (برحسب درصد)	زمان مکمل (برحسب دقیقه)	زمان سفر اسمی ($۰/۱۰^۶$ دقیقه)	حداقل زمان بافر (برحسب ثانیه)	تأخیر (برحسب درصد)	زمان‌های وقفه
اینرفرابل دیوایلد	۲۸۸۵۰۴۹ ۲۶۱۲۹۰۶	– ۹/۴۳–	۵۰,۷۵	۱/۳۵	–	۶۰/۱۹ ۴۹/۱۷	۱ / ۶۸۷ ۵ / ۱۷۴
۱	۸۳۱۵۸۹	۷/۱۵+	۱۲,۶۸۷۵	۱/۳۵	–	۸۰/۸۱	۱۱۸۴۰,۲۵
۲	۶۸۲۹۸۱,۷۵	۲/۱۶–	۷,۳۷۵	۱/۳۴	۵	۵۹/۶۵	۶۸۰۷,۲۵
۳	۲۵۵۵۶۶۸	۱۱/۴۲–	۱۲,۸۷۵	۱/۳۴	۴	۴۲/۹۹	۱۶۹۹
۴	۲۷۷۵۱۴۷	۳/۸۱–	۱۴,۱۲۵	۱/۳۴	۱	۴۶/۰۱	۱۲۲۶۴
۵	۲۶۳۰۳۳۳	۸/۸۳–	۱۲,۸۷۵	۱/۳۴	۰	۴۱/۸۳	۱۱۷۴

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه کوشیده شد مدلی برای مسیریابی و زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در متروی نهران بدون تداخل و ایجاد تناقض با بسترها ایجاد ارائه گردد به‌طوری‌که میزان استواری حرکات مسافری و جداول زمان‌بندی را با توجه به زیرساخت‌های موجود در مناطق مختلف خطوط مترو و شرایط پیچیده ناشی از اعوجاج پوشش دهد. در این مدل برنامه‌ریزی خطوط برای کل شبکه مترو به‌عنوان ورودی لحاظ می‌گردد. همچنین جداول زمان‌بندی برای شرایط تنگنا می‌تواند به‌عنوان نقطه آغازین طراحی جدول زمان‌بندی استوار برای شبکه مترو مطرح باشد. غالب تمرکز چنین مدل‌هایی بر استفاده بهینه از زیرساخت‌ها در مناطق حساس خطوط ریلی نظیر سوزن‌ها و دیگر شرایط و نیز تسهیل جریان ترافیک در طول زمان سفر است به گونه ای که زمان سیر قطارهای مسافری در شبکه مترو بهینه گردد. مدل‌های مزبور از طریق طراحی و استقرار یک برنامه مسیریابی و جدول زمان‌بندی استوار برای مناطق ایستگاهی در مطالعه موردی متروی صادقیه به سمت ایستگاه مرکزی امام خمینی با الگوهای ارائه‌شده در تحقیقات پیشین مقایسه و مورد تأیید قرار گرفت. علاوه بر این عملکرد این جداول زمانی و نیز برنامه‌های مسیریابی با جداول و برنامه‌های مسیریابی مرجع که توسط پاچل و همکاران (۲۰۱۵) در حمل‌ونقل ریلی بلژیک و نیز دیولید و همکاران (۲۰۱۴) ارائه گردیده، مقایسه شد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که به میزان قابل‌توجهی و تا حدود ۱۳٪ ترافیک گره‌ها و همچنین اعوجاجات ناشی از مشکلات خطوط کاهش‌یافته است و از دیگر سو با استفاده از شبیه‌سازی برنامه مسیریابی و جدول زمانی پیشنهادی و نتایج حاصل از آن در این رویکرد تا حدود ۱۱ درصد استواری حرکات مسافری در طرح مسیریابی در مقایسه با جداول زمانی و برنامه مسیریابی مرجع که توسط پاچل ارائه‌شده است، بهبودیافته است و از طرفی نیز در مقایسه با مدل دیویلد و همکاران تا حدود ۲ درصد بهتر شده است. دراین‌بین نخستین پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی، گنجاندن مکمل‌های زمانی در جداول زمان‌بندی طرح ریزی شده است که باهدف افزایش راندمان از طریق حداکثرسازی زمان‌های بافر صورت می‌گیرد. مکمل‌های زمانی در نظر گرفته‌شده در جداول زمان‌بندی عمدتاً برای افزایش زمان بافر و نه لزوماً جلوگیری از انتشار تأخیر مفید هستند. بااین‌حال ارائه یک مدل دقیق که بتواند در یک‌زمان معقول جداول پیچیده زمانی را در ایستگاه‌های مترو پشتیبانی نماید، یک چالش عمده در مطالعات پیش رو محسوب می‌شود. لحاظ نمودن ظرفیت مسافری در مدل‌های بهینه‌سازی، ایده دیگری برای تحقیقات آتی محسوب می‌شود که می‌تواند میران استواری حرکات مسافری را بهبود بخشد.

برخی پیشنهادها برای عملکرد بهتر سیستم متروی تهران در مسیریابی و مدل سازی سیر و حرکت می‌تواند به شرح زیر مطرح شود:

استفاده ترکیبی از مدل جداول زمان‌بندی و مدل مسیریابی با توجه به برنامه‌ریزی خطی با انتساب ناوگان قطارها به خطوط و نیز استفاده از زمان‌های بافر در شرایط انسداد هر خط به‌منظور کاهش امکان بروز تداخل در شبکه ریلی، افزایش سطح استواری حرکات مسافری در شرایط اوج مسافری ایستگاه‌ها و سکوهای مترو از طریق تخصیص زمان‌های بافر کوتاه به‌منظور ایجاد سهولت در سوار و پیاده شدن مسافران و عدم بروز تضاد در جداول زمان‌بندی و جلوگیری از تأخیر در حرکت قطارها، ایجاد برنامه‌های زمان‌بندی دقیق و انعطاف‌پذیر بر اساس توصیه‌های خبرگان و محاسبات دقیق رایانه‌ای با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته، بررسی هدفمند مسائل جداول زمان‌بندی و مقایسه دقیق طرح‌های پیشنهادی برای مرتفع نمودن مسائل

ترافیکی، حذف و یا جایگزینی قطارهای سریع‌السیر به‌ویژه در خط پنج متروی تهارن با قطارهای هوشمند، استفاده از قطارها رزرو و پشتیبان، تفکیک مسیرهای اصلی و فرعی متروی تهران باهدف شناسایی گلوگاه‌ها و تنگناها در تقاطع‌ها و گره‌های مسیر ریلی، انتساب صحیح و انعطاف پذیر قطارها به گره‌ها به‌منظور تسهیل در تعویض خطوط در صورت لزوم، استفاده از ساختارهای میکروسکوپی و مایکروسکوپی برای تقسیم صحیح قطارها با روش‌های انشعاب و تحدید، شبیه‌سازی و مقایسه زمان واکنش شبیه‌ساز به حالات و شرایط مختلف خطوط و استفاده از مدل‌های متنوع و مناسب با وضعیت‌های ترافیکی خطوط متروی تهران به‌منظور جلوگیری از همپوشانی و تضاد اعزام‌های مسافری، بررسی موضوعی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های دقیق و غیره ... می‌تواند بخشی از پیشنهادهای برآمده از مطالعه حاضر برای بهبود شرایط ترافیکی متروی تهران باشد.

۸- منابع

[1] Andersson, Emma V., Anders Peterson, and Johanna Törnquist Krasemann. "Quantifying railway timetable robustness in critical points." *Journal of Rail Transport Planning & Management* 3, no. 3 (2019): 95-110.

[2] Bešinovi, N., Egidio Quaglietta, and Rob MP Goverde. "Supporting tools for automated timetable planning." *WIT Transactions on the Built Environment* 135 (2017): 565-576.

[3] Burggraeve, Sofie, Sofie Van Thielen, and Pieter Vansteenwegen. "Advanced methods for improving passenger robustness in railway systems." In *Conference on Advanced Systems in Public Transport, Date: 2015/07/19-2015/07/23, Location: Rotterdam*. 2019.

[4] Cacchiani, Valentina, and Paolo Toth. "Nominal and robust train timetabling problems." *European Journal of Operational Research* 219, no. 3 (2016): 727-737.

[5] Korotin, Vladimir, Victor Popov, Andrey Tolokonsky, Rustam Islamov, and Arseniy Ulchenkov. "A multi-criteria approach to selecting an optimal portfolio of refinery upgrade projects under margin and tax regime uncertainty." *Omega* 72, no. C (2017): 50-58.

[6] Caimi, Gabrio, Fabian Chudak, Martin Fuchsberger, Marco Laumanns, and Rico Zenklusen. "A new resource-constrained multicommodity flow model for conflict-free train routing and scheduling." *Transportation science* 45, no. 2 (2017): 212-227.

[7] Dewilde, Thijs, Peter Sels, Dirk Cattrysse, and Pieter Vansteenwegen. "Defining robustness of a railway timetable." In *Proceedings of 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (IAROR): RailRome2011*, pp. 1-20. 2014.

[8] Dewilde, Thijs, Peter Sels, Dirk Cattrysse, and Pieter Vansteenwegen. "Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming." *Journal of Rail Transport Planning & Management* 3, no. 3 (2019): 68-77.

[9] Fischetti, Matteo, Domenico Salvagnin, and Arrigo Zanette. "Fast approaches to improve the robustness of a railway timetable." *Transportation Science* 43, no. 3 (2009): 321-335.

[10] Goldratt, Eliyahu M., Jeff Cox, and D. Whitford. "A process of ongoing improvement." *Journal of Manufacturing Technology Management* 16, no. 3 (2007): 302.

[11] Goverde, Rob MP, Nikola Bešinović, Anne Binder, Valentina Cacchiani, Egidio Quaglietta, Roberto Roberti, and Paolo Toth. "A three-level framework for performance-based railway timetabling." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 67 (2021): 62-83.

[12] Kroon, Leo, Dennis Huisman, Erwin Abbink, Pieter-Jan Fioole, Matteo Fischetti, Gábor Maróti, Alexander Schrijver, Adri Steenbeek, and Roelof Ybema. "The new Dutch timetable: The OR revolution." *Interfaces* 39, no. 1 (2010): 6-17.

[13] Zwaneveld, Peter J., Leo G. Kroon, and Stan PM Van Hoesel. "Routing trains through a railway station based on a node packing model." *European Journal of Operational Research* 128, no. 1 (2011): 14-33.

[14] Sun, Yahua, Chengxuan Cao, and Chao Wu. "Multi-objective optimization of train routing problem combined with train scheduling on a high-speed railway network." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 44 (2014): 1-20.

[15] Lusby, Richard, Jesper Larsen, David Ryan, and Matthias Ehrgott. "Routing trains through railway junctions: a new set-packing approach." *Transportation Science* 45, no. 2 (2013): 228-245.

[16] Serafini, Paolo, and Walter Ukovich. "A mathematical model for periodic scheduling problems." *SIAM Journal on Discrete Mathematics* 2, no. 4 (1989): 550-581.

[17] Kroon, Leo, Gábor Maróti, Mathijn Retel Helmrich, Michiel Vromans, and Rommert Dekker. "Stochastic improvement of cyclic railway timetables." *Transportation Research Part B: Methodological* 42, no. 6 (2008): 553-570.

[18] Schmidt, Marie, and Anita Schöbel. "Timetabling with passenger routing." *OR spectrum* 37, no. 1 (2018): 75-97.

[19] Taheri, Mohammad Hasan, Nematollah Askari, and Mohammad Hadi Mahdavi. "Prediction of entrance length for magnetohydrodynamics channels flow using numerical simulation and artificial neural network." *Journal of Applied and Computational Mechanics* 6, no. 3 (2020): 582-592.

[20] Caimi, Gabrio C. *Algorithmic decision suport for train scheduling in a large and highly utilised railway network*. ETH Zurich, 2016.

[21] Dewilde, Thijs, Peter Sels, Dirk Cattrysse, and Pieter Vansteenwegen. "Improving the robustness in railway station areas." *European Journal of Operational Research* 235, no. 1 (2020): 276-286.

[22] Gašparík, Jozef, Borna Abramović, and Martin Halás. "New graphical approach to railway infrastructure capacity analysis." *Promet-Traffic&Transportation* 27, no. 4 (2018): 283-290.

[23] Sels, Peter. "Large-scale, passenger oriented, cyclic railway timetabling and station platforming and routing." (2019).

[24] Sels, Peter, Thijs Dewilde, Dirk Cattrysse, and Pieter Vansteenwegen. "Reducing the passenger travel time in practice by the automated construction of a robust railway timetable." *Transportation Research Part B: Methodological* 84 (2019): 124-156.

[25] Schlechte, Thomas, Ralf Borndörfer, Berkan Erol, Thomas Graffagnino, and Elmar Swarat. "Micro–macro transformation of railway networks." *Journal of Rail Transport Planning & Management* 1, no. 1 (2014): 38-48.

[26] Pachl, Jörn. "Timetable design principles." *Railway Timetable & Traffic* 1 (2015): 9-42.

[27] Burggraeve, Sofie, Thijs Dewilde, Peter Sels, and Pieter Vansteenwegen. "Improving passenger robustness by taking passenger numbers and recurring delays explicitly into account on the tactical level." In *Proceedings of 6th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (IAROR): RailTokyo2015*, pp. 1-15. 2018.

[28] Bešinović, Nikola, Rob MP Goverde, Egidio Quaglietta, and Roberto Roberti. "An integrated micro–macro approach to robust railway timetabling." *Transportation Research Part B: Methodological* 87 (2020): 14-32.

[29] Sels, Peter, Pieter Vansteenwegen, Thijs Dewilde, Dirk Cattrysse, Bertrand Waquet, and Antoine Joubert. "The train platforming problem: The infrastructure management company perspective." *Transportation Research Part B: Methodological* 61 (2014): 55-72.

[30] Kroon, L., Dorothea Wagner, Frank Geraets, and Christos Zaroliagis. "Algorithmic Methods for Railway Optimization." *Lecture Notes in Computer Science* 4395 (2010): 67-89