

## طراحی مدلی پایدار برای مسئله زمان‌بندی قطارهای متروی تهران با رویکرد بهینه‌سازی استوار

### چکیده

در این تحقیق، هدف ارائه یک الگوی بهینه برای مسئله زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری در مطالعه موردی متروی تهران بود لذا کوشیده شد یک رهیافت جدید بر مبنای اصول و مفاهیم استواری برای حل مسئله جداول زمان‌بندی قطارهای متروی تهران در شرایط عدم قطعیت و بروز اعوجاج با استفاده از رهیافت‌های شبیه‌سازی از طریق لحاظ نمودن زمان‌های بافر و حداقل سرفاصله زمانی حرکت قطارها ارائه گردد. بنابراین به دست آوردن سرفاصله‌های بهینه از طریق استقرار زمان‌های بافر در جداول زمان‌بندی خطوط متروی تهران در رویکرد برنامه‌ریزی خطی طوری دنبال گردیده که بتوان میانگین مدت‌زمان انتظار در سکوهای مسافری و سرفاصله زمانی قطارها را در مسیر ریلی حداقل نموده و نرخ تردد قطارها در خطوط ریلی را حداکثر کرد. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل عمومی برنامه‌ریزی خطی پس از تعیین تابع هدف و محدودیت‌های مرتبط از قبیل زمان‌های توقف قطارها در ایستگاه‌ها (گره‌ها) و طول مسیر (یال‌ها)، ظرفیت ایستگاه‌های مترو و رعایت حاشیه‌های ایمنی با توجه به شرایط کلی شبکه ریلی، از طریق لحاظ کردن زمان بافر و تکنیک‌های شبیه‌سازی در مورد کاوی ایستگاه متروی شاهد کوشیده نقاط بهینه شناسایی و در طراحی تابلوی نهایی زمان‌بندی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق همچنین فرض بر آن بود که پارامترهای مدل تصمیم‌گیری نظیر نرخ ورود مسافری به ایستگاه‌ها و زمان طی قطعات توسط ناوگان قطارها غیرقطعی باشد. در پایان نیز اعتبار مدل پیشنهادی از طریق داده‌های به‌دست‌آمده از نیمه جنوبی خط یک متروی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به‌دست‌آمده از آن ارائه شده است.

### واژگان کلیدی

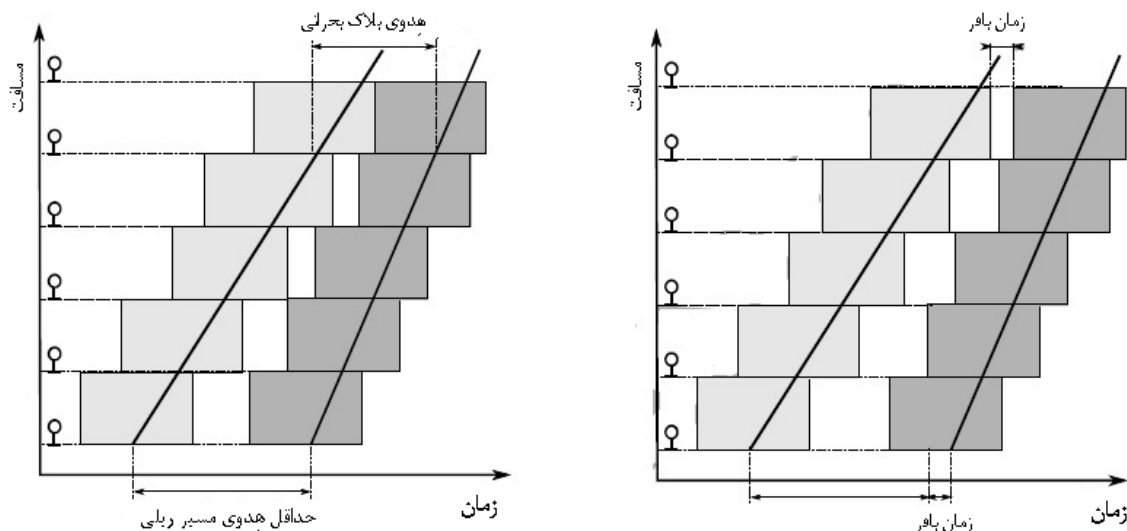
بهینه‌سازی استوار، مسئله جداول زمان‌بندی، ناوگان قطارها، متروی تهران

### ۱- مقدمه

قابلیت اطمینان و وقت‌شناسی در نظام ترافیک شبکه ریلی درون‌شهری از جمله شاخص‌های کلیدی موفقیت به شمار می‌روند که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی حرکات مسافری داشته باشد [۱]. در شبکه ریلی درون‌شهری (مترو)، سیر و حرکت قطارها بر اساس یک جدول زمان‌بندی از پیش تعیین‌شده انجام می‌گیرد که خود شامل مؤلفه‌هایی نظیر زمان اعزام و دریافت قطارها در ایستگاه‌ها (گره‌ها)ی طول مسیر و نیز مقاصد قطارها است که برای حرکت قطارها در یک جدول زمان‌بندی مدون، دنباله‌ای از زمان‌های حرکت و توقف در قطعات ریلی به شمار می‌رود [۲]. در این بین محدودیت اصلی برنامه‌ریزی ترافیک، ضرورت تفکیک فضایی قطارهایی را که در یک زیرساخت یکسان (نظیر قطعات بین دو سیگنال) حرکت می‌کنند تا ضمن حفظ فاصله ایمنی از بروز تصادم میان وسایل نقلیه ریلی ممانعت نماید [۲]. در مدیریت عملیات خطوط ریلی وظیفه حفظ فاصله ایمنی توسط سیستم‌های کنترل و سیگنالینگ انجام می‌گیرد که علاوه بر انجام وظیفه نظارتی در فرایند سیر و حرکت قطارها، سبب کاهش ترمزهای غیرضروری و شتاب‌گیری‌های مکرر قطار در مسیرهای متضاد و نظایر آن می‌شود بنابراین در یک جدول زمان‌بندی دینامیک لازم است تفکیک قطارها با حداقل سرفاصله زمانی امکان‌پذیر شود. حداقل سرفاصله میان قطارها با توجه به اصول توسعه‌ی میکروسکوپی از طریق نظریه توالی عملیات و زمان‌بندی محاسبه و به زمان‌های تردد قطار در مسیر ریلی افزوده می‌شود [۳].

گاهی بروز تغییرات اجتناب‌ناپذیر در بازه زمانی فرایند سیر و حرکت قطارها، ممکن است باعث بروز تأخیر یا انحراف از برنامه زمان‌بندی تعیین‌شده، گردد که در نتیجه اجرای دقیق جدول زمانی از پیش طراحی‌شده را تقریباً ناممکن می‌سازد. علاوه بر آن در شبکه‌های ریلی شلوغ و پرتردد اثر تأخیر یک قطار در یک خط به ناوگان قطارهایی که در سایر خطوط دارای زیرساخت مشابه بوده و برنامه زمان‌بندی آن‌ها برای جابجایی مسافر به صورت پیوسته با آن خط برای خدمه و قطارها تنظیم‌شده است؛ انتقال می‌یابد [۴]. از رو محققان به منظور ارتقای سطح استواری شبکه ریلی و برای جلوگیری از انتشار تأخیر در فرایند سیر و حرکت قطارها، زمانی را به‌عنوان بافر در سرفاصله زمانی (هدوی) به صورت تصاعدی لحاظ می‌نمایند. استفاده از زمان‌های بافر (میانگیر) به‌عنوان یک گزینه مطلوب می‌تواند در فاز بازیابی جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در شبکه مترو استفاده شود به طوری که از طریق جذب تأخیرها سبب جلوگیری از تجمیع و انتشار آثار آن در کل شبکه گردد [۵].

تصویر شماره یک نشان می‌دهد که چگونه زمان‌های بافر بین فواصل زمانی سیر و حرکت قطارها درج و اضافه می‌شود. هدف از به‌کارگیری زمان بافر (میانگیر) جذب اختلالات و انحراف‌های زمانی قطار از جدول زمان‌بندی اولیه تنظیم‌شده و جلوگیری از انتشار تأخیر به قطارهای بعدی است که به صورت متوالی در مسیر ریلی در حرکت هستند [۶].



تصویر شماره ۱) نمودار سمت چپ تصویر، نشان‌دهنده سیر و حرکت قطارها با حداقل سرفاصله (هدوی) ممکن است؛ نمودار سمت راست تصویر، نشان‌دهنده زمان سیر قطارها به انضمام بافر اضافه‌شده به جدول زمان‌بندی است (منبع: خان محمدی و همکاران، ۱۳۹۲).

افزایش تقاضای روزافزون برای استفاده از مترو در مسافرت‌های درون‌شهری ضرورت بهینه‌سازی آن برای پاسخگویی مطمئن و ایمن به نیازها در بازه‌های زمانی مختلف و مقابله با تأخیرهای احتمالی در تردد قطارها را آشکار ساخته است [۸]. پیچیدگی‌های زمانی بالا در الگوهای ارتقا و توسعه جداول زمان‌بندی حرکت قطارها یک بارقه‌ی مهم برای حصول مدل‌های استوار است که بتوان از طریق آن بهبود ساختار جداول زمانی<sup>۱</sup> و روند تحلیل داده‌های تاریخی ترافیکی مسیر را برای یافتن گوشه‌های بهینه دنبال نمود. بنابراین در صورت بروز هرگونه خطا در ناوگان قطارها و زیرساخت‌های ریلی مرتبط با آنکه منجر به انحراف از جدول زمان‌بندی شده

<sup>1</sup> - Time tables

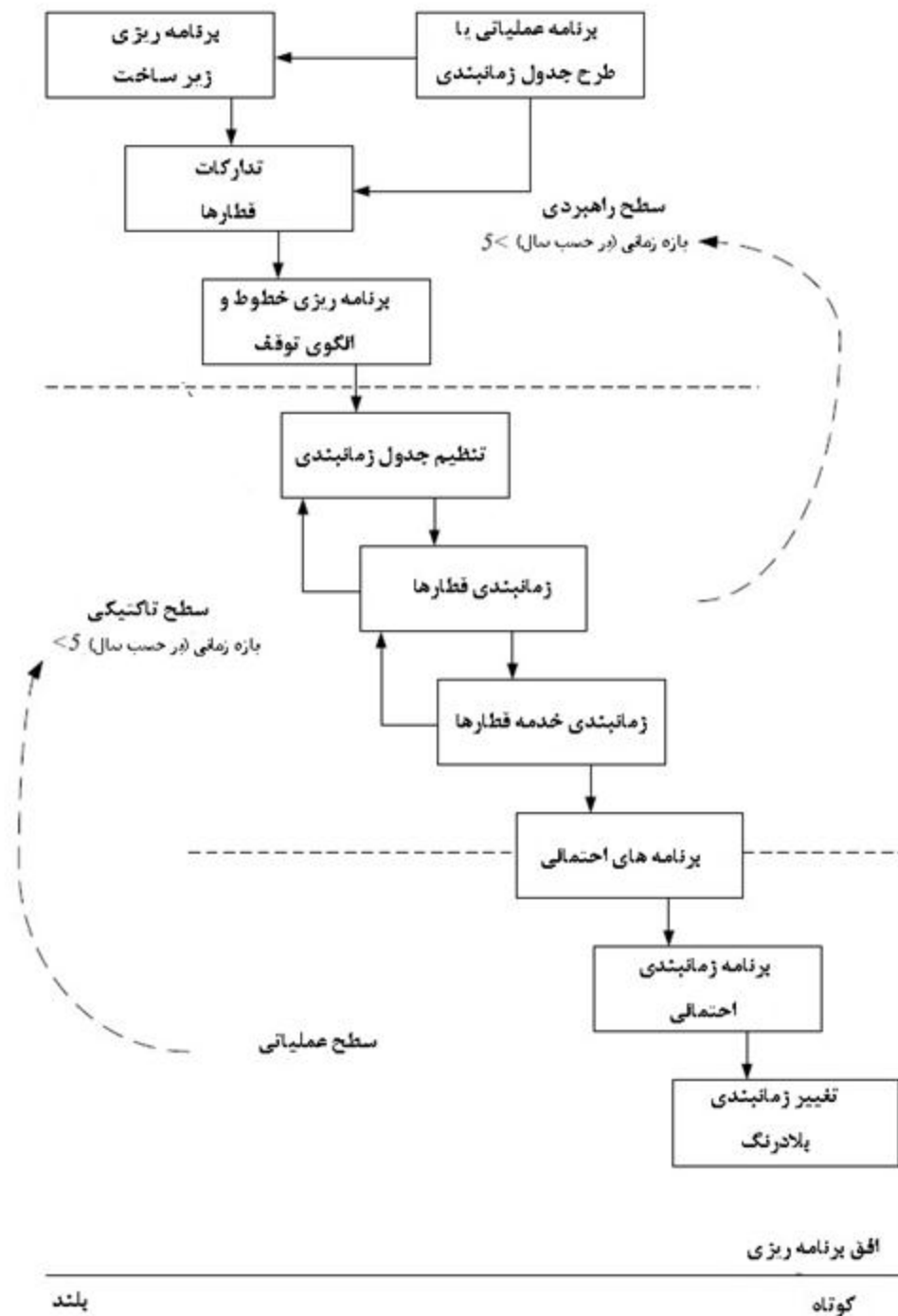
و بروز تأخیرهای اولیه در یکی از قطعات شبکه مترو را سبب شود، بهره‌گیری از زمان بافر برای پایداری برنامه زمان‌بندی از پیش طرح‌ریزی شده ضرورت می‌یابد [۹]. با این حال رهیافت استفاده از زمان‌های بافر احتمال طولانی شدن زمان سفر و عدم استفاده کامل از ظرفیت ناوگان قطارها و ایستگاه‌ها را افزایش می‌دهد به علاوه وجود زمان‌های اضافی در جدول زمانی خود نشان‌دهنده از دست رفتن مستقیم و غیرمستقیم بخشی از منابع موجود در شبکه است. لذا استفاده از زمان‌های بافر می‌تواند یک مؤلفه‌ی نامطلوب در برنامه‌ریزی تاکتیکی طراحی جداول زمان‌بندی باشد [۱۰]. برای هر دنباله‌ی معین از قطارها در شبکه مترو، وقفه‌های زمانی لحاظ شده در برنامه زمان‌بندی را می‌توان به‌عنوان باقی‌مانده‌ی فرایند طرح‌ریزی پس از انجام محاسبات فشرده‌سازی، تدقیق نموده و به‌عنوان یک بافر زمانی ذخیره‌شده در بانک‌های اطلاعاتی مسیرهای مترو برای مقابله با اعوجاج‌های احتمالی جداول استفاده نمود [۱۱]. حال با توجه به آنکه حل مسائل برنامه‌ریزی سیر و حرکت قطارها در شبکه مترو در زمره‌ی تصمیمات راهبردی به شمار می‌آید لذا بهره‌گیری از شیوه‌های مرسوم «پژوهش عملیاتی» نظیر رویکردهای برنامه‌ریزی خطی می‌تواند در شناسایی گوشه‌های بهینه‌ی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه مترو مؤثر باشد [۱۲]. از این طریق کاهش سرفاصله‌های زمانی حرکت قطارها برای افزایش ظرفیت حمل مسافر (در هر ساعت و هر جهت) با لحاظ مقدار معینی از بافرهای زمانی که توسط کنترلر ترافیک تعیین می‌شود، عمدتاً به‌گونه‌ای در جداول قرار می‌گیرد که تأثیرات اغتشاش‌های خط بر طرح اولیه جدول اسمی را حداقل نماید. مطالعه ادبیات موضوع نشان می‌دهد که رویکردهای استوار بر تعادل میان کارایی شبکه و استحکام جداول در برابر اغتشاش‌های احتمالی ناوگان و مسیر ریلی تمرکز داشته و بهینه‌سازی ستاده‌های جداول زمان‌بندی را از طریق تولید راهکردهای کنترلی به‌منظور مواجهه با پیچیدگی‌های زمانی کنش‌های ترافیک در سیر و اعزام قطارها فراهم می‌نماید از این‌رو در مطالعه حاضر محققان به‌منظور ارتقای استواری در جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها مقادیر ثابتی با عنوان زمان بافر را بسته به نوع قطار، شرایط خط و تضادهای احتمالی شبکه با استفاده از رهیافت‌های ریاضی ارائه نموده‌اند. در تحقیق استفاده از رویکرد استواری برای نیل به دو حالت خاص مورد استفاده قرار گرفته است؛ **نخست:** تعیین چارچوب‌ها و خط‌مشی‌های بهبود فرایند زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها؛ **دوم:** بررسی آثار و نتایج پیاده‌سازی رویکردهای استوار در برنامه‌ریزی جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای مترو. از این‌رو یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این پژوهش وجود نوآوری و متمایز بودن در حوزه‌های متدولوژی، قلمرو جغرافیایی و زمانی در صنعت متروی کشور است که با توجه به نبود نمونه مشابه در شبکه‌های متروی ایران و نیز نوین بودن صنعت مترو نسبت به سایر شقوق حمل‌ونقل عمومی آن را به شکلی برجسته‌ای از سایر مطالعات متمایز نموده است. با این حال به‌طور مشخص یکی از جنبه‌های خاص تازگی در این تحقیق که آن را ویژه نموده لحاظ نمودن پارامتر ظرفیت و تعارض خطوط ریلی است.

در طی سال‌های اخیر حل مسائل برنامه‌ریزی زمانی در مترو از طریق مدل‌های استوار برای ارتقای کیفیت کنترل‌های ترافیکی توجه جدی بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است. استواری در این معنا ناظر بر ارتقای ظرفیت‌های سامانه‌های ریلی برای جذب تبعات ناشی از تأخیرها و یا مقاوم بودن در برابر اغتشاش‌های برنامه‌ریزی نشده ناوگان و مسیر ریلی است [۱۳]. استفاده از مدل‌های استواری می‌تواند امکان اتخاذ عکس‌العمل‌های مناسب در انحراف‌های مرتبط با برنامه‌ریزی زمان‌بندی حرکت قطارها را از طریق ارائه ابزارهای مناسب به‌منظور ارتقای سطح قابلیت اطمینان و استمرار عملیات شبکه ریلی در شرایط بحران را ایجاد نماید. حال با توجه به روند رشد کمی جمعیت کلان‌شهر تهران و افزایش تقاضای شهروندان برای استفاده از خدمات پایدار حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری (مترو)، پرسش اصلی تحقیق حاضر آن است که چه الگویی را می‌توان برای استواری جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در شبکه متروی تهران، طراحی و ارائه نمود؟ با این تفصیل هدف اصلی تحقیق حاضر طراحی و تبیین مدلی برای برنامه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها در خطوط متروی تهران به‌گونه‌ای است که با استفاده از اصول استواری بازگشت به شرایط نرمال را پس از بروز اغتشاش در ناوگان قطارها یا مسیر ریلی امکان‌پذیر نماید.

## ۲- مبانی نظری

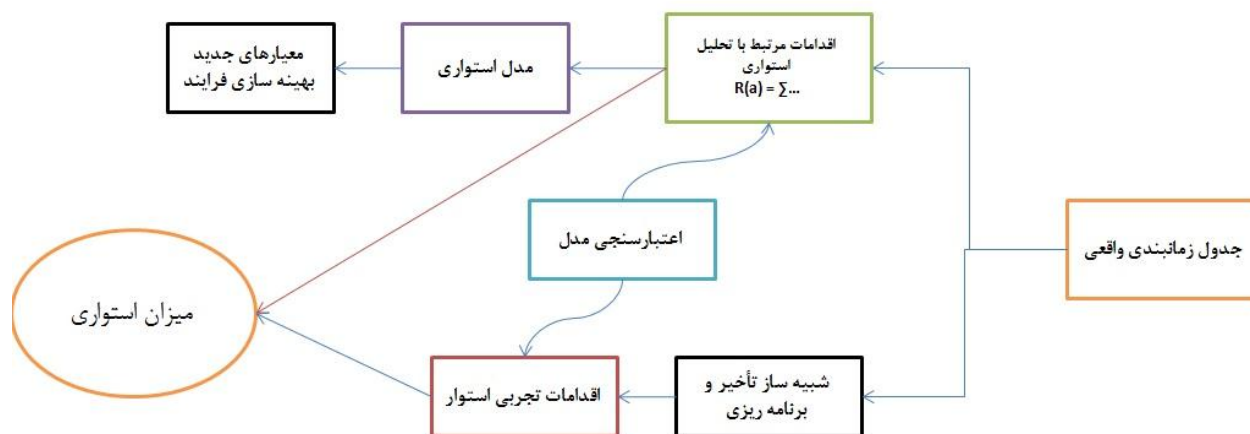
برنامه‌ریزی سیر و حرکت قطارها در کنترل ترافیک شبکه مترو به‌طور معمول در طرح اولیه خود به‌صورت یک جدول زمان‌بندی سالانه تنظیم‌شده و سپس مبنای سایر کارکردهای تابعی در بخش‌های مختلف مترو برای سطوح وظیفه‌ای کاربران سامانه‌های ترافیک و تصمیم‌گیران قرار می‌گیرد و می‌تواند متناسب با شرایط و مناسبت‌های فصلی یا رویدادهای هفتگی به‌صورت روزانه تغییر یافته و بر اساس میزان تقاضای مسافری شبکه بازتولید شود [۱۴]. بنابراین بهینه‌سازی اعزام و دریافت‌های متوالی قطارها در شبکه ریلی می‌تواند با هدف بهبود زمان سیر، کاهش سرفاصله زمانی حرکت قطارها (هدوی<sup>۱</sup>) و مدیریت اصولی تردد قطارها به‌ویژه در مواقع بروز اغتشاش<sup>۲</sup> از طریق جداول زمانی دوره‌ای در محاسبات ترافیکی شبکه، طوری لحاظ گردد که امکان پوشش تقاضاهای برنامه‌ریزی نشده مسافری در سطح قابل قبولی از استواری بر اساس شرایط ترافیکی به‌گونه‌ای متناسب فراهم شود [۱۵]. در رویکردهای مرسوم از طریق تخصیص مقدار معینی از بافرهای زمانی<sup>۳</sup> کوشیده می‌شود استواری برنامه‌های زمان‌بندی در مواجهه با انحراف‌های جزئی از جداول زمانی اسمی از طریق معادلات عمومی حاکم بر چارچوب‌های استواری به‌گونه‌ای بهبود یابد که برنامه بتواند از طریق لحاظ نمودن تقاضاهای برنامه‌ریزی شده و برنامه‌ریزی نشده ترافیک سیر و حرکت ناوگان قطارها را مدیریت نماید [۱۶]. در برخی برنامه‌های کاربردی برای تنظیم جداول زمان‌بندی حرکت قطارها از طریق به‌کارگیری اصول استواری، کوشیده می‌شود اصلاح چرخه‌های زمانی سفر با استفاده از شیوه‌هایی نظیر روابط لاگرانژ پیاده‌سازی شود در این قبیل شیوه‌ها، قابلیت بازیابی جداول پس از بروز اغتشاش در ناوگان و مسیر و نیز دستیابی به حالت نرمال از طریق راهکارهای بهینه<sup>۴</sup> می‌تواند محدودیت‌های ناشی از اثر تجمعی و پراکندگی<sup>۵</sup> خطوط را تا حد مطلوبی پوشش دهد [۱۷]. در تصویر شماره دو نمودار شماتیک مراحل برنامه‌ریزی و طراحی جداول زمان‌بندی حرکت قطارهای مترو نشان داده شده است.

- 
- 1 - head way
  - 2 - disturbance
  - 3 -buffer times
  - 4 - Optimal alternatives
  - 5 - Effect Aggregation and dispersion



تصویر شماره ۲) فرایند و مراحل برنامه ریزی ناوگان قطارها و مسیر در شبکه ریلی مترو (منبع: آرشو اسناد فنی متروی تهران)

در مطالعه‌ای بریمبرگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، محققان استواری را توانایی حفظ کیفیت خروجی (محصول و خدمت) در طول بازه‌های زمانی متوالی یا زمان‌های موردنیاز برای تکامل محصول، خدمت و غیره... و نیز افزودن ویژگی‌هایی برای نیل به پایداری بر اساس مؤلفه‌های عملیاتی و نظایر آن تعریف کرده‌اند [۱۸]. هدف از برنامه‌ریزی استوار در مترو تولید یک جدول زمان‌بندی جامع و مانع است که نسبت به اختلالات<sup>۲</sup> ناوگان قطارها و مسیر ریلی شبکه حساس بوده و از طریق بازتولید جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها یک سیستم انعطاف‌پذیر در مقابل تأخیرهای احتمالی به وجود آورده که کمترین تأثیر را از آن‌ها داشته باشد [۱۹]. در ادبیات موضوع حمل‌ونقل ریلی، استواری به معنای استقرار رهیافتی است که در آن مسائل برای بدترین حالت ممکن طرح‌ریزی می‌شوند [۲۰]. بهینه‌سازی استوار شبکه‌ی مترو به پایداری و تاب‌آوری جداول زمان‌بندی در برابر انواع اختلال‌های برنامه‌ریزی نشده و ناخواسته (غیرمترقبه) در شبکه‌ی ریلی اشاره دارد [۲۱]. در بسیاری از فرایندهای مدیریت ترافیک در شبکه ریلی لازم است گزینه‌هایی<sup>۳</sup> با سطح معینی از استحکام به دست داده شود به‌گونه‌ای که باوجود داده‌های نادقیق، مبهم و ناقص؛ چارچوبی مناسب برای تصمیم‌گیری بهینه با توجه به محدودیت‌های عملیاتی - فنی و نیز اعوجاج‌های رخ داده در جدول زمان‌بندی ارائه گردد. رویکردهای استوار در فرایند تنظیم جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای مترو بر اساس یک نظام برنامه‌ریزی شده، ساخت‌یافته و مبتنی بر شرایط واقعی خطوط ریلی؛ می‌توانند بهینه‌سازی جداول را از طریق بازطراحی و تولید مجدد به‌منظور رفع اثرات تأخیرهای احتمالی میسر نمایند [۲۲]. تصویر شماره سه میزان استواری جداول زمان‌بندی واقعی حرکت قطارهای مترو را با توجه به اقدامات تجربی و معتبر در یک سیستم شبیه‌سازی نشان می‌دهد.



تصویر شماره ۳) میزان استواری جداول زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه مترو بر اساس کنش‌های تجربی و تحلیل تأخیر (منبع: اوریل و ویلیامز،<sup>۴</sup> ۲۰۱۴)

- 1 - BRIMBERG
- 2 - disturbance
- 3 - Alternatives
- 4 - AVRIEL & WILLIAMS

در برخی از مطالعات نظیر لیبچن و مورینگ<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) به منظور بهینه‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها به تدقیق مؤلفه‌های اصلی برنامه‌ریزی نظیر موجودی‌های شبکه ریلی پرداخته شده است در اینجا اصطلاح موجودی به ناوگان قطارها برای حمل مسافر در شهرها اطلاق می‌گردد. در غالب مطالعات با استفاده از تئوری گراف‌ها<sup>۲</sup> انتزاعی‌ات مفهومی از کارکرد تسهیلات ثابت و متحرک شبکه ریلی برای پیاده‌سازی در مدل‌های کامپیوتری به‌عنوان بخش‌های پایه‌ای در شبیه‌سازی عملکرد سامانه‌های وظیفه‌ای ای مترو مانند ناوگان، زیرساخت و رفتار مسافری به دست داده می‌شود. تمرکز عمومی این تحقیقات بر مدل‌سازی زیرساخت‌ها با سطوح کافی از جزئیات است از این‌رو محققان در مطالعات مختلف برای دست آوردن جزئیات کافی از ساختارهای میکروسکوپی<sup>۳</sup> برای نشان دادن زیرساخت‌های ریلی و ارتباطات میان آن‌ها استفاده نموده‌اند [۲۳]. در یک مدل میکروسکوپی تسهیلات و زیرساخت‌های ثابت و متحرک ریلی و تمامی عناصر کلیدی مرتبط با آن از طریق رأس‌ها<sup>۴</sup> (گره‌ها) و یال‌ها<sup>۵</sup> (مسیر ریلی میان گره‌ها) در یک ساختار گرافیکی به‌گونه‌ای ترسیم می‌شود که برای هر یال (مسیر ریلی)، متحرک‌ها (ناوگان قطارها) دارای سرعت مجاز و معینی برای اعزام و دریافت از/به گره‌ها (ایستگاه‌ها) باشند [۲۴]. در این نوع مدل‌ها تدقیق مختصات فنی پارامترهای اساسی نظیر رئوس و یال‌ها برای شناسایی محدودیت‌های مدل و تابع هدف از طریق سنجش شیب خطوط ریلی، مقاومت حرکتی ناشی از فرازها، بروز برخی مانورهای اضطراری طول مسیر مانند نظیر تعمیرات خط و ناوگان، کاپلینگ قطارها، توقف‌های اعمالی توسط سامانه سیگنالینگ<sup>۶</sup> در مسیر ریلی و غیره ... اعمال می‌گردد. مدل‌های میکروسکوپی علی‌رغم دقت و جزئیات کافی برای حل مسائل از نظر محاسباتی به مقادیر قابل‌توجهی از داده‌ها برای انجام تحلیل نیاز داشته و پیاده‌سازی آن‌ها برای یافتن گوشه بهینه به کندی صورت می‌گیرد [۲۵]. بنابراین به‌منظور رفع نقاط ضعف مترتب بر مدل‌های میکروسکوپی می‌توان به‌طور هم‌زمان از الگوهای ماکروسکوپی<sup>۷</sup> نیز بهره گرفت [۵۰]. این مدل‌ها برخلاف مدل‌های میکروسکوپی دارای سطح مطلوبی از انتزاع بوده و در آن محاسبات مرتبط با تعداد یال‌ها و رئوس آن‌ها تا حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته و از این‌رو روند کاهشی مزبور، مدل را بر اساس تخصیص اوزان گره‌ها (ایستگاه‌ها) به‌عنوان رئوس گراف و مسیرهای حرکتی به‌عنوان یال‌های آن برای درک منطقی و پیاده‌سازی ساده‌تر می‌نماید و دقت خروجی‌های مدل را نیز تا حد قابل‌قبولی افزایش می‌دهد [۲۶]. داده‌های مرتبط با یال‌ها (مسیرهای حرکتی قطار) معمولاً از ، تعداد، سرعت و ظرفیت نمایش قطارها، ممکن است در وضعیت متوسطی قرار داشته باشند. همچنین با توجه به پیچیدگی زمانی مناسب، این مدل می‌تواند نمایش خوبی برای تسهیلات و زیرساخت‌های مترو با توجه به ساختار منطقی و سطوح انتزاعی سیستم و ارتباط میان الگوهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی؛ به‌عنوان یک مدل ساختاری مزوسکوپی<sup>۸</sup> مورد بررسی قرار گیرند [۵۱]. چنین مدل‌هایی در همه سطوح بدون درگیر شدن در پیچیدگی‌های محاسباتی همانند مدل‌های میکروسکوپی و با برخورداری از گستردگی الگوهای ماکروسکوپی می‌توانند به‌صورت شماتیک جزئیات و انتزاع خاص رفتار سیستم را نمایش دهند [۲۷].

---

1 - Liebchen & Möhring

2 - Graph theory

3 - Microscopic structures

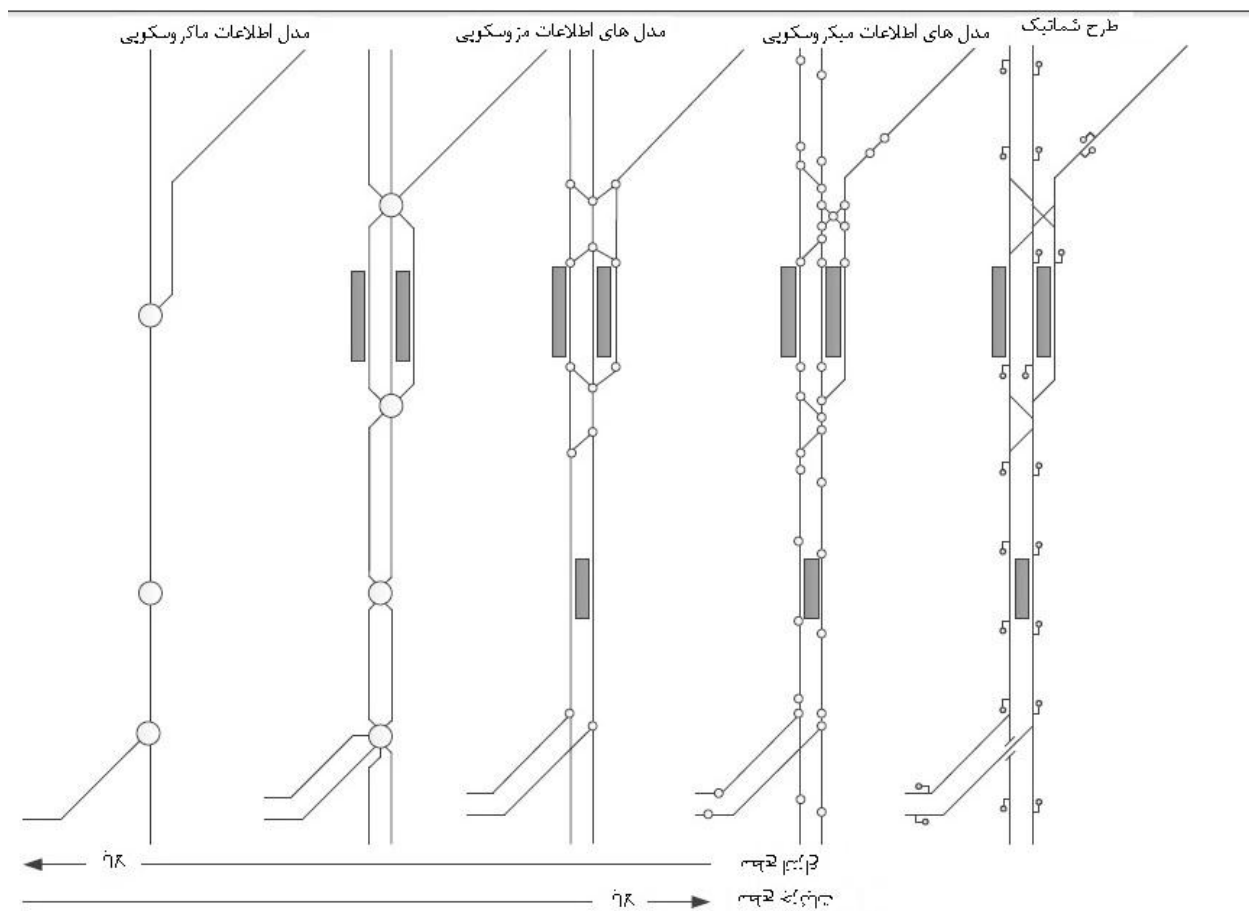
4 - vertices

5 - Edges

6 - Signaling system

7 - Macroscopic models

8 - Mesoscopic structural model



تصویر شماره ۴) نمودار طرح شماتیک الگوی پیشنهادی و مقایسه آن با مدل های میکروسکوپی، مزوسکوپی و ماکروسکوپی برای مطالعه موردی شبکه مترو (منبع: محققان)

با توجه به تصویر شماره ۴؛ در مراحل مختلف برنامه ریزی تاکتیکی شبکه مترو، انبوه فراوان و پراکنده ای از داده های ترافیکی موجود خواهد بود و لذا یک گزینه بهره گیری از شیوه های مدل سازی به گونه ای است که بتوان از یک مدل میکروسکوپی استفاده نمود که به صورت خودکار داده های تولید شده در مدل ماکروسکوپی را برای بهبود کمی و افزایش دقت محاسباتی مورد استفاده قرار دهد [۲۸]. بنابراین مقصود از جایگزینی مدل های ماکروسکوپی با مدل های مزوسکوپی، آزمون و اعتبارسنجی خروجی های به دست آمده از یک مدل ماکروسکوپی است که می تواند برای تعیین و تجزیه و تحلیل چند مقیاسی مراحل عملیاتی سیر و حرکت قطارها در شبکه ریلی مترو مورد استفاده قرار می گیرد. در مدیریت عملیات خطوط ریلی؛ افق برنامه ریزی ها کوتاه تر، جزئیات بیشتر و کمیت داده های کیفی در دسترس، بالاتر است که در نتیجه بهره گیری از یک مدل میکروسکوپی را امکان پذیر می نماید [۲۹]. بنابراین استفاده از این شیوه و مقایسه الگوها یاد شده با هم کمک می کند که علاوه بر مدل سازی زیرساخت های ثابت و متحرک مترو؛ داده های ناوگان قطارها و ظرفیت و رفتار مسافری را برای مدل سازی عملیات سیر و حرکت قطارها و طراحی و



پیاده‌سازی جداول زمان‌بندی به‌طور به‌هنگام<sup>1</sup> مورد استفاده قرار داد. در جدول شماره یک ضمن تبیین مدل‌های اخیر به مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل‌های ارائه شده در سایر مطالعات اخیر پرداخته شده است.

پذیرفته شده در مجله محاسبات نرم

جدول شماره ۱) تبیین مدل های اخیر و مقایسه به نتایج مدل پیشنهادی در حوزه برنامه ریزی مجدد جداول زمانبندی سیر و حرکت قطارها

نویسنده	مسئله	توپولوژی	نوع اختلال	توابع هدف	تقاضا	مدت اختلال	ظرفیت قطار	مدیریت اختلال استراتژیهای	مدل	روش حل	نواوری
لو، تانگ، یین و لیو <sup>۱</sup> (۲۰۲۳)	کنترل اختلالات در شبکه مترو	N	مسدودی موقتی خطوط ریلی	زمان سفر قطارهای مسافری	-	-	✓	الگوی توقف- عبور و گردش قطارها در شبکه	MILP	B&B	مدلسازی یکپارچه استراتژیهای مدیریت اختلال
لو، یانگ، یانگ، ژو، و گائو <sup>۲</sup> (۲۰۲۳)	مدیریت اختلال های برنامه ریزی نشده مترو	L	مسدودی خطوط	زمان انتظار مسافری در ایستگاه ها	-	-	✓	توقف موقت قطارها در مسیر و گردش قطار	NLIP	C&B	ارائه راهکرهای قابل پیاده سازی در شبکه مترو
بروچارد، پاسیلاس-لپین و دمایا <sup>۳</sup> (۲۰۲۲)	مدیریت اختلال مترو	L	تغییرات تقاضای سفر در فصول مختلف سال	کل زمان سفر قطارها	✓	-	✓	استراتژی توقف-عبور	MINLP	رویکرد استواری	طراحی یک الگوی استوار برای استراتژی توقف عبور

<sup>1</sup> - Luo, Tang, Yin & Liu

<sup>2</sup> - Salido

<sup>3</sup> - Brochard, Pasillas-Lépine, & Demaya

نویسندگان	مسئله	توپولوژی	نوع اختلال	توابع هدف	تقاضا	مدت اختلال	ظرفیت قطار	مدیریت اختلال استراتژیهای	مدل	روش حل	نواوری
یانگ، لو، یانگ و گائو <sup>۱</sup> (۲۰۲۱)	هم زمانی قطارها در مترو	N	تأخیر قطارها	زمان سفر و تعویض خط	-	-	✓	تغییرات زمان های سیر و توقف قطارها در شبکه مترو	MILP	GA	توسعه مدل جدید برای حل مسئله زمانبندی مجدد قطارها در شبکه
وانگ، چن، کین و یانگ <sup>۲</sup> (۲۰۲۳)	بهینه سازی الگوی توقف عبور	L	-	زمان سفر قطار در مسیر	-	-	✓	الگوی توقف عبور	MILP	روش تولید ستون	ترکیب مدل زمانبندی و الگوی توقف - عبور
کاچیان، چی و یانگ <sup>۳</sup> (۲۰۲۰)	زمانبندی قطارهای مترو	L	تغییرات تقاضای سفر	مصرف انرژی زیاد و افزایش زمان سفر	✓	-	✓	ایجاد تغییر در زمان های ورود و خروج	مدل بهینه سازی تصادفی قطارها	برنامه ریزی پویای تقریبی	در نظر گرفتن همزمانی عدم قطعیت و پویایی تقاضای سفر

<sup>1</sup> - Yang, Lu, Yang, & Gao

<sup>2</sup> - Wang, Chen, Qin & Yang

<sup>3</sup> - Cacchiani, Qi, & Yang

نویسندگان	مسئله	توپولوژی	نوع اختلال	توابع هدف	تقاضا	مدت اختلال	ظرفیت قطار	مدیریت اختلال استراتژیهای	مدل	روش حل	نواوری
مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر	مدیریت اختلال در خطوط راه آهن شهری	L	مسدودی موقتی خطوط	متوسط زمانهای انتظار و سفر مسافری	√	√	√	۱. تلفیق توقف-عبور و گردش قطار ۲. تلفیق زمانبندی مجدد و الگوی توقف-عبور	MILP	VNS	در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان سیر قطارها، مدت اختلال سفر
	زمانبندی قطارهای راه آهن شهری در شرایط عدم قطعیت	L	تقاضای سفر	متوسط و واریانس زمان انتظار هر مسافر در ایستگاه و سکوهای مسافری	√	-	√	استواری	برنامه ریزی استوار	SAA	استوارسازی برنامه زمانبندی حرکت قطارها

نوآوری	روش حل	مدل	مدیریت اختلال استراتژیهای	ظرفیت قطار	مدت اختلال	تقاضا	توابع هدف	نوع اختلال	توپولوژی	مسئله	نویسندگان
مدل جدید برای مسئله زمانبندی حرکت قطارها در شرایط کمبود ظرفیت قطارها و تقاضای پویای سفر	GVNS	MILP و MINLP	-	✓	-	-	متوسط زمان انتظار مسافری	-	L	زمانبندی اولیه حرکت قطارها	

مجله محاسبات نرم

### ۳- روش انجام تحقیق

از دیدگاه روش‌شناسی پژوهش با توجه به دلایل زیر تحقیق حاضر در زمره مطالعات کمی به شمار می‌رود:

نخست: مفاهیم اصلی پژوهش در قالب مجموعه‌ای از توابع هدف، متغیرهای تصمیم و پارامترهای عددی تبیین پذیر هستند.

دوم: خروجی‌های فرایند تحقیق به صورت کمی، استاندارد و تکرارپذیر هستند.

سوم: تحلیل‌ها، یافته‌ها و نتیجه‌گیری‌های تحقیق در قالب مفاهیم و مقادیر ریاضی قابل بیان هستند.

با توجه به کمی بودن ماهیت تحقیق حاضر استفاده از روش‌های ریاضی و آماری برای پیاده‌سازی این تحقیق امری ضروری است. رویکرد تحقیق حاضر از نوع کاربردی است، چرا که هدف اصلی آن ایجاد ارتباط میان مفاهیم نظری علم پژوهش عملیاتی با یک مسئله کاربردی در صنعت مترو است. روش انجام این تحقیق شامل طراحی مدل مفهومی<sup>۱</sup>، بیان قضیه‌های ریاضی قابل استفاده در تدوین جداول زمان‌بندی مترو، شبیه‌سازی و درنهایت مطالعه موردی در متروی تهران است. برای حل مسئله جداول زمان‌بندی حرکت قطارهای مترو از تکنیک‌های مرسوم برنامه‌ریزی خطی در ذیل شیوه‌های پژوهش عملیاتی استفاده می‌شود و علت این امر آن است که به نمت مطالعات پیشین می‌توان در فضای یک روابط معتبر ریاضی می‌توان شرایط غیرقطعی و احتمالی را مدل نمود [۳۰].

برخی از مفروضات پژوهش حاضر برای مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی جداول زمان‌بندی حرکت قطارهای مترو به شرح زیر بیان می‌گردد:

- جدول زمان‌بندی حرکت قطارها برای یک مسیر دوخطی متروی تهران و برای بازه‌ی زمانی روزانه با تعداد معینی قطار انجام می‌شود.
- تقاضای سفر برای خط‌های رفت و برگشت یک مسیر دوخطی در متروی تهران مستقل از یکدیگر فرض می‌گردد.
- جداول زمان‌بندی حرکت قطارها در متروی تهران به صورت غیر دوره‌ای تولید شده و تغییرات سرفاصله زمانی بر اساس الگوی سفر در آن اعمال می‌شود.
- حداقل و حداکثر سرفاصله زمانی میان اعزام‌ها در بازه‌های زمانی متوالی معین بوده و یکی از ورودی‌های مدل برنامه‌ریزی خطی را تشکیل می‌دهد.
- تعداد قطارهای ناوگان موجود و نیز آماده‌به‌خدمت برای سیر و حرکت مترو در طول دوره برنامه‌ریزی جداول زمانی ثابت فرض می‌گردد.
- ظرفیت مسافری هر قطار در هر جهت مشخص است.
- در ساعات بهره‌برداری عادی و یا ساعات اوج، بروز اختلال سبب انسداد خط و ازدحام مسافری می‌شود.
- زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها دارای یک مقدار حداقل و حداکثر است.

➤ در جدول زمان‌بندی اولیه، زمان سیر قطارها بین ایستگاه‌ها (گره‌ها) دارای مقداری ثابت بوده و برای مدیریت اختلالات، زمان سیر یک تابع احتمالی از فواصل (یال‌ها) بین ایستگاه‌ها (گره‌ها) بوده و دارای سرعت مجاز و مقدار حداکثر سرعت است.

از طرفی با توجه به اینکه نرخ ورود و خروج مسافران به/از ایستگاه‌ها (گره‌ها) متناسب با پارامتر زمان تغییر می‌کند از این رو لازم است در مدل پیشنهادی، ظرفیت به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری با جداول زمان‌بندی حرکت قطارها انطباق داشته باشند. برخی متغیرهای تصمیم‌مورد بررسی در تحقیق حاضر عبارت‌اند از زمان دریافت و اعزام قطار از هر ایستگاه طول مسیر به‌طوری‌که از ظرفیت‌های موجود به بهترین شکل برای حداقل سازی سرفاصله زمانی حرکت قطارها در مسیر ریلی استفاده شود. همچنین در شرایط بروز اختلال در ناوگان و خط ریلی، متغیرهای مدل تصمیم‌گیری علاوه بر زمان اعزام و دریافت قطارها از ایستگاه‌ها (گره‌ها)، الگوهای «حرکت - توقف»، عبور گذری از ایستگاه و گردش قطارها در مسیر ریلی را نیز در برمی‌گیرد که در حالت کلی به‌صورت رابطه زیر بیان می‌گردد [۳۱].

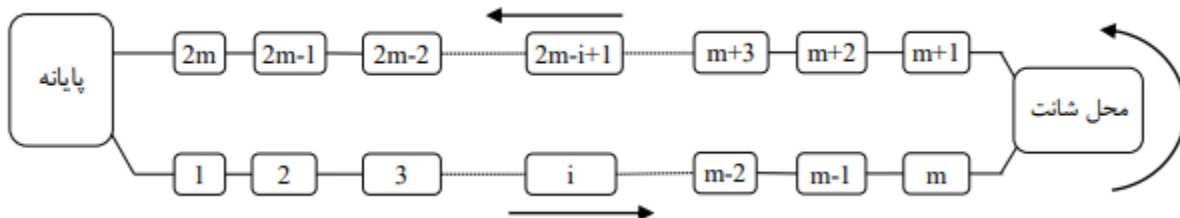
$$\text{Max } \dot{C}x$$

$$s. t \quad Ax \leq b$$

$$1 \leq x \leq u$$

رابطه شماره (۱)

یک مسیر دوخطه در شبکه مترو در تصویر شماره ۴ نشان داده شده است. چنانکه در این تصویر مشاهده می‌شود به‌استثنای پایانه‌های مستقر در انتهای مسیرها، هر گره (ایستگاه) در طول خطوط ریلی صرفاً ظرفیت دریافت و یا اعزام یک رام قطار را دارد. در ابتدای طرح زمان‌بندی در یک دوره زمانی روزانه که تمامی قطارها از محل استقرار خود در پایانه‌ها اعزام شده و در انتهای دوره زمانی مجدداً به پایانه‌ها بازمی‌گردند. به‌عنوان مثال یک خط مترو که در آن ناوگان قطارها دارای  $n$  رام قطار است، به ازای یک رام قطار مانند  $k$  به‌طوری‌که  $1 \leq k \leq n$  باشد به ازای هر اعزام از مبدأ یک واحد به  $k$  اضافه می‌شود.



تصویر شماره ۵) نمودار اعزام و دریافت قطارها در پایانه‌ها و گره‌های طول مسیر ریلی (منبع: سیدر<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶)

به‌منظور مدل‌سازی جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در مسیر ریلی و ایستگاه‌ها، برخی پارامترها مورد نیاز است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از حجم و نرخ مسافری، تعداد قطارهای ناوگان مسیر ریلی، ورودی‌های سکو و درب قطارها، طول قطار و سکو، نقاط دسترسی تعبیه‌شده بر روی سکوی مسافری، عرض سکو و همچنین موانع دسترسی به قطارها از قبیل خرابی‌ها و تعمیرات اضطراری قطار، زمان ورود نخستین قطار به ایستگاه و زمان خروج آخرین قطار از ایستگاه، زمان‌های حرکت و توقف قطارها و همچنین مقررات و محدودیت‌های عملیاتی ناشی از سامانه سیگنالینگ که می‌تواند ابزار لازم را برای مدل نمودن بر اساس اصول برنامه‌ریزی خطی فراهم نماید.

<sup>1</sup> - CEDER

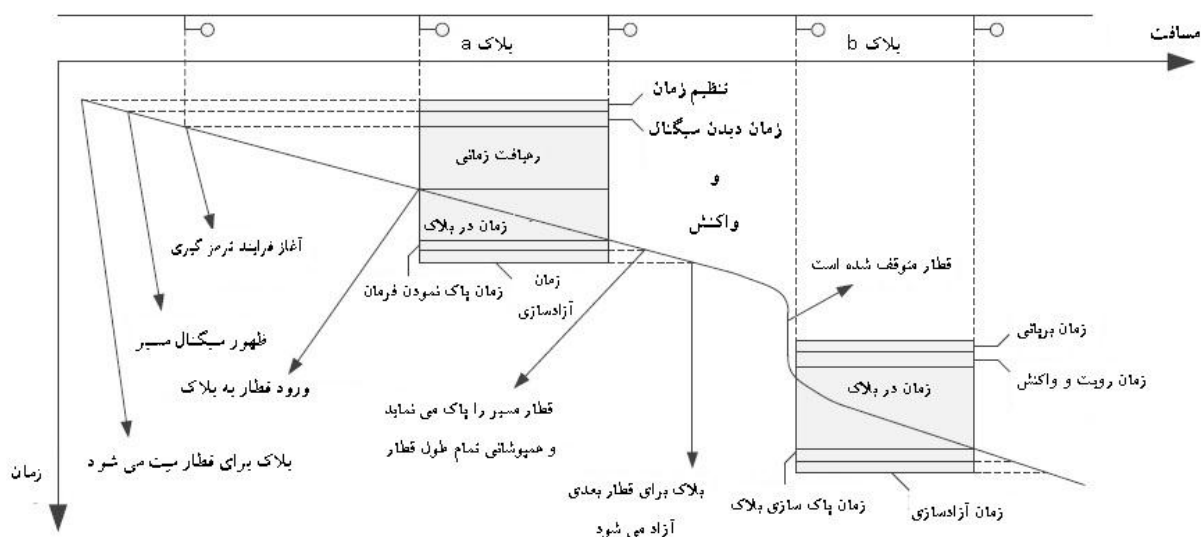
در رویکردهای خرد و کلان، مدل‌سازی جداول زمان‌بندی به دو صورت قابل پیاده‌سازی است که از آن با عنوان معادلات تبدیلات یک‌سویه و دوسویه یاد می‌شود. خروجی‌های تبدیلات یک‌سویه و زمان پیاده‌سازی مدل بر اساس اصول و مفاهیم مدل‌های میکروسکوپی قابل‌محاسبه است و همچنین با استفاده از داده‌های تجمیعی الگوی ماکرو/مکروسکوپی می‌توان روایی مدل پیشنهادی را بررسی نمود.

یکی از عوامل کلیدی موفقیت<sup>۱</sup> برای برپایی<sup>۲</sup> جداول زمان‌بندی مستحکم؛ بهره‌گیری از شیوه‌های شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی ظرفیت ناوگان و خطوط ریلی است که در آن اکتساب حداقل سرفاصله زمانی حرکت قطارها موردنظر بوده و به‌طور مستقیم نیز بر ظرفیت قطارها در هر ساعت و در جهت تأثیر می‌گذارد. مدل‌سازی انسدادهای غیر برنامه‌ریزی‌شده‌ی خطوط ریلی در حال حاضر رایج‌ترین رهیافت برای کنترل اعوجاج‌های جداول زمان‌بندی از حالت اسمی آن برای سامانه‌های کنترل و سیگنالینگ است [۳۲]. در سامانه‌های کنترل و سیگنالینگ زمان‌های انسداد برنامه‌ریزی نشده‌ی خطوط ریلی اصطلاحاً به آن دسته از بازه‌های زمانی اطلاق می‌گردد که در آن یک قطار مشخص به‌طور انحصاری بخش خاصی از قطعات<sup>۳</sup> ریلی را بیش از زمان تعیین‌شده در جداول اشغال می‌نماید. این مهم شامل زمان‌های آزادسازی قطعات ریلی نیز هست. همچنین لحاظ کردن موقعیت دقیق سیگنال‌ها در خطوط ریلی برای انجام مدل‌سازی ضروری به نظر می‌رسد زیرا غالباً فاصله میان هر دو سیگنال یک قطعه (بلاک ریلی) را ایجاد می‌نماید از این‌رو چنین به نظر می‌رسد که برای تدقیق زمان انسداد (اشغال) و آزادسازی یک قطعه ریلی خاص (بلاک) توسط یک قطار معین، پیاده‌سازی یک مدل میکروسکوپی برای یافتن نقطه بهینه مطلوب‌تر باشد [۳۳]. بر اساس مطالعه کاپرارا<sup>۴</sup> (۲۰۱۶) که از بررسی گزارش‌های فنی ارسالی از سیستم‌های ریلی شرکت کنور برمزه<sup>۵</sup> (سازنده سامانه ترمز قطارهای متروی تهران) به‌دست‌آمده، اعمال ترمزهای مکانیکی برای قطارهای مترو به‌طور متوسط ۲۷ تا ۵۷ ثانیه، ترمزهای الکترودینامیکی<sup>۶</sup> حدوداً ۱۲ ثانیه و ترمزهای الکتریکی<sup>۳</sup> ۳ ثانیه طول می‌کشد که لازم است در مدل‌سازی لحاظ شود. همچنین زمان رؤیت سیگنال توقف توسط راهبر قطار در مسیر ریلی تا عکس‌العمل و اعمال ترمز، بر اساس مطالعات زمان‌سنجی فرایندی حدوداً سه‌ثانیه‌ای است که در معادلات مسئله لحاظ می‌گردد [۳۴]. در صورتی که تبادل پیام‌ها میان سامانه‌های سیگنالینگ قطار و تجهیزات کنار خطوط حرکتی دچار اختلال شود لازم است حداکثر فاصله ترمزی در محاسبات مدنظر قرار گیرد که به‌طور معمول برای قطارهای مترو این مهم دارای بزرگی  $0.16 \text{ m/s}^2$  می‌باشد که در این‌بین عدم محاسبه دقیق شتاب ترمزی به‌عنوان یکی از محدودیت‌های سرعت برای سیر وسایل نقلیه در خطوط ریلی به شمار می‌رود [۳۴]. علاوه بر این محدودیت‌های سرعت ممکن است ناشی از شرایط خاص آب و هوایی نظیر بارندگی‌ها باشد که در این صورت برای مقابله با کاهش اصطکاک میان چرخ و ریل، ملاحظات سرعت در مدل لحاظ می‌گردد. در رهیافت‌های تنظیم جداول زمان‌بندی، زمان مجاورت اصطلاحاً به مدت‌زمانی اطلاق می‌گردد که قطار از انتهای سیگنال قطعه ریلی فعلی مسافت لازم را طی می‌نماید تا به ابتدای سیگنال قطعه ریلی بعدی برسد که در این حالت مواجهه با قوس و یا گره نقطه مبدأ آغاز مسافت ترمزی خواهد بود لذا جانمایی سیگنال‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر سرفاصله زمانی حرکت قطارها تأثیر می‌گذارد به‌عنوان مثال در سازوکارهای تبادلات متناوب و پیوسته‌ی پیام، سامانه سیگنالینگ در هر ۵۰ تا ۳۵۰ متر با متوسط فاصله ترمزی ۲۰۰ متر برای قطارهای مترو به‌روزرسانی‌های منظم داده‌های مسیر را صورت می‌دهد از این‌رو استقرار یک

- 
- 1 - Key Success Factors
  - 2 - set up
  - 3 - blocks
  - 4 - CAPRARA
  - 5 - Knorr-Bremse
  - 6 - Electrodynamic brakes



سیستم سیگنالینگ کابین<sup>۱</sup> با قابلیت به‌روزرسانی پیوسته داده‌ها، امکان افزایش مقدار ظرفیت به دلیل کوتاه‌تر شدن زمان اشغال مسیر را فراهم می‌نماید و در نتیجه سرفاصله زمانی حرکت قطارها کاهش می‌یابد. تنها استثنا در این مورد مسافت ترمزی است که لازم است با داده‌های سیگنال در هر قطعه ریلی و نمایشگر سیگنال در کابین راهبر مطابقت داشته باشد. زمان پاک نمودن فرامین در سامانه سیگنالینگ مرکز فرمان برای آزادسازی قطعه ریلی حرکتی نیز از جمله دیگر محدودیت‌های مدل است که به عواملی از جمله سرعت سیر، طول قطار و همچنین طول حاشیه فاصله ایمنی بستگی دارد که برپایی آن در متروی تهران معمولاً برای هر ۴۰ کیلومتر بر ساعت، ۱۵۰ متر مسافت ترمزی و زمان اعمال کامل ترمز است که با استانداردهای راهبری ایمن و بهینه در اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها (UIC<sup>۲</sup>) مطابقت دارد [۳۵]. در تصویر شماره ۵ فرآیندهای اشغال و آزادسازی قطعات ریلی (بلاک‌ها)، پارامترها و محدودیت‌های مدل در یک نمودار "مسافت - زمان" ترسیم شده است در این تصویر، قطعه ریلی (بلاک)  $a$  جایی است که در آن قطار با سرعت معین بلاک را می‌پیماید و بلاک  $b$ ، فضایی است که در آن قطار در ابتدای سیگنال بلاک توقف نموده است و رویدادها از طریق سامانه سیگنالینگ به‌طور مستمر مبادله می‌شود.



تصویر شماره ۶) نمودار فرایندهای اشغال و آزادسازی بلاک‌ها (قطعات ریلی) توسط یک قطار خاص با لحاظ پارامترها و محدودیت‌های مدل (منبع: نقشه جامع فرایندهای ترافیکی متروی تهران)

نمادهای مدل ریاضی تحقیق حاضر (پارامترها، متغیرها و مجموعه‌ی محدودیت‌ها) در جدول شماره دو نشان داده شده است.

جدول شماره ۲) نمادهای مدل ریاضی تحقیق (پارامترها، متغیرها و مجموعه‌ی محدودیت‌ها)

نماد	توضیح
K	قطعه ریلی (بلاک) خاص از میان مجموعه‌ی قطعات موجود
B	مسیر حرکتی قطار

1 - cab signaling

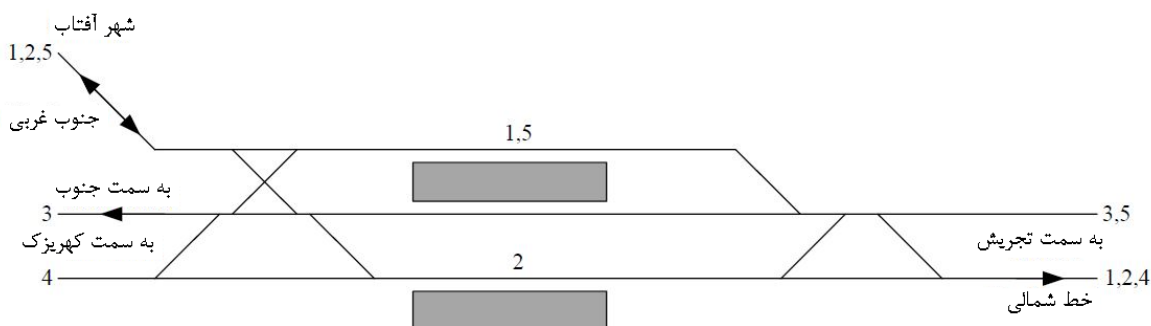
2 - International Union of Railways

نماد	توضیح
I	مجموعه قطارهای برنامه‌ریزی شده جهت اعزام $I=\{1,2,3, \dots, m, m+1, \dots, 2m\}$
T	مجموعه نقاط زمانی در افق برنامه‌ریزی $T=\{t_0, \dots, t_0 + p_a\}$
i, j	اندیس ایستگاه‌های مسیر
(i,j)	اندیس ارتباط‌های مستقیم بین ایستگاه‌ها
$t_{bb,i(k)}$	زمان آغاز بلاک k زمانی برای قطار i
$t_{be,i(k)}$	زمان پایان اشغال قطعه ریلی k برای قطار i
(O,D)	نقاط گره‌های (ایستگاه‌ها) مبدأ و مقصد
n	اندازه ناوگان
$\varphi_n$	تعداد مسیرهای ممکن برای تعداد n رام قطار از یک ایستگاه تبادلی
$C_{ij}$	ضریب تعیین تعداد مسیرهای ممکن میان گره‌های i و j
$h_{min}$	حداقل سرفاصله زمانی حرکت بین دو قطار
$P_{ij}$	احتمال بروز تعارض میان قطارها بین گره‌های i و j
$[t_0, t_E]$	بازه زمان‌بندی حرکت قطارها
$\varphi_p$	احتمال بروز اعوجاج در جداول زمان‌بندی حرکت قطارها
$f_{ij}$	زمان اشغال هر قطعه از مسیر ریلی
$t_o$	زمان اشغال یک قطعه ریلی (بلاک) تحت کنترل مرکز فرمان هر ایستگاه
$h_{jk}^m$	حداقل سرفاصله زمانی بین دو قطار j و k
$q_{jk}$	بزرگی تعارض میان قطارهای j و k در نقاط مختلف طول مسیر حرکتی
$F_{ij}(x)$	تابع توزیع تجمعی برای یک توزیع احتمال نرمال مورد استفاده در شبکه ریلی
$t_{jk}^b$	حداقل سرفاصله زمانی برای قطار k در مسیر B که با قطار j دارای تعارض است.
$S_{ij}$	مجموعه زمان‌های بافر مورد استفاده برای طراحی جداول زمان‌بندی
$q_{jk}$	نوع تلاقی هر قطار که با قطار j در تعارض است
$h_{ij}$	سرفاصله زمانی میان ایستگاه‌های i و j

مسئله برنامه‌ریزی زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای مترو معادل مسائلی نظیر مکان‌یابی  $p$ -تسهیلات با لحاظ محدودیت‌های عرضه و ظرفیت می‌باشد [۳۶]. از این‌رو برخی محققان نظیر کانکا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعات خود نشان داده‌اند که مسائل زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در زمره مسائل NP-hard قرار می‌گیرد و لذا با توجه به پیچیدگی‌های محاسباتی غالباً روش‌های فرا ابتکاری برای حل آن در ابعاد واقعی پیشنهاد می‌شود.

#### ۴- یافته‌ها و بحث

انتشار تأخیر در ایستگاه‌های مترو به سطح کارکردی تسهیلات ثابت و متحرک در مسیر ریلی وابسته است. بروز تأخیر پیامد طبیعی اختلال‌های سامانه‌ها و زیرسامانه‌های ریلی است که ریسک انتشار آن با ضریب بالا به طرح هندسی زیرساخت‌های مترو و پیچیدگی‌های آن و نیز تعداد قطارهایی که از هر گره (ایستگاه) عبور می‌نمایند، بستگی دارد. از این‌رو در برخی مطالعات استواری یک جدول زمان‌بندی در مواجهه با مخاطرات و اعوجاج‌های ناشی از اختلالات را می‌توان از طریق شاخص‌های استواری ارزیابی و برآورد نمود [۳۷]. در این تحقیق برای مطالعه موردی از داده‌های ترافیکی ایستگاه متروی شاهد در خط یک متروی تهران استفاده شده است. در این ایستگاه به دلیل وجود ریسک بالای انتشار تأخیر در شبکه مترو که غالباً از مسیرهای متضاد نشئت می‌گیرد، شاخص‌های استواری از پیچیدگی بالا و استحکام کمتری برخوردار هستند از این‌رو یکی از اهداف این تحقیق توسعه مدلی است که بتواند استواری عملیات سیر و حرکت قطارها را در این گره مورد بررسی و ارزیابی قرار دهد.



تصویر شماره ۷) مسیرهای اصلی عملیات عادی سیر و حرکت قطارها در ایستگاه تبادلی شاهد (منبع: سامانه جامع کنترل ترافیک متروی تهران)

در ایستگاه تبادلی متروی شاهد در خط یک از مسیر تجریش به سمت کهریزک، خط متروی درون‌شهری به سمت خطوط حومه‌ای (شهر آفتاب و فرودگاه امام خمینی) و به‌عکس همگرا می‌شوند. زیرساخت ایستگاه متروی شاهد در تصویر شماره ۶ نشان داده شده است. برای محاسبه میزان استواری در گره (ایستگاه) شاهد، لازم است اختلال‌هایی که منجر به انسداد طول مسیر ریلی خط یک شده شناسایی گردد. به منظور حداقل سازی سرفاصله زمانی میان قطارها معادله زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۸]:

$$h_{ij} = \max(t_{be,i(k)} - t_{bb,i(k)}) \quad \forall k \in B \quad \text{رابطه شماره (۲)}$$

<sup>1</sup> - CANCA

در اینجا  $k$  یک قطعه ریلی (بلاک) از میان مجموعه‌ی قطعات موجود در مسیر حرکتی  $B$  می‌باشد و  $t_{bb,i(k)}$  ناظر بر زمان آغاز بلاک  $k$  زمانی برای قطار  $i$  و  $t_{be,i(k)}$  زمان پایان اشغال قطعه ریلی  $k$  برای قطار همان قطار است. رابطه شماره ۲ همچنین امکان تفکیک زمانی قطعات و ایجاد حاشیه ایمنی در ابتدای مسیر حرکتی را نشان می‌دهد به طوری که قطار دوم بتواند در مسیر ریلی بدون ایجاد مانع برای قطار اول به سیر و حرکت خود ادامه دهد. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که یکی از ساده‌ترین شیوه‌های سنجش استواری جداول زمان‌بندی حرکت قطارها استفاده از آن دسته از شاخص‌های محاسباتی است که امکان مدیریت بحران و خروج از بن‌بست را با دقت بالا به وجود می‌آورد. معادله برآورد میزان استواری در مسیریابی زیرساخت‌های ریلی در جداول زمان‌بندی به صورت رابطه شماره ۳ به شرح بیان می‌شود:

$$\varphi_n = \sum_{i,j \in R} c_{ij} \cdot \frac{1}{N} \quad \text{رابطه شماره (۳)}$$

معادله شماره ۳ برای تعیین تعداد ترکیب‌های ممکن از مسیر ریلی برای رسیدن به مقصد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رابطه  $C_{ij}$  یک متغیر صفر و یک است که تعیین می‌نماید آیا بین گره‌های  $i$  و  $j$  مسیر بدون تعارضی وجود دارد یا خیر؟ با استفاده از رابطه شماره ۳ شاخص استواری در بعد مسیریابی با توجه به طرح کلی جداول زمان‌بندی و شرایط موجود زیرساخت‌های ایستگاه متروی شاهد، مقدار  $0/84$  محاسبه می‌شود که بزرگی آن نسبتاً زیاد بوده و از طرفی نیز به عدد یک که حداکثر کران محسوب می‌شود، نزدیک‌تر است.

معادله ارائه شده توسط بارنا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) در قالب رابطه شماره ۴ امکان به دست آوردن احتمال بروز تعارض میان قطارها را ارائه می‌نماید که به شرح زیر بیان می‌شود:

$$P_{ij} = \frac{n_i - n_j}{n^2} \quad \text{رابطه شماره (۴)}$$

در رابطه شماره ۴؛  $n_i$  ناظر بر تعداد قطارهایی است که از مسیر  $i$  استفاده می‌نمایند  $(i, n_i)$ . همچنین مسیر  $j$  و  $n$  تعداد کل قطارهایی است که از ایستگاه  $n$  استفاده می‌کنند. برای ایستگاه متروی شاهد، احتمال بروز تعارض برای هر ترکیب ممکن از مسیر ریلی با استفاده از معادله فوق برای یک روز عادی هفته بین ساعات ۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰ برای قطارهای فعال در مسیر به شرح جدول شماره ۳ محاسبه شده است.

جدول شماره ۳) مقادیر احتمال بروز تعارض در ایستگاه متروی شاهد بر اساس جدول زمان‌بندی یک روز عادی

مسیر نخست \ مسیر دوم	۱ ( $n_1=1$ )	۲ ( $n_2=2$ )	۳ ( $n_3=3$ )	۴ ( $n_4=4$ )	۵ ( $n_5=5$ )
$n_1 = 1$	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴
$n_2 = 2$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲

مسیر دوم \\ مسیر نخست	۱ (n <sub>۱</sub> =۱)	۲ (n <sub>۲</sub> =۲)	۳ (n <sub>۳</sub> =۳)	۴ (n <sub>۴</sub> =۴)	۵ (n <sub>۵</sub> =۵)
	n <sub>۳</sub> = 3	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۹
n <sub>۴</sub> = 4	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۶
n <sub>۵</sub> = 5	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴

همچنین احتمال بروز اعوجاج با توجه میزان استواری جداول زمان بندی اعزام و دریافت قطارها در ایستگاه متروی شاهد به عنوان درصد نسبی احتمال تجمعی در نقطه‌ای که احتمال بروز اختلال بین مسیرهای ریلی متعارض وجود دارد با نسبت احتمال تجمعی ترکیب مسیرها از طریق جایگشت مسیرهای ممکن و با استفاده از رابطه شماره ۵ به دست می‌آید:

$$\varphi_p = \sum_{(i,j) \in R} (p_{ij} \cdot c_{ij}) \cdot \frac{1}{\sum_{(i,j) \in R} p_{ij}} \quad \text{رابطه شماره (۵)}$$

با استفاده از رابطه فوق میزان استواری ایستگاه متروی شاهد برای احتمال تجمعی اوزان همه مسیرهای ترکیبی مقدار یک و مجموع احتمال تجمعی نسبی برای مسیرهای متعارض مقدار ۰/۷ به دست می‌آید که در این حالت با لحاظ اوزان نسبی برای مسیر حرکت قطارها میزان پیچیدگی زمانی محاسبات از ۰/۸۴ به ۰/۷۰ کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش پیچیدگی را می‌توان بر اساس الگوریتم مورد استفاده در مسیریابی قطارها توجیه نمود [۳۹].

یا توجه به مطالعات بارنا و همکاران (۲۰۱۷) زمان اشغال هر قطعه ریلی (بلاک) از مسیر توسط هر قطار با استفاده از رابطه شماره ۶ محاسبه می‌شود:

$$f_{ij} = \frac{p_{ij} \times c_{ij}}{\varphi_p} \times h_{ij} \quad \text{رابطه شماره (۶)}$$

با استفاده از معادله شماره ۶ می‌توان زمان اشغال و آزادسازی قطعات مسیر ریلی در ایستگاه متروی شاهد را برحسب ثانیه به دست آمده است که نتایج محاسبات در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

جدول شماره ۴) زمان‌های اشغال و آزادسازی هر قطعه از مسیر ریلی در خط یک مترو در ایستگاه متروی شاهد برحسب ثانیه

مسیر دوم \n مسیر نخستین	مسیر نخستین				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۲۶	۲۶	۱۰/۳	۹/۷	۶/۹
۲	۲۶	۲۶	۱۰/۳	۷/۷	۶/۹
۳	۱۰/۳	۱۰/۳	۳۳/۱		۱۵/۴
۴	۷/۷	۷/۷	-	۲۳/۱	-
۵	۶/۹	۶/۹	۱۵/۴	-	۱۰/۳

زمان اشغال یک قطعه ریلی (بلاک) تحت کنترل مرکز فرمان هر ایستگاه را می‌توان با استفاده از رابطه شماره ۷ به صورت زیر محاسبه نمود:

$$t_o = \varphi_p \times n \times \sum_{(i,j) \in S} f_{ij} \quad \text{رابطه شماره (۷)}$$

با در نظر گرفتن بازه زمانی نمونه آزمایشی و نیز با لحاظ تمامی پیچیدگی‌های زمانی مرتبط با جداول زمان‌بندی، میزان انحراف از مقادیر اسمی جدول بر اساس رابطه شماره ۸ به دست می‌آید:

$$\varphi_w = \frac{t_o}{T} \quad \text{رابطه شماره (۸)}$$

با استفاده از رابطه شماره ۸ میزان انحراف از جداول زمانی اسمی برای ایستگاه متروی شاهد ۰/۳۸ به دست می‌آید. همچنین یافته‌های به‌دست‌آمده از تابع توزیع احتمال با توجه به تحلیل طیف داده‌های جمع‌آوری‌شده، نشان می‌دهد که بروز تأخیر در ایستگاه مقصد لزوماً به مجموع تمامی تأخیرهای رخ داده در طول مسیر حرکتی بستگی ندارد بنابراین در برخی تحقیقات توصیه‌شده است تأخیرهای غیر منفی در محاسبات تابع توزیع احتمال لحاظ شود زیرا به دست آمدن خروجی‌های منفی نشان می‌دهد که تأخیرها واقعی نیستند از این رو در برخی مطالعات پیشین ورودی‌های غیر منفی تأخیرها در یک ایستگاه را از طریق یک توزیع نمایی توصیف نموده‌اند (مارتی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). یافته‌های به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر تا حدود زیادی با نتایج مطالعات مارتی (۲۰۱۷) که نشان می‌دهد در حالت کلی توزیع وایبل بیشترین تناسب را با احتمال بروز تأخیرهای ورودی و خروجی‌های منفی قطارها در جداول زمان‌بندی دارد؛ انطباق دارد. در برخی مطالعات نیز بر استفاده از توزیع‌هایی تأکید شده است که از انعطاف‌پذیری بیشتری برای مواجهه با تأخیرها برخوردار است. به‌عنوان مثال در مطالعه پوتوف و همکاران (۲۰۱۳) یک توزیع نمایی برای یافتن تأخیرهای خطوط ریلی پیشنهاد شده که می‌تواند پایه‌ای برای توصیف تأخیرهای غیر منفی ورودی و خروجی‌های گره‌ها (ایستگاه‌ها) در هنگام استفاده از شاخص‌های سنجش استواری جداول زمان‌بندی باشد. تابع توزیع تجمعی پیشنهادی در تحقیق حاضر به شرح رابطه شماره ۹ می‌باشد:

$$F(v; \lambda) = 1 - e^{-\lambda x}$$

رابطه شماره (۹)

در رابطه شماره ۹ پارامتر  $\lambda$  برای تعیین مجموعه‌ی معینی از داده‌های تأخیر مسیر ریلی به صورت نمایی بیان شده است که مقدار آن با توجه به تحقیق دی شوتر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) و با استفاده از رابطه شماره ۱۰ به شرح زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{1}{E[X]}$$

رابطه شماره (۱۰)

مقدار امید ریاضی برای متغیر تصادفی  $X$  برابر میانگین حسابی داده‌های تأخیر است که به صورت نمایی توزیع در مخرج رابطه شماره ۱۰ آمده است. در این تحقیق برای آنالیز داده‌ها به‌ویژه در حالت‌های بروز اغتشاش در خطوط ریلی از اطلاعات زمانی ساعات اوج مسافری در بازه‌ی ساعت ۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰ برای شرایط دارای تأخیر منفی و غیر منفی ثبت شده در بانک اطلاعات ترافیکی ایستگاه متروی شاهد به صورت توأمان بهره گرفته شد. مجموعه‌ی مرتبط با تأخیر ناوگان قطارها برای نمایش وضعیت قطارهایی که با اختلال مواجه بوده‌اند و یا به موقع در ایستگاه متروی شاهد دریافت و یا اعزام نشده‌اند برای یک روز عادی در جدول شماره ۴ آورده شده است.

جدول شماره ۴) نمایش اعوجاجات قطارها برای ایستگاه متروی شاهد در بازه زمانی ۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰

شماره قطار	مقدار میانه	میانگین ( $1/\lambda$ )	انحراف معیار	همه تأخیرها	تأخیرهای غیر منفی
اعزامی/دریافتی	برحسب ثانیه	برحسب ثانیه	برحسب ثانیه	بیشتر از یک دقیقه و کمتر از یک دقیقه	
۱۰۹	۶۰	۷۱	۸۹	۰/۸۹	۰/۹۷
۱۰۶	۲۰	۷۲	۱۸۱	۰/۹۰	۰/۹۵
۱۰۱	۶۰	۱۶۴	۲۶۷	۰/۷۰	۰/۸۲
۳۱۱	۶۰	۹۱	۱۴۳	۰/۸۶	۰/۹۴
۵۱۳	۰	۶۴	۲۰۷	۰/۹۲	۰/۹۶
۳۱۹	۵۹	۷۰	۸۴	۰/۸۳	۰/۹۸
۱۱۸	۰	۶۱	۱۱۰	۰/۹۰	۰/۹۶
۱۱۶	۰	۳۳	۶۹	۰/۹۳	۰/۹۸

با توجه به اطلاعات جدول شماره ۷ برای قطار ۵۱۳ که یک مثال نقض و دارای میانگین تأخیر اعزام آن کمتر از مقدار تأخیر دریافت است می‌توان چنین توجیه نمود که یک دلیل این مهم به توقف‌های طولانی و حدوداً پنج دقیقه‌ای قطار مزبور در منطقه شانت (تعویض

خط) در ایستگاه شاهد به سمت ایستگاه تجریش از سوزن‌های سمت کهریزک و شهر آفتاب بازمی‌گردد که در این حالت امکان کاهش مقدار تأخیر و در نتیجه زمان سیر قطار فراهم می‌شود. همچنین با بررسی سایر داده‌های دو جدول قبلی می‌توان دریافت که میانگین تأخیر قطار شماره ۳۱۹ از میانگین کل تأخیرهای اعزام و دریافت ایستگاه شاهد بیشتر است که می‌توان دلیل آن را چنین توضیح داد که برخی قطارها به صورت سریع‌السیر بوده و ایستگاه‌های طول مسیر خط یک را بدون توقف طی می‌نمایند و این در حالی است که با مطالعه داده‌های ترافیکی درمی‌یابیم این قطار در ایستگاه‌های طول مسیر طبق برنامه زمان‌بندی جدول توقف داشته است. زمان بافر برای هر قطار عبارت است از مقدار زمانی که بین آن قطار و قطار پیش از آن در توالی حرکتی مسیر ریلی محاسبه و در جدول زمان‌بندی لحاظ می‌شود. بنابراین اگر زمان بافر کمتر از زمان آستانه اعوجاج باشد ریسک بروز تعارض در مسیر ریلی افزایش می‌یابد. بهره‌گیری از بافر سبب بهبودهای کوچکی از طریق افزایش زمان بافر در آلترناتیوهای مرتبط با شاخص‌های استواری در مسیر ریلی می‌گردد [۵۲].

با در نظر گرفتن ادبیات موضوع برای ارائه یک مدل تصمیم‌گیری در تحقیق حاضر می‌توان یک طرح دنباله‌ای برای توزیع زمان‌های توقف دومرحله‌ای به منظور نشان دادن توالی قطارها در مسیر ریلی مترو ارائه نمود که می‌تواند امید ریاضی تأخیرهای قطار  $J$  در طول مسیر ریلی را برای سایر قطارهای پی‌درپی شبکه نظیر قطار  $i$  را به عنوان تابعی از متغیر  $X$  (زمان بافر) به صورت رابطه شماره ۱۱ ارائه نماید:

$$\bar{F}_{ij}(x) = 1 - F_{ij}(x) \quad \text{رابطه شماره (۱۱)}$$

بنابراین مجموعه زمان‌های بافر مورد استفاده مسیر ریلی با لحاظ حداقل سرفاصله زمانی میان قطارها، تلاقی خطوط و تبادلی بودن ایستگاه‌ها برای هر قطار  $J$  که در مسیر ریلی با قطار  $i$  در تعارض احتمالی است به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$S_{ij} = \{(t_{j1}^b, h_{j1}^m, q_{j1}), \dots, (t_{jk}^b, h_{jk}^m, q_{jk}), \dots, (t_{jm}^b, h_{jm}^m, q_{jm})\}$$

در اینجا جدول زمان‌بندی حرکت قطارها به صورت دوره‌ای در نظر گرفته می‌شود و قطاری همانند قطار  $k$  در توالی‌های زمانی بعدی نسبت به  $i$  لحاظ شده که به قطار  $J$  در مجموعه  $S_{ij}$  که به انضمام زمان بافر نگاشت می‌گردد. زمان بافر تخصیص یافته به قطار  $J$  در رابطه شماره ۱۲ نشان داده شده است:

$$t_{jj}^b = T - h_{jj}^m \quad \text{رابطه شماره (۱۲)}$$

زمان بافر برای قطارهای مفروض و متوالی  $k$  در مسیر ریلی  $b$  در دوره زمانی  $T$  به صورت  $t_{jk}^b$  از طریق رابطه شماره ۱۳ محاسبه می‌گردد:

$$t_{jk}^b = \begin{cases} (arr_k - arr_j) - h_{jk}^m & \text{if } arr_j < arr_k \\ (arr_k - arr_j) - h_{jk}^m + T & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad \text{رابطه شماره (۱۳)}$$

در رابطه فوق  $arr_k$  زمان رسیدن قطار  $k$  به یک قطعه ریلی خاص در مسیر  $b$  و  $arr_j$  زمان رسیدن قطار  $J$  به همان نقطه است علاوه بر این در رابطه محاسباتی شماره ۱۳ فرض بر این بوده است که جدول زمان‌بندی در هنگام برنامه‌ریزی اولیه به صورت مفروض حالت عدم وجود اختلال در قطعه ریلی و نرمال بودن شرایط را پوشش دهد که در این صورت مقدار به دست آمده است که به معنی غیر منفی بودن مقادیر محاسبه شده در نقطه  $t_{jk}^b$  است. جدول شماره ۵ خروجی‌های مدل پیشنهادی (حداقل سرفاصله



زمانی و زمان بافر) را برای قطارهای  $i$  و  $j$  و قطار مفروض  $k$  در مسیرهای منتهی به قطعات ریلی ایستگاه متروی شاهد را نشان می‌دهد.

پذیرفته شده در مجله محاسبات نرم

جدول شماره ۵) مقدار زمان بافر و حداقل سرفاصله زمانی به دست آمده در مدل پیشنهادی برای قطعات ریلی منتهی به مسیر ایستگاه متروی شاهد (برحسب ثانیه)

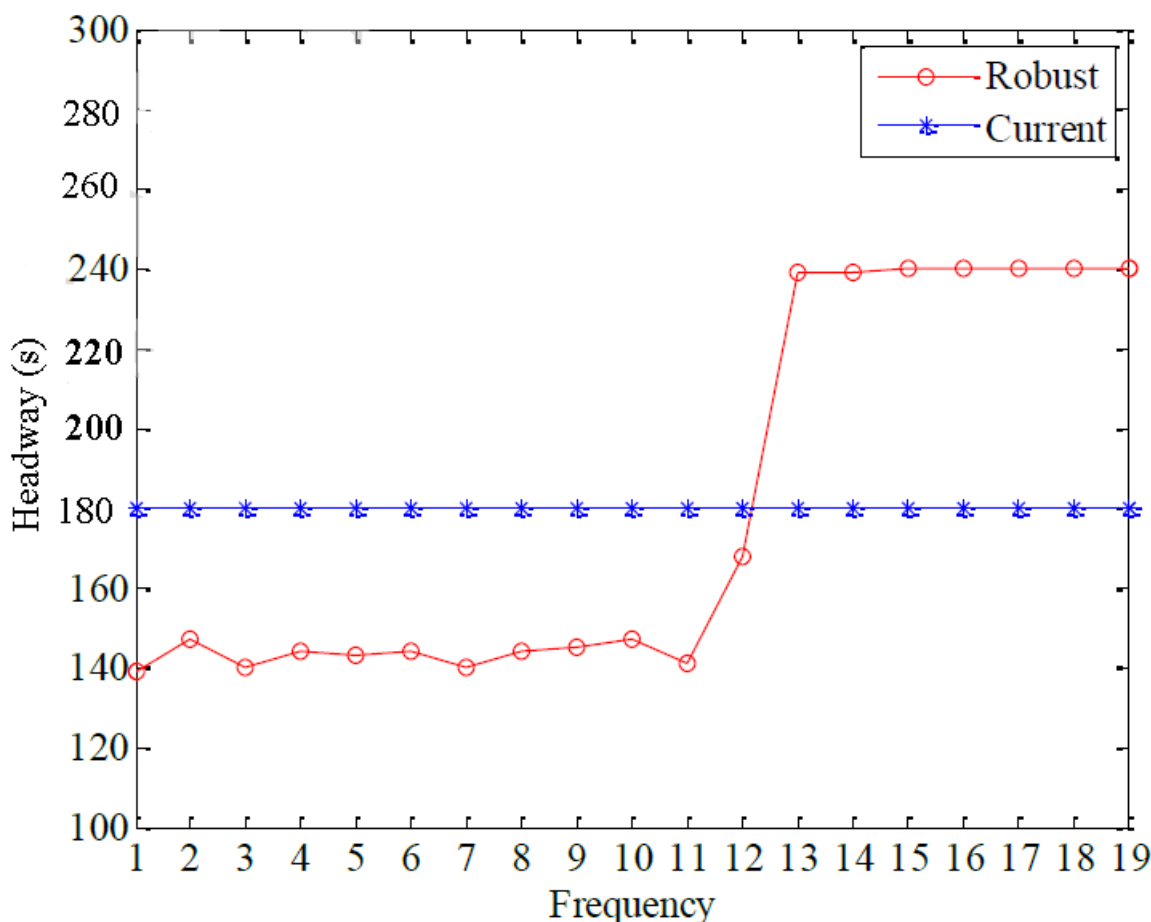
i	j	K(route , train)	$t_{kj}^m$	$h_{jk}^m$
۱	۱	۱ ( ۱ و ۱ )	۶۷	۳۶۰
۲	۱	۲ ( ۲ و ۱ )	۶۹	۳۶۰
۳	۱	۳ ( ۳ و ۱ )	۵۸/۴	۳۶۰
۳	۲	۴ ( ۳ و ۲ )	۳۳/۳۳	۳۰۰
۳	۳	۵ ( ۳ و ۳ )	۶۵/۲	۴۲۰
۴	۱	۶ ( ۴ و ۱ )	۱۷/۱۹	۳۶۰
۴	۲	۷ ( ۴ و ۲ )	۵۹	۴۲۰
۴	۳	۸ ( ۴ و ۳ )	۶۰	۴۸۰

جدول شماره ۵ نشان می‌دهد که در مدل پیشنهادی علی‌رغم عدم لحاظ تعداد کل قطارهای فعال در مسیر ریلی خط یک شیوه‌ای متفاوت را برای در نظر گرفتن زمان بافر در راستای حداقل سازی سرفاصله زمانی مدنظر قرار داده است که جداول زمان‌بندی با افزایش داده‌ها و بیشتر شدن دقت آن‌ها میزان استواری بیشتری را برای برنامه زمان‌بندی ایستگاه‌های مترو ایجاد خواهد کرد.

##### ۵- نتیجه‌گیری

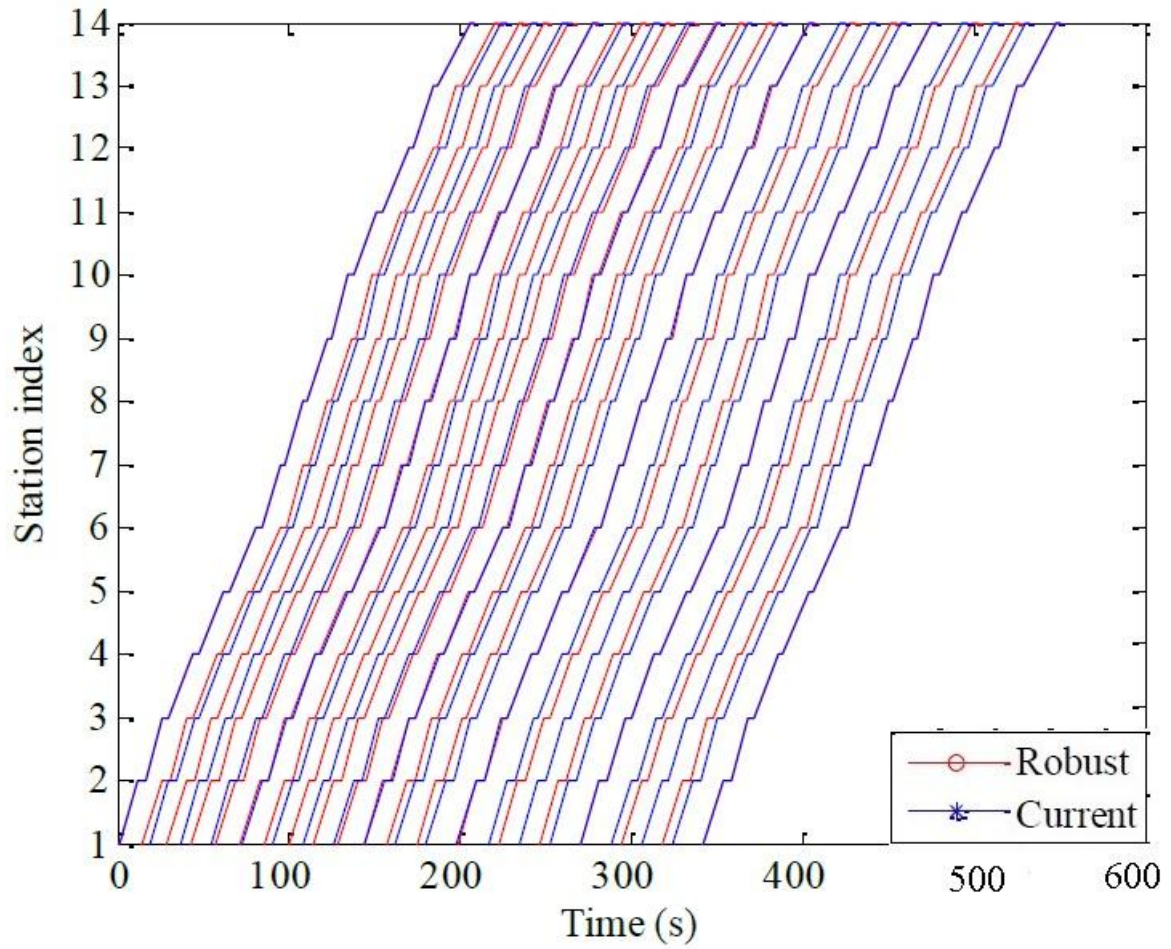
عوامل غیرقطعی متعددی ممکن است فرایند سیر و حرکت قطارها را متأثر نمایند و در نتیجه منجر به بروز انحراف‌های کوچک یا بزرگ در طرح زمانی اولیه شوند که از آن جمله می‌توان به ازدحام مسافری یا خرابی ناوگان قطارها و زیرساخت‌های ریلی و نظایر آن اشاره نمود که می‌تواند ناشی از تغییرات احتمالی در تقاضای مسافری خطوط و یا عدم وجود بسترهای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مطلوب در شبکه مترو برای دوره‌های زمانی مختلف باشد و در نتیجه به‌عنوان عوامل اغتشاش در فرایندهای ریلی مترو سبب عدم اجرای کامل و جامع جداول زمان‌بندی طراحی شده، گردد. بروز چنین اغتشاش‌هایی ممکن است منجر به ازدحام مسافری در ایستگاه‌ها و خطوط و طولانی شدن سرفاصله زمانی حرکت قطارها شود. داده‌های تأخیر برای جداول زمانی ارائه شده در مطالعات داده‌های ترافیکی تا سال ۱۳۹۹ نشان می‌دهد که قطارها با تأخیر نسبتاً زیاد از بخش جنوبی ایستگاه متروی شاهد وارد نیمه شمالی خط یک می‌شوند از این رو استقرار و توسعه جداول زمان‌بندی و بهینه‌سازی آن‌ها با استفاده از رویکردهای استوار به کاهش زمان تأخیر قطار اعزامی از ایستگاه شاهد در مقایسه با تأخیرهای دریافت به این ایستگاه منتهی می‌شود. همچنین شبیه‌سازی رهیافت‌های ارائه شده نشان می‌دهد که جداول زمان‌بندی طراحی شده از طریق رویکردهای استوار می‌تواند به سرعت تأخیرها را با استفاده از زمان‌های بافر با تقریب بالا جذب نماید. بنابراین برای حل مسئله جداول زمان‌بندی حرکت قطارهای مترو در تحقیق حاضر از یک رویکرد بهینه‌سازی استوار با استفاده از روش‌های ریاضی بهره گرفته شد که انجام

آن خود مستلزم در نظر گرفتن مفروضات معین، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌هایی است که سبب شد مسئله زمان‌بندی با دارا بودن درجاتی از پیچیدگی در زمره مسائل NP-Hard قرار گیرد. از این رو با استفاده شبیه‌سازی و با توجه به انعطاف‌پذیری بالا، این رویکرد به‌عنوان یک راه‌حل مطلوب در این بخش از طریق شبیه‌سازی دنبال گردید. در مدل پیشنهادی رابطه‌ی میان ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله، شناسایی و در قالب یک معادله قطعی و صریح برای برآورد استواری با استفاده از روابطی که در نهایت به تعیین بزرگی زمان بافر و حداقل سرفاصله زمانی منتهی گردید؛ تدقیق شد. در تصویر شماره ۸ ضمن مقایسه وضع فعلی جداول زمان‌بندی در نیمه جنوبی خط یک متروی تهران با سناریوی استوار که در این مقاله به آن پرداخته شد، تعداد اعزام‌های مسافری در یک روز عادی و برای یک ساعت خاص شلوغ (۱۵ تا ۱۶) در سرفاصله‌های زمانی مختلف (از سه دقیقه تا ۶ دقیقه) ترسیم شده است.



تصویر شماره ۸) مقایسه شرایط فعلی سرفاصله زمانی حرکت قطارها (براساس شیوه‌های معمول) و رویکرد استوار

همچنین از منظر شرایط ترافیکی چنانچه در یک بازه زمانی ۱۰۰ تا ۶۰۰ ثانیه ای برای تعدادی از ایستگاه‌های نیمه جنوبی خط یک متروی تهران به سمت ایستگاه شاهد و نیز از ایستگاه تقاطعی شاهد به سمت ایستگاه کهریزک و شهر آفتاب به مقایسه جدول زمانی فعلی متروی تهران و جدول پیشنهادی پردازیم، نمودار شماره ۹ گویای نتایج این مقایسه خواهد بود.



تصویر شماره ۹) مقایسه جدول زمانبندی فعلی در متروی تهران با جدول زمانبندی پیشنهادی در تحقیق بر اساس رویکرد استوار برای استگاه های جنوبی خط

محاسبات نرم

- [1]. Zhang L, Hou P, Qiang D. Transit-Oriented Development in New Towns: Identifying Its Association with Urban Function in Shanghai, China. *Buildings*. 2022 Sep 6;12(9):1394. <https://doi.org/10.3390/buildings12091394>
- [2]. Caimi G, Kroon L, Liebchen C. Models for railway timetable optimization: Applicability and applications in practice. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017 Jan 1;6(4):285-312. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.11.002>
- [3]. **Tamnai, Mohammad .2013.** "Rescheduling of train movement in two-track rail routes", PhD thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University.
- [4]. Albrecht T. Automated timetable design for demand-oriented service on suburban railways. *Public transport*. 2016 May;1:5-20. <https://doi.org/10.1007/s12469-008-0003-4>
- [5]. Andersson PÅ, Scalia-Tomba GP. A mathematical model of an urban bus route. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2014 Aug 1;15(4):249-66. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90011-4](https://doi.org/10.1016/0191-2615(81)90011-4)
- [6]. Zhan S, Wong SC, Peng Q, Lo SM. Passenger-oriented Railway Timetable Rescheduling in a Complete Blockage. In *The 23rd International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, Hong Kong 2021. [http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT\\_2018\\_paper\\_35.pdf](http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT_2018_paper_35.pdf)
- [7]. Xu P, Corman F, Peng Q, Luan X. A train rescheduling model integrating speed management during disruptions of high-speed traffic under a quasi-moving block system. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2020 Oct 1;104:638-66. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.05.008>
- [8]. Ahmadi Asl N, Effatnejad R. Introducing a new scheme for demand response of a smart residential community with a variety of demand response models. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2021 Oct 31. 10.48301/KSSA.2021.287832.1547
- [9]. Goerigk M, Schöbel A. Algorithm engineering in robust optimization. arXiv preprint arXiv:1505.04901. 2018 May 19. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04901>
- [10]. **AMIN-NASERI, M. R. & BARADARAN, V. 2017.** Accurate Estimation of Average Waiting Time in Public Transportation Systems. *Transportation Science*. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0514>
- [11]. Yue Y, Wang S, Zhou L, Tong L, Saat MR. Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018 Feb 1;63:126-46. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.007>
- [12]. Gong H, Chen X, Yu L, Wu L. An application-oriented model of passenger waiting time based on bus departure time intervals. *Transportation Planning and Technology*. 2019 May 18;39(4):424-37. <https://doi.org/10.1080/03081060.2016.1160583>
- [13]. Laporte G, Mesa JA, Perea F. A game theoretic framework for the robust railway transit network design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2020 May 1;44(4):447-59. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.08.004>

- [14]. Visentini MS, Borenstein D, Li JQ, Mirchandani PB. Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services. *Journal of Scheduling*. 2016 Dec;17:541-67.  
<https://doi.org/10.1007/s10951-013-0339-8>
- [15]. Ghaemi N, Goverde RM, Cats O. Railway disruption timetable: Short-turnings in case of complete blockage. In 2016 IEEE international conference on intelligent rail transportation (ICIRT) 2019 Aug 23 (pp. 210-218). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2016.7588734>
- [16]. Shen S, Wilson NH. An optimal integrated real-time disruption control model for rail transit systems. In *Computer-aided scheduling of public transport 2011* (pp. 335-363). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-56423-9\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-56423-9_19)
- [17]. Schmöcker JD, Cooper S, Adeney W. Metro service delay recovery: comparison of strategies and constraints across systems. *Transportation research record*. 2015 Jan;1930(1):30-7.  
<https://doi.org/10.1177/0361198105193000104>
- [18]. Brimberg J, Korach E, Eben-Chaim M, Mehrez A. The Capacitated p-facility Location Problem on the Real Line. *International Transactions in Operational Research*. 2011 Nov;8(6):727-38.  
<https://doi.org/10.1111/1475-3995.t01-1-00334>
- [19]. Askari N, Taheri MH. Numerical Investigation of a MHD Natural Convection Heat Transfer Flow in a Square Enclosure with Two Heaters on the Bottom Wall. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2020 May 21;17(1):97-114. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112759>
- [20]. Yang K, Lu Y, Yang L, Gao Z. Distributionally robust last-train coordination planning problem with dwell time adjustment strategy. *Applied Mathematical Modelling*. 2021 Mar 1;91:1154-74.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.035>
- [21]. D'Ariano A, Corman F, Pacciarelli D, Pranzo M. Reordering and local rerouting strategies to manage train traffic in real time. *Transportation science*. 2008 Nov;42(4):405-19.  
<https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0247>
- [22]. Corman F, D'Ariano A, Pacciarelli D, Pranzo M. Dispatching and coordination in multi-area railway traffic management. *Computers & Operations Research*. 2017 Apr 1;44:146-60.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.11.011>
- [23]. Eberlein XJ, Wilson NH, Bernstein D. Modeling real-time control strategies in public transit operations. In *Computer-Aided Transit Scheduling: Proceedings, Cambridge, MA, USA, August 1997* 1999 Jan 1 (pp. 325-346). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-85970-0\\_16](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-85970-0_16)
- [24]. Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*. 2012 Feb;6(1):58-73.  
<https://doi.org/10.1109/4235.985692>
- [25]. De Schutter B, Van den Boom T, Hegyi A. Model predictive control approach for recovery from delays in railway systems. *Transportation Research Record*. 2012;1793(1):15-20.  
<https://doi.org/10.3141/1793-03>
- [26]. Delle Site P, Filippi F. Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2008 Jan 1;32(1):19-38.  
[https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(97\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(97)00016-5)

- [27]. Luo X, Tang T, Yin J, Liu H. A robust mpc approach with controller tuning for close following operation of virtually coupled train set. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023 Jun 1;151:104116. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104116>
- [28]. Luo X, Jiang Y, Yao Z, Tang Y, Liu Y. Designing Limited-Stop Transit Service with Fixed Fleet Size in Peak Hours by Exploiting Transit Data. *Transportation Research Record*. 2017;2647(1):134-41. <https://doi.org/10.3141/2647-16>
- [29]. Potthoff D, Huisman D, Desaulniers G. Column generation with dynamic duty selection for railway crew rescheduling. *Transportation Science*. 2010 Nov;44(4):493-505. <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0322>
- [30]. Cortés CE, Sáez D, Milla F, Núñez A, Riquelme M. Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013 Oct 1;18(5):757-69. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.05.016>
- [31]. Wang Y, De Schutter B, van den Boom TJ, Ning B, Tang T. Efficient bilevel approach for urban rail transit operation with stop-skipping. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014 Oct 9;15(6):2658-70. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2323116>
- [32]. Chapman RA, Gault HE, Jenkins LA. Factors affecting the operation of urban bus routes. 2006 Dec. <http://worldcat.org/issn/03063402>
- [33]. Carbone, A., Papa, F., & Sacco, N. 2015. An Optimization Approach for Delay Recovery in Urban Metro Transportation Systems.
- [34]. Caprara A, Monaci M, Toth P, Guida PL. A Lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem. *Discrete applied mathematics*. 2016 Apr 1;154(5):738-53. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2005.05.026>
- [35]. Lu Y, Yang L, Yang H, Zhou H, Gao Z. Robust collaborative passenger flow control on a congested metro line: A joint optimization with train timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2023 Feb 1;168:27-55. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.12.008>
- [36]. Cao Z, Yuan Z, Li D. Estimation method for a skip-stop operation strategy for urban rail transit in China. *Journal of Modern Transportation*. 2014 Sep;22:174-82. <https://doi.org/10.1007/s40534-014-0059->
- [37]. Cadarso L, Marín Á, Maróti G. Recovery of disruptions in rapid transit networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2013 Jul 1;53:15-33. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.01.013>
- [38]. Cacchiani, V., Qi, J., & Yang, L. 2020. Robust optimization models for integrated train stop planning and timetabling with passenger demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 136, 1-29.
- [39]. Burdett RL, Kozan E. A disjunctive graph model and framework for constructing new train schedules. *European Journal of Operational Research*. 2016 Jan 1;200(1):85-98. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.12.005>
- [40]. Dollevoet T, Huisman D. Fast heuristics for delay management with passenger rerouting. *Public Transport*. 2014 Apr;6:67-84. <https://doi.org/10.1007/s12469-013-0076-6>

- [41]. Shapiro A, Dentcheva D, Ruszczyński A. Lectures on stochastic programming: modeling and theory. Society for Industrial and Applied Mathematics; 2021 Jul 7.
- [42]. Barrena E, Canca D, Coelho LC, Laporte G. Exact formulations and algorithm for the train timetabling problem with dynamic demand. *Computers & Operations Research*. 2014 Apr 1;44:66-74. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.11.003>
- [43]. Brochard A, Pasillas-Lépine W, Demaya B. Cascaded Train Speed Regulation: Robustness to Feedback Delay and Measurement Filtering. *IFAC-PapersOnLine*. 2022 Jan 1;55(34):126-31. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.319>
- [44]. Canca D, Barrena E, Algaba E, Zarzo A. Design and analysis of demand-adapted railway timetables. *Journal of Advanced Transportation*. 2014 Mar;48(2):119-37. <https://doi.org/10.1002/atr.1261>
- [45]. Ceder A. Integrated smart feeder/shuttle transit service: simulation of new routing strategies. *Journal of Advanced Transportation*. 2013 Oct;47(6):595-618. <https://doi.org/10.1002/atr.185>
- [46]. Liebchen C, Möhring RH. The modeling power of the periodic event scheduling problem: railway timetables—and beyond. 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 2014 Sep 14* (pp. 3-40). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-74247-0\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-74247-0_1)
- [47]. Maróti G. A branch-and-bound approach for robust railway timetabling. *Public Transport*. 2020 Jul;9(1-2):73-94. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12469-016-0143-x>
- [48]. Wang Y, Chen J, Qin Y, Yang X. Timetable rescheduling of metro network during the last train period. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023 Sep 1;139:105226. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105226>
- [49]. Clausen J. 03. Disruption Management in Passenger Transportation—from Air to Tracks. In *7th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS'07) 2011*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik.
- [50]. Hasanzadeh, M. and Bashizade, R., 2021. Optimizing University Course Timetable Using Local Search Methods. *Soft Computing Journal*, 1(1), pp.24-31. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223707.1391.1.1.111.8>
- [51]. Daneshpour, N., 2021. Optimizing Process of Data Extraction, Transformation and Load in Data Warehouse Based on Parallel Processing. *Soft Computing Journal*, 4(2), pp.18-31. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223707.1394.4.2.55.5>
- [52]. Mohammadpour, M., Minaei, B. and Parvin, H., 2021. Introducing a new meta-heuristic algorithm based on See-See Partridge Chicks Optimization to solve dynamic optimization problems. *Soft Computing Journal*, 8(2), pp.38-65. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223707.1398.8.2.3.1>