



دانشگاه کاشان
University of Kashan

مجله محاسبات نرم

SOFT COMPUTING JOURNAL

تارنمای مجله: scj.kashanu.ac.ir



طراحی مدلی پایدار برای مساله زمان‌بندی قطارهای متروی تهران با رویکرد بهینه‌سازی استوار[♦]

داود جعفری^۱، کارشناسی ارشد، مهران خلیج^۱، دانشیار، پژمان صالحی^{۱*}، استادیار

^۱ دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پرند، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۸ آذر ماه ۱۴۰۱

پذیرش ۳۱ شهریور ماه ۱۴۰۲

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی استوار

مساله جداول زمان‌بندی

ناوگان قطارها

متروی تهران

در این تحقیق، هدف ارائه یک الگوی بهینه برای مساله زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای حمل‌ونقل ریلی درون شهری در مطالعه موردی متروی تهران است، لذا کوشیده شده است یک رهیافت جدید بر مبنای اصول و مفاهیم استواری برای حل مساله 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 مدت زمان انتظار در سکوها 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 رویکردهای 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 متغیرهای 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 به دست آمده از نیمه جنوبی خط یک متروی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به دست آمده از آن ارائه شده است.

© ۱۴۰۲ نویسندگان. مقاله با دسترسی آزاد تحت مجوز CC-BY

۱. مقدمه

که می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر کارایی حرکات مسافری داشته باشد [۱]. در شبکه ریلی درون شهری (مترو)، سیر و حرکت قطارها بر اساس یک جدول زمان‌بندی از پیش تعیین شده انجام می‌گیرد که خود شامل مولفه‌هایی نظیر زمان اعزام و دریافت قطارها در ایستگاه‌ها (گره‌های) 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

قابلیت اطمینان و وقت‌شناسی در نظام ترافیک شبکه ریلی درون شهری از جمله شاخص‌های کلیدی موفقیت به شمار می‌روند

♦ نوع مقاله: پژوهشی

* نویسنده مسئول

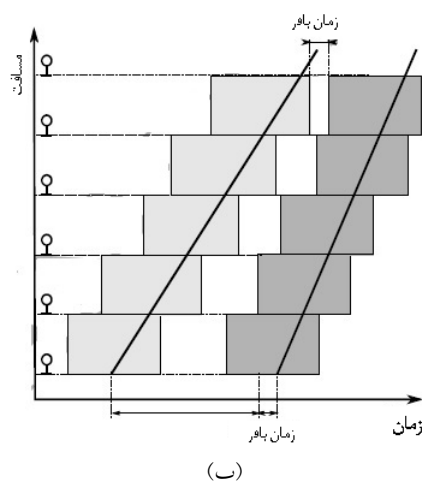
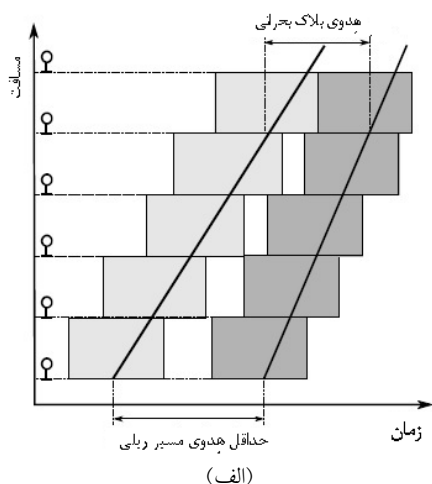
پست(های) الکترونیک: djafari5071@yahoo.com (جعفری)

mehran5_k@hotmail.com (خلیج)

pejmansalehi.metro@gmail.com (صالحی)

نحوه ارجاع به مقاله: داود جعفری، مهران خلیج، پژمان صالحی، «طراحی مدلی پایدار برای مساله زمان‌بندی قطارهای متروی تهران با رویکرد بهینه‌سازی استوار»، مجله محاسبات نرم، جلد ۱۳، شماره ۱، صفحات ۹۵-۷۶، بهار و تابستان ۱۴۰۳.

بکارگیری زمان بافر (میانگیر) جذب اختلالات و انحراف‌های زمانی قطار از جدول زمان‌بندی اولیه تنظیم شده و جلوگیری از انتشار تاخیر به قطارهای بعدی است که به صورت متوالی در مسیر ریلی در حرکت هستند [۶].



شکل (۱): نمودار (الف) سیر و حرکت قطارها با حداقل سرفاصله ممکن؛
نمودار (ب) زمان سیر قطارها به انضمام بافر اضافه شده به جدول زمان‌بندی.

افزایش تقاضای روزافزون برای استفاده از مترو در مسافرت‌های درون شهری ضرورت بهینه‌سازی آن برای پاسخگویی مطمئن و ایمن به نیازها در بازه‌های زمانی مختلف و مقابله با تاخیرهای احتمالی در تردد قطارها را آشکار ساخته است [۷]. پیچیدگی‌های زمانی بالا در الگوهای ارتقا و توسعه جداول زمان‌بندی حرکت قطارها یک بارقه مهم برای حصول مدل‌های استوار است که

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 فرآیند سیر و حرکت قطارها، سبب کاهش ترمزهای غیرضروری و شتاب‌گیری‌های مکرر قطار در مسیرهای متضاد و نظایر آن می‌شود، بنابراین در یک جدول زمان‌بندی پویا لازم است تفکیک قطارها با حداقل سرفاصله زمانی امکان‌پذیر شود. حداقل سرفاصله میان قطارها با توجه به اصول توسعه 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 فرآیند سیر و حرکت قطارها، ممکن است باعث بروز تاخیر یا انحراف از برنامه زمان‌بندی تعیین شده، گردد که در نتیجه اجرای دقیق جدول زمانی از پیش طراحی شده را تقریباً ناممکن می‌سازد. علاوه بر آن در شبکه‌های ریلی شلوغ و پرتردد اثر تاخیر 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 تنظیم شده است، انتقال می‌یابد [۴]. از این رو محققان به منظور ارتقای سطح استواری شبکه ریلی و برای جلوگیری از انتشار تاخیر در فرآیند سیر و حرکت قطارها، زمانی را به عنوان بافر در سرفاصله زمانی (هدوی^۱) به صورت تصاعدی لحاظ می‌نمایند. استفاده از زمان‌های بافر (میانگیر) به عنوان یک گزینه مطلوب می‌تواند در فاز بازیابی جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در شبکه مترو استفاده شود به طوری که از طریق جذب تاخیرها سبب جلوگیری از تجمع و انتشار آثار آن در کل شبکه گردد [۵].

شکل (۱) نشان می‌دهد که چگونه زمان‌های بافر بین فواصل زمانی سیر و حرکت قطارها درج و اضافه می‌شود. هدف از

¹ Head way

بتوان از طریق آن بهبود ساختار جداول زمانی^۱ 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 و بروز تاخیرهای اولیه در یکی از قطعات شبکه مترو را سبب شود، بهره‌گیری از زمان بافر برای پایداری برنامه زمان‌بندی از پیش طرح‌ریزی شده ضرورت می‌یابد [۸].

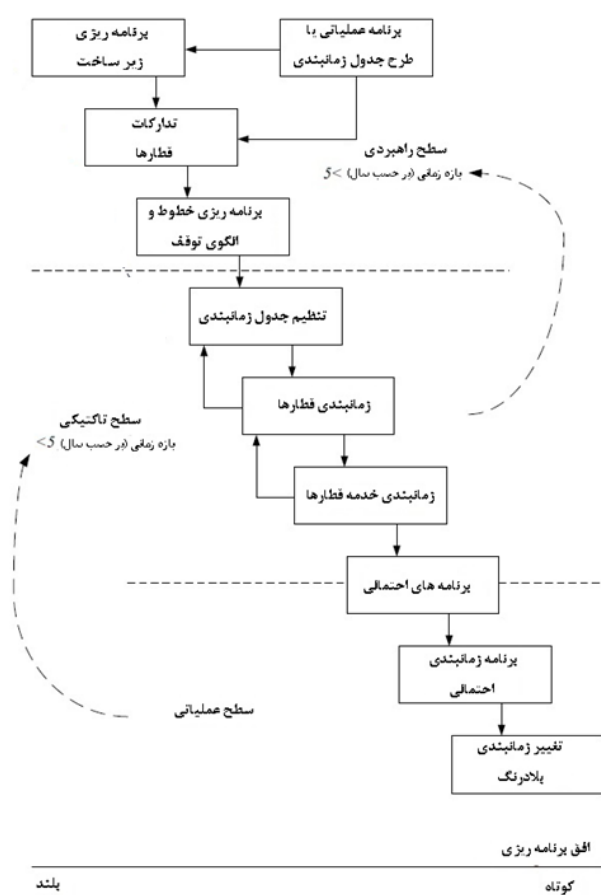
با این حال رهیافت استفاده از زمان‌های بافر احتمال طولانی شدن زمان سفر و عدم استفاده کامل از ظرفیت ناوگان قطارها و ایستگاه‌ها را افزایش می‌دهد، به‌علاوه وجود زمان‌های اضافی در جدول زمانی خود نشان‌دهنده از دست رفتن مستقیم و غیرمستقیم بخشی از منابع موجود در شبکه است. لذا استفاده از زمان‌های بافر می‌تواند یک مولفه نامطلوب در برنامه‌ریزی فنی طراحی جداول زمان‌بندی باشد [۹]. برای هر دنباله معین از قطارها در شبکه مترو، وقفه‌های زمانی لحاظ شده در برنامه زمان‌بندی را می‌توان به عنوان باقیمانده فرآیند طرح‌ریزی پس از انجام محاسبات فشرده‌سازی، تدقیق نموده و به عنوان یک بافر زمانی ذخیره شده در بانک‌های اطلاعاتی مسیرهای مترو برای مقابله با اعوجاج‌های احتمالی جداول استفاده نمود [۱۰]. حال با توجه به آنکه حل مسائل برنامه‌ریزی سیر و حرکت قطارها در شبکه مترو در زمره تصمیمات راهبردی به شمار می‌آید، لذا بهره‌گیری از شیوه‌های مرسوم «پژوهش عملیاتی» نظیر رویکردهای برنامه‌ریزی خطی می‌تواند در شناسایی گوشه‌های بهینه جداول زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه مترو موثر باشد [۱۱]. 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 کنترل‌کننده ترافیک تعیین می‌شود، به طور عمده 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 راهکارهای کتتری به منظور مواجهه با پیچیدگی‌های زمانی کنش‌های ترافیک در سیر و اعزام قطارها فراهم می‌نماید. از این رو در مطالعه حاضر محققان به منظور 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 چارچوب و خط‌مشی‌های بهبود فرآیند زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها و دوم بررسی آثار و نتایج پیاده‌سازی رویکردهای استوار در برنامه‌ریزی جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای مترو است. از این رو 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 به طور مشخص یکی از جنبه‌های خاص تازگی در این تحقیق که آن را ویژه نموده، لحاظ نمودن متغیر ظرفیت و تعارض خطوط ریلی است.

در طی سال‌های اخیر حل مسائل برنامه‌ریزی زمانی در مترو از طریق مدل‌های استوار به منظور ارتقای کیفیت کنترل‌کننده‌های 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 تاخیرها و یا مقاوم بودن در برابر اغتشاش‌های برنامه‌ریزی نشده ناوگان و مسیر ریلی است [۱۲]. استفاده از مدل‌های استواری می‌تواند امکان اتخاذ عکس‌العمل‌های مناسب در انحراف‌های مرتبط با برنامه‌ریزی زمان‌بندی حرکت قطارها را از طریق ارائه ابزارهای مناسب به منظور 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 درون شهری (مترو)،

^۱ Time tables

بکارگیری 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 طبیعی از طریق راهکردهای بهینه^۳ می‌تواند محدودیت‌های ناشی از اثر تجمعی و پراکندگی^۴ خطوط را تا حد مطلوبی پوشش دهد [۱۶]. در شکل (۲)، نمودار شماتیک مراحل برنامه‌ریزی و طراحی جداول زمان‌بندی حرکت قطارهای مترو نشان داده شده است.



شکل (۲): فرآیند و مراحل برنامه‌ریزی ناوگان قطارها و مسیر در شبکه ریلی مترو

در مطالعه‌ای بریمبرگ^۵ و همکاران (۲۰۰۲)، محققان استواری را توانایی حفظ کیفیت خروجی (محصول و خدمت) در طول بازه‌های زمانی متوالی یا زمان‌های مورد نیاز برای تکامل

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 تفاسیل هدف اصلی تحقیق حاضر طراحی و تبیین مدلی برای برنامه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها در خطوط متروی تهران به گونه‌ای است که با استفاده از اصول استواری بازگشت به شرایط طبیعی 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 به طور معمول در طرح اولیه خود به صورت یک جدول زمان‌بندی سالانه تنظیم شده 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 به صورت روزانه تغییر یافته و بر اساس میزان تقاضای مسافری شبکه بازتولید شود [۱۳]. لذا بهینه‌سازی اعزام و دریافت‌های متوالی قطارها در شبکه ریلی می‌تواند با هدف بهبود زمان سیر، کاهش سرفاصله زمانی حرکت قطارها و مدیریت اصولی تردد قطارها به ویژه در مواقع بروز اغتشاش^۱ 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 به گونه‌ای متناسب فراهم شود [۱۴]. در رویکردهای مرسوم از طریق تخصیص مقدار معینی از بافرهای زمانی^۲ کوشیده می‌شود استواری برنامه‌های زمان‌بندی در مواجهه با انحراف‌های جزئی از جداول زمانی اسمی از طریق معادلات عمومی حاکم بر چارچوب‌های استواری به گونه‌ای بهبود یابد که برنامه بتواند از طریق لحاظ نمودن تقاضاهای برنامه‌ریزی شده و برنامه‌ریزی نشده ترافیک سیر و حرکت ناوگان قطارها را مدیریت نماید [۱۵]. در برخی برنامه‌های کاربردی برای تنظیم جداول زمان‌بندی حرکت قطارها از طریق

^۳ Optimal alternatives

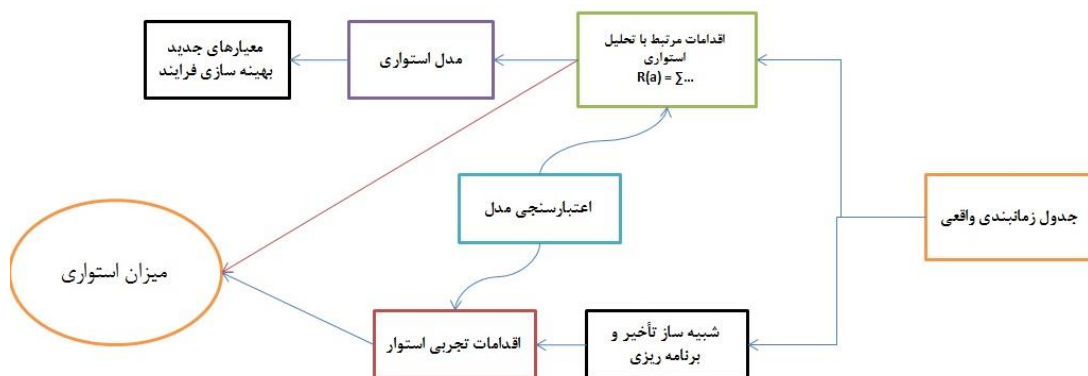
^۴ Effect Aggregation and dispersion

^۵ Brimberg

^۱ Disturbance

^۲ Buffer times

در شبکه ریلی لازم است گزینه‌هایی با سطح معینی از استحکام به دست داده شود به گونه‌ای که با وجود 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 فرآیند 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 به منظور رفع اثرات تاخیرهای احتمالی میسر نمایند [۲۱]. شکل (۳) میزان استواری جداول زمان‌بندی واقعی حرکت قطارهای مترو را با توجه به اقدامات تجربی و معتبر در یک سیستم شبیه‌سازی نشان می‌دهد.



شکل (۳): میزان استواری جداول زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه مترو بر اساس کنش‌های تجربی و تحلیل تاخیر

مدل‌سازی زیرساخت‌ها با سطوح کافی از جزئیات است. از این رو محققان در مطالعات مختلف برای به دست آوردن جزئیات کافی از ساختارهای میکروسکوپی^۳ برای نشان دادن زیرساخت‌های ریلی و ارتباطات میان آنها استفاده نموده‌اند [۲۲]. در یک مدل میکروسکوپی تسهیلات و زیرساخت‌های ثابت و متحرک ریلی و تمامی عناصر کلیدی مرتبط با آن از طریق راس‌ها (گره‌ها) و یال‌ها (مسیر ریلی میان گره‌ها) در یک ساختار گرافیکی به گونه‌ای 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 [۲۳].

در برخی از مطالعات نظیر لیچن و مورینگ^۱ (۱۹۹۹) به منظور بهینه‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها به تدقیق مولفه‌های 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 نظریه گراف‌ها^۲ و به شکل انتزاعی مفهومی از کارکرد تسهیلات ثابت و متحرک شبکه ریلی برای پیاده‌سازی در مدل‌های کامپیوتری به عنوان بخش‌های پایه‌ای در شبیه‌سازی عملکرد سامانه‌های وظیفه‌ای مترو مانند ناوگان، زیرساخت و رفتار مسافری به دست داده می‌شود. تمرکز عمومی این تحقیقات بر

¹ Liebchen & Möhring

² Graph theory

³ Microscopic structures

با توجه به شکل (۴)، در مراحل مختلف برنامه‌ریزی فنی شبکه مترو، انبوه فراوان و پراکنده‌ای از داده‌های ترافیکی موجود خواهد بود و لذا یک گزینه بهره‌گیری از شیوه‌های مدل‌سازی به‌گونه‌ای است که بتوان از یک مدل میکروسکوپی استفاده نمود که به صورت خودکار داده‌های تولید شده در مدل ماکروسکوپی را برای بهبود کمی و افزایش دقت محاسباتی مورد استفاده قرار دهد [۲۹]. بنابراین مقصود از جایگزینی مدل‌های ماکروسکوپی با مدل‌های مزوسکوپی، آزمون و اعتبارسنجی خروجی‌های به دست آمده از یک مدل ماکروسکوپی است که می‌تواند برای تعیین و تجزیه و تحلیل چند مقیاسی مراحل عملیاتی سیر و حرکت قطارها در شبکه ریلی مترو مورد استفاده قرار گیرد. در مدیریت عملیات خطوط ریلی، افق برنامه‌ریزی‌ها کوتاه‌تر، جزئیات بیشتر و کمیت داده‌های کیفی در دسترس، بالاتر است که در نتیجه بهره‌گیری از یک مدل میکروسکوپی را امکان‌پذیر می‌نماید [۳۰]. بنابراین استفاده از این شیوه و مقایسه الگوها یاد شده با هم کمک می‌کند که علاوه بر مدل‌سازی زیرساخت‌های ثابت و متحرک مترو، داده‌های ناوگان قطارها و ظرفیت و رفتار مسافری را برای مدل‌سازی عملیات سیر و حرکت قطارها و طراحی و پیاده‌سازی جداول زمان‌بندی به طور بهنگام^۴ مورد استفاده قرار داد. در جدول (۱) ضمن تبیین مدل‌های اخیر به مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل‌های ارائه شده در سایر مطالعات اخیر پرداخته شده است.

۳. روش انجام تحقیق

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

۱. مفاهیم اصلی پژوهش در قالب مجموعه‌ای از توابع هدف، متغیرهای تصمیم و متغیرهای عددی تبیین‌پذیر هستند.
۲. خروجی‌های فرآیند تحقیق به صورت کمی، استاندارد و تکرارپذیر هستند.
۳. تحلیل‌ها، یافته‌ها و نتیجه‌گیری‌های تحقیق در قالب مفاهیم و مقادیر ریاضی قابل بیان هستند.

در این نوع مدل‌ها تدقیق مختصات فنی متغیرهای اساسی نظیر راس‌ها 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 نظیر تعمیرات خط و ناوگان، کوپلینگ قطارها، توقف‌های اعمالی توسط سامانه سیگنالینگ^۱ در مسیر ریلی و از این دست 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 [۲۴]. بنابراین به منظور رفع نقاط ضعف مترتب بر مدل‌های میکروسکوپی می‌توان به طور همزمان از الگوهای ماکروسکوپی^۲ نیز بهره گرفت [۲۵]. این مدل‌ها برخلاف مدل‌های میکروسکوپی دارای سطح مطلوبی از انتزاع بوده و در آن محاسبات مرتبط با تعداد یال‌ها و راس آنها تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و از این رو روند کاهشی مزبور، مدل را بر اساس تخصیص اوزان گره‌ها (ایستگاه‌ها) به عنوان راس‌های گراف و مسیرهای حرکتی به عنوان یال‌های آن برای درک منطقی و پیاده‌سازی ساده‌تر می‌نماید و دقت خروجی‌های مدل را نیز تا حد قابل قبولی افزایش می‌دهد [۲۶]. داده‌های مرتبط با یال‌ها (مسیرهای حرکتی قطار) به طور معمول 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، به عنوان یک مدل ساختاری مزوسکوپی^۳ مورد بررسی قرار گیرند [۲۷]. چنین مدلی در همه سطوح بدون درگیر شدن در پیچیدگی‌های محاسباتی همانند مدل‌های میکروسکوپی و با برخورداری از گستردگی الگوهای ماکروسکوپی می‌تواند به صورت شماتیک جزئیات و انتزاع خاص رفتار سیستم را نمایش دهند [۲۸].

^۱ Signaling system

^۲ Macroscopic models

^۳ Mesoscopic structural model

^۴ Upgrade

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

منبع	مساله، نوع اختلال و تابع هدف	معیارهای ارزیابی	رویکردهای مدیریت اختلال	مدل، روش حل و نوآوری
[۲۸]	مساله: کنترل اختلالات در شبکه مترو نوع اختلال: مسدودی موقتی خطوط ریلی تابع هدف: زمان سفر قطارهای مسافری	N - - ✓	الگوی توقف-عبور و گردش قطارها در شبکه	مدل: MILP روش حل: B&B نوآوری: مدل‌سازی یکپارچه استراتژی‌های مدیریت اختلال
[۳۱]	مساله: مدیریت اختلال‌های برنامه‌ریزی نشده مترو نوع اختلال: مسدودی خطوط تابع هدف: زمان انتظار مسافری در ایستگاه‌ها	L - - ✓	توقف موقت قطارها در مسیر و گردش قطار	مدل: NLIP روش حل: C&B نوآوری: ارائه راهکارهای قابل پیاده‌سازی در شبکه مترو
[۳۲]	مساله: مدیریت اختلال مترو اختلال: تغییرات تقاضای سفر در فصول مختلف سال تابع هدف: کل زمان سفر قطارها	L ✓ - ✓	استراتژی توقف-عبور	مدل: MINLP روش حل: رویکرد استواری نوآوری: طراحی یک الگوی استوار برای استراتژی توقف عبور
[۱۹]	مساله: همزمانی قطارها در مترو اختلال: تاخیر قطارها تابع هدف: زمان سفر و تعویض خط	N - - ✓	تغییرات زمان‌های سیر و توقف قطارها در شبکه مترو	مدل: MILP روش حل: GA نوآوری: توسعه مدل جدید برای حل مساله زمانبندی مجدد قطارها در شبکه
[۳۳]	مساله: بهینه‌سازی الگوی توقف عبور اختلال: - تابع هدف: زمان سفر قطار در مسیر	L - - ✓	الگوی توقف عبور	مدل: MILP روش حل: روش تولید ستون نوآوری: ترکیب مدل زمانبندی و الگوی توقف-عبور
[۳۴]	مساله: زمانبندی قطارهای مترو اختلال: تغییرات تقاضای سفر تابع هدف: مصرف انرژی زیاد و افزایش زمان سفر	L ✓ - ✓	ایجاد تغییر در زمان‌های ورود و خروج	مدل: مدل بهینه‌سازی تصادفی قطارها روش حل: برنامه‌ریزی پویای تقریبی نوآوری: در نظر گرفتن همزمانی عدم قطعیت و پویایی تقاضای سفر
مسافری	مساله: مدیریت اختلال در خطوط راه‌آهن شهری اختلال: مسدودی موقتی خطوط تابع هدف: متوسط زمان‌های انتظار و سفر مسافرین	L ✓ ✓ ✓	۱. تلفیق توقف-عبور و گردش قطار ۲. تلفیق زمانبندی مجدد و الگوی توقف-عبور	مدل: MILP روش حل: VNS نوآوری: در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان سیر قطارها، مدت اختلال سفر
	مساله: زمانبندی قطارهای راه‌آهن شهری در شرایط عدم قطعیت اختلال: تقاضای سفر تابع هدف: متوسط و واریانس زمان انتظار هر مسافر در ایستگاه و سکوها	L ✓ - ✓	استواری	مدل: برنامه‌ریزی استوار روش حل: SAA نوآوری: استوارسازی برنامه زمانبندی حرکت قطارها

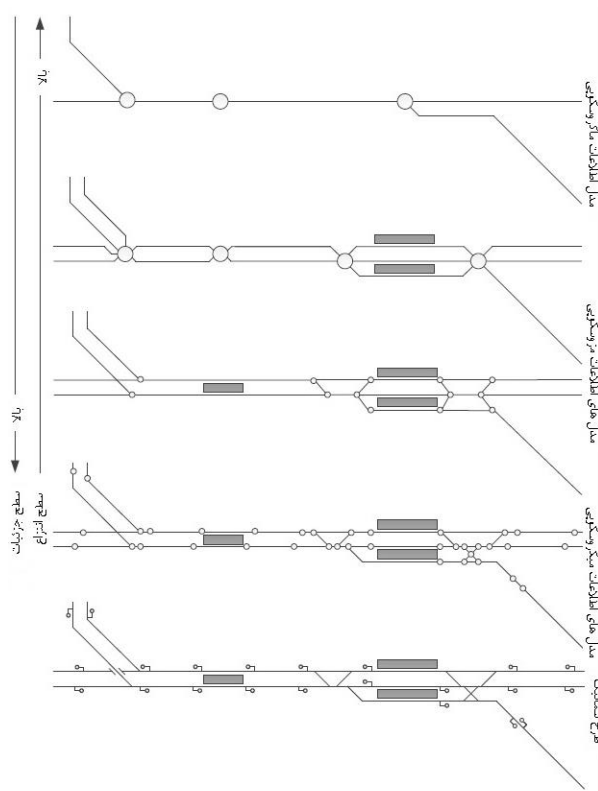
جدول (۱): تبیین مدل‌های اخیر و مقایسه به نتایج مدل پیشنهادی در حوزه برنامه ریزی مجدد جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها

منبع	مساله، نوع اختلال و تابع هدف	روش حل	رویکردهای مدیریت اختلال	مدل، روش حل و نوآوری
فیل پیشینه ندی	مساله: زمان‌بندی اولیه حرکت قطارها اختلال: - تابع هدف: متوسط زمان انتظار مسافری	L - - - ✓ -		مدل: MILP و MINLP روش حل: GVNS نوآوری: مدل جدید برای مساله زمان‌بندی حرکت قطارها در شرایط کمبود ظرفیت قطارها و تقاضای پویای سفر

تحقیق شامل طراحی مدل مفهومی^۱، بیان قضیه‌های ریاضی قابل استفاده در تدوین جداول زمان‌بندی مترو، شبیه‌سازی و در نهایت مطالعه موردی در متروی تهران است. برای حل مساله جداول زمان‌بندی حرکت قطارهای مترو از رویکردهای مرسوم برنامه‌ریزی خطی در ذیل شیوه‌های پژوهش عملیاتی استفاده می‌شود و علت این امر آن است که بر طبق مطالعات پیشین می‌توان در فضای یک روابط معتبر ریاضی، شرایط غیرقطعی و احتمالی را مدل نمود [۳۵].

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 دوخطه متروی تهران و برای بازه زمانی روزانه با تعداد معینی قطار انجام می‌شود.
- تقاضای سفر برای خط‌های رفت و برگشت یک مسیر دوخطه در متروی تهران مستقل از یکدیگر فرض می‌گردد.
- جداول زمان‌بندی حرکت قطارها در متروی تهران به صورت غیردوره‌ای 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 آماده به خدمت برای



شکل (۴): نمودار طرح شماتیک الگوی پیشنهادی و مقایسه آن با مدل‌های میکروسکوپی، مزوسکوپی و ماکروسکوپی برای مطالعه موردی شبکه مترو

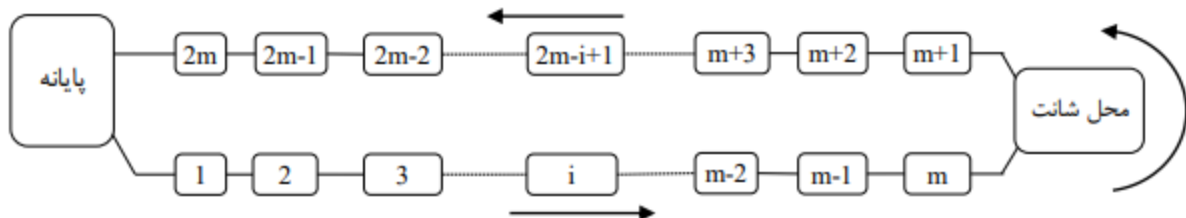
با توجه به کمی بودن ماهیت تحقیق حاضر استفاده از روش‌های ریاضی و آماری برای پیاده‌سازی این تحقیق امری ضروری است. رویکرد تحقیق حاضر از نوع کاربردی است، چرا که هدف اصلی آن ایجاد ارتباط میان مفاهیم نظری علم پژوهش عملیاتی با یک مساله کاربردی در صنعت مترو است. روش انجام این

¹ Conceptual reaserch

کردن 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 بر می‌گیرد که در حالت کلی به شکل رابطه (۱) بیان می‌شود [۳۶].

$$\begin{aligned} \text{Max } \sum x \\ \text{s.t.: } Ax \leq b \\ 1 \leq x \leq u \end{aligned} \quad (1)$$

یک مسیر دوخطه در شبکه مترو در شکل (۵) نشان داده شده است. چنانکه در این شکل مشاهده می‌شود به استثنای 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 مجدد به پایانه‌ها بازمی‌گردند. به عنوان مثال یک خط مترو که در آن ناوگان قطارها دارای n رام قطار است، به ازای یک رام قطار مانند k به طوری که $1 \leq k \leq n$ باشد به ازای هر اعزام از مبدأ یک واحد به k اضافه می‌شود.



شکل (۵): نمودار اعزام و دریافت قطارها در پایانه‌ها و گره‌های طول مسیر ریلی

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. 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 قابل محاسبه است و همچنین با استفاده

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 (پال‌های) 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 متغیر زمان تغییر می‌کند، از این رو لازم است در مدل پیشنهادی، ظرفیت به عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری با جداول زمان‌بندی حرکت قطارها انطباق داشته باشند. برخی متغیرهای تصمیم مورد بررسی در تحقیق حاضر عبارتند از زمان دریافت و اعزام قطار از هر ایستگاه و طول مسیر به طوری که از ظرفیت‌های موجود به بهترین شکل برای کمینه

به منظور مدل‌سازی جداول زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در مسیر ریلی و ایستگاه‌ها، برخی متغیرها مورد نیاز است که مهمترین آنها عبارتند از حجم و نرخ مسافری، تعداد قطارهای ناوگان مسیر ریلی، ورودی‌های سکو و درب قطارها، طول قطار و سکو، نقاط دسترسی تعبیه شده 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

از داده‌های تجمیعی الگوی ماکرو/مزووسکوپی می‌توان روایی مدل پیشنهادی را بررسی نمود.

یکی از عوامل کلیدی موفقیت^۱ برای برپایی^۲ جداول زمان‌بندی مستحکم، بهره‌گیری از شیوه‌های شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی ظرفیت ناوگان و خطوط ریلی است که در آن اکتساب حداقل سرفاصله زمانی حرکت قطارها مورد نظر بوده و به طور مستقیم نیز بر ظرفیت قطارها در هر ساعت و در جهت تاثیر می‌گذارد. مدل‌سازی انسدادهای غیر برنامه‌ریزی شده خطوط ریلی در حال حاضر رایج‌ترین رهیافت برای کنترل اعوجاج‌های جداول زمان‌بندی از حالت اسمی آن برای سامانه‌های کنترل و سیگنالینگ است [۳۷]. در این سامانه‌ها زمان‌های انسداد برنامه‌ریزی نشده خطوط ریلی اصطلاحاً به آن دسته از بازه‌های زمانی اطلاق می‌گردد که در آن یک قطار مشخص به طور انحصاری بخش خاصی از قطعات^۳ ریلی را بیش از زمان تعیین شده 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 این رو 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. بر اساس مطالعه کاپرارا^۴ (۲۰۰۶) که از بررسی گزارش‌های فنی ارسالی از سیستم‌های ریلی شرکت کنور برمز^۵ (سازنده سامانه ترمز قطارهای متروی تهران) به دست آمده، اعمال ترمزهای مکانیکی برای قطارهای مترو به طور متوسط ۲۷ تا ۵۷ ثانیه، ترمزهای الکترودینامیکی^۶ حدود ۱۲ ثانیه و ترمزهای الکتریکی^۳ ۳ ثانیه طول می‌کشد که لازم است در مدل‌سازی لحاظ شود [۳۸]. همچنین زمان مشاهده سیگنال توقف توسط راهبر قطار در مسیر

ریلی تا عکس‌العمل و اعمال ترمز، بر اساس مطالعات زمان‌سنجی فرآیندی حدود سه ثانیه‌ای است که در معادلات مساله لحاظ می‌گردد [۳۸]. 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 به طور معمول برای قطارهای مترو این مهم دارای بزرگی 0.6 m/s^2 می‌باشد که در این بین عدم محاسبه دقیق شتاب ترمزی به عنوان یکی از محدودیت‌های سرعت برای سیر وسایل نقلیه در خطوط ریلی به شمار می‌رود [۳۸]. 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 مدت زمانی 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 مبدا آغاز مسافت ترمزی خواهد بود. لذا جانمایی سیگنال‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بر سرفاصله زمانی حرکت قطارها تاثیر می‌گذارد. به عنوان مثال در ساز و کارهای تبادلات متناوب و پیوسته پیام، سامانه سیگنالینگ در هر ۵۰ تا ۳۵۰ متر با متوسط فاصله ترمزی ۲۰۰ متر برای قطارهای مترو بروزرسانی‌های منظم داده‌های مسیر را صورت می‌دهد. از این رو استقرار یک سیستم سیگنالینگ کابین^۷ با قابلیت بروزرسانی 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 مانند سرعت سیر، طول قطار و همچنین طول

¹ Key Success Factors

² Set up

³ Blocks

⁴ Caprara

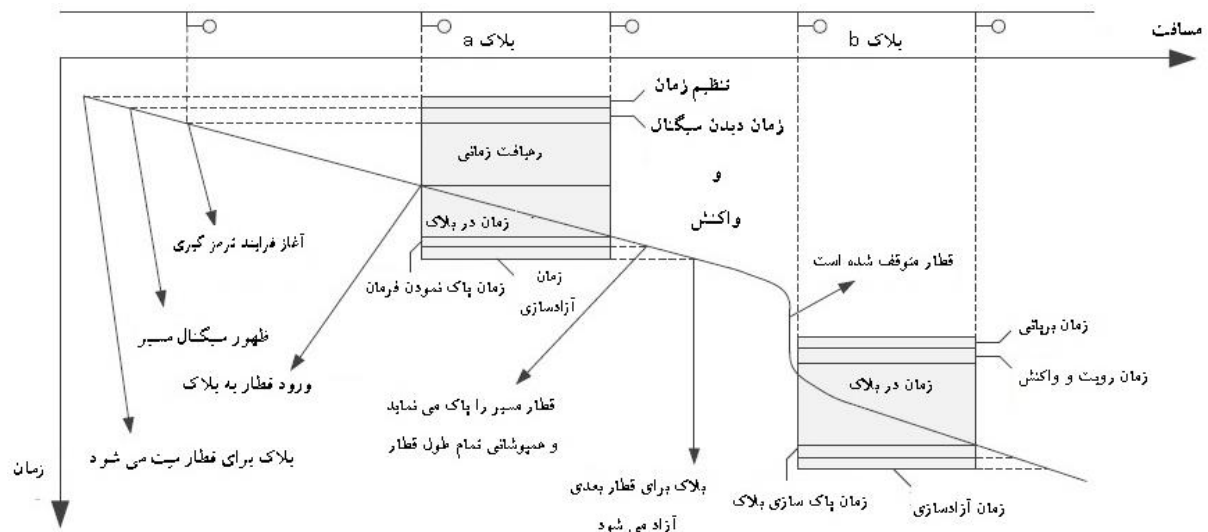
⁵ Knorr-Bremse

⁶ Electrodynamic brakes

⁷ Cab signaling

متغیرها و محدودیت‌های مدل در یک نمودار «مسافت-زمان» ترسیم شده است. در این شکل، 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 به طور مستمر مبادله می‌شود.

حاشیه فاصله ایمنی بستگی دارد که برپایی آن در متروی تهران به طور معمول 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 (International Union of Railways) مطابقت دارد [۳۱]. در شکل (۶) فرآیندهای اشغال و آزادسازی قطعات ریلی (بلاک‌ها)،



شکل (۶): فرآیندهای اشغال و آزادسازی بلاک‌ها (قطعات ریلی) توسط یک قطار خاص با لحاظ متغیرها و محدودیت‌های مدل

نمادهای مدل ریاضی تحقیق حاضر شامل متغیرها و مجموعه محدودیت‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. مساله برنامه‌ریزی زمان‌بندی سیر و حرکت قطارهای مترو معادل مسائلی نظیر مکان‌یابی تسهیلات با لحاظ محدودیت‌های عرضه و ظرفیت می‌باشد [۳۹]. از این رو برخی محققان نظیر کانکا^۱ و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعات خود نشان داده‌اند که مسائل زمان‌بندی سیر و حرکت قطارها در زمره مسائل NP-hard قرار می‌گیرد و بنابراین با توجه به پیچیدگی‌های محاسباتی غالباً روش‌های فراابتکاری برای حل آن در ابعاد واقعی پیشنهاد می‌شوند [۴۰].

۴. یافته‌ها و بحث

انتشار تاخیر در ایستگاه‌های مترو به سطح کارکردی تسهیلات ثابت و متحرک در مسیر ریلی وابسته است. بروز تاخیر پیامد ارزیابی قرار دهد.

۴. یافته‌ها و بحث

انتشار تاخیر در ایستگاه‌های مترو به سطح کارکردی تسهیلات ثابت و متحرک در مسیر ریلی وابسته است. بروز تاخیر پیامد

^۱ Canca

می‌شوند. زیرساخت ایستگاه متروی شاهد در شکل (۷) 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 حداقل‌سازی سرفاصله زمانی میان قطارها معادله (۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۴]:

$$h_{ij} = \max(t_{be,i(k)} - t_{bb,i(k)}) \quad \forall k \in B \quad (2)$$

در این معادله k یک قطعه ریلی (بلاک) از میان مجموعه 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. معادله (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 (۳) بیان می‌شود.

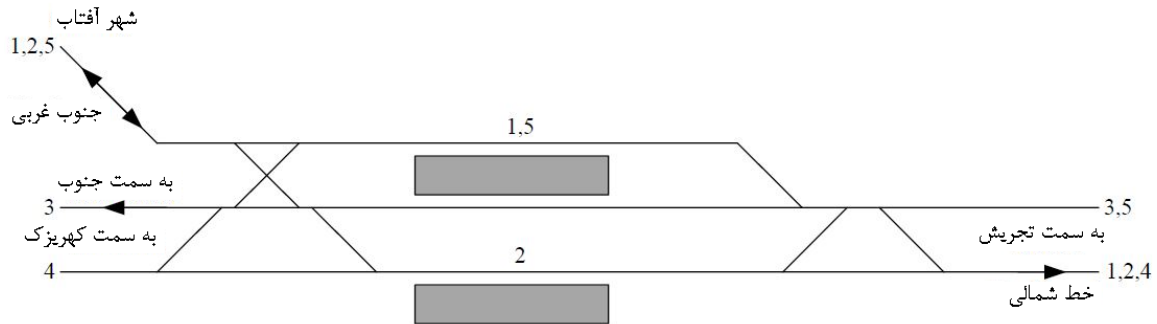
$$\varphi_n = \sum_{i,j \in R} c_{ij} \times \frac{1}{N} \quad (3)$$

رابطه (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 (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 به نسبت زیاد بوده و از طرفی نیز به عدد یک که حداکثر کران محسوب می‌شود، نزدیک‌تر است.

جدول (۲): نمادهای مدل ریاضی تحقیق شامل متغیرها و مجموعه محدودیت‌ها

نماد	توضیح
K	قطعه ریلی (بلاک) خاص از میان مجموعه‌ی قطعات موجود
B	مسیر حرکتی قطار
I	مجموعه قطارهای برنامه‌ریزی شده جهت اعزام $I = \{1, 2, \dots, 2m\}$
T	مجموعه نقاط زمانی در افق برنامه‌ریزی $T = \{t_0, \dots, t_0 + p_\alpha\}$
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) مبدا و مقصد
n	اندازه ناوگان
φ_n	تعداد مسیرهای ممکن برای تعداد n رام قطار از یک ایستگاه
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
φ_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 k و j
q_{jk}	بزرگی تعارض میان قطارهای k و j 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

در ایستگاه تبادلی متروی شاهد در خط یک از مسیر تجریش به سمت کهریزک، خط متروی درون شهری به سمت خطوط حومه‌ای (شهر آفتاب و فرودگاه امام خمینی) و به‌عکس همگرا



شکل (۷): مسیرهای اصلی عملیات عادی سیر و حرکت قطارها در ایستگاه تبادلی شاهد

تجمعی ترکیب مسیرها از طریق جایگشت مسیرهای ممکن و با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\varphi_p = \sum_{(i,j) \in R} (p_{ij} \cdot c_{ij}) \times \frac{1}{\sum_{(i,j) \in R} p_{ij}} \quad (5)$$

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 [۴۳].

با توجه به مطالعات بارنا و همکاران زمان اشغال هر قطعه ریلی (بلاک) از مسیر توسط هر قطار با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۴۲]:

$$f_{ij} = \frac{p_{ij} \times c_{ij}}{\varphi_p} \times h_{ij} \quad (6)$$

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

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

$$t_o = \varphi_p \times n \times \sum_{(i,j) \in S} f_{ij} \quad (7)$$

معادله ارائه شده توسط بارنا^۱ و همکاران در قالب رابطه (۴) امکان به دست آوردن احتمال بروز تعارض میان قطارها را ارائه می‌نماید که به شرح زیر بیان می‌شود [۴۲]:

$$P_{ij} = \frac{n_i - n_j}{n^2} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، n_i ناظر بر تعداد قطارهایی است که از مسیر i استفاده می‌نمایند 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 رابطه فوق برای یک روز عادی هفته بین ساعات ۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰ برای قطارهای فعال در مسیر در جدول (۳) محاسبه شده است.

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

مسیر دوم	مسیر نخست				
	$n_1 = 1$	$n_2 = 2$	$n_3 = 3$	$n_4 = 4$	$n_5 = 5$
$n_1 = 1$	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴
$n_2 = 2$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲
$n_3 = 3$	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۶
$n_4 = 4$	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۶
$n_5 = 5$	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴

همچنین احتمال بروز اعوجاج با توجه میزان استواری جداول زمان‌بندی 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

¹ Barrena

تاخیرهای غیرمنفی 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 (۹) می‌باشد:

$$F(v; \lambda) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (9)$$

در این رابطه، متغیر λ برای تعیین مجموعه معینی از داده‌های تاخیر مسیر ریلی به صورت نمایی بیان شده است که مقدار آن با توجه به تحقیق دی شوتر^۱ و همکاران [۲۴] و با استفاده از رابطه (۱۰) به شرح زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{1}{E[X]} \quad (10)$$

مقدار امید ریاضی برای متغیر تصادفی X برابر میانگین حسابی داده‌های تاخیر است که به صورت نمایی توزیع در مخرج رابطه (۱۰) آمده است. در این تحقیق برای تحلیل داده‌ها به ویژه در حالت‌های بروز اغتشاش در خطوط ریلی از اطلاعات زمانی ساعات اوج مسافری در بازه ساعت ۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰ برای شرایط دارای تاخیر منفی و غیرمنفی ثبت شده در بانک اطلاعات ترافیکی ایستگاه متروی شاهد به صورت توانمند بهره گرفته شد. مجموعه مرتبط با تاخیر 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 (۵) آورده شده است.

با توجه به اطلاعات جدول (۵)، برای قطار ۵۱۳ که یک مثال نقض که میانگین تاخیر اعزام آن کمتر از مقدار تاخیر دریافت است، می‌توان چنین توجیه نمود که یک دلیل توقف‌های طولانی و حدود پنج دقیقه‌ای قطار مزبور در منطقه شانت (تعویض خط) در ایستگاه شاهد به سمت ایستگاه تجریش از سوزن‌های سمت کهریزک و شهر آفتاب است که در این حالت امکان کاهش مقدار تاخیر و در نتیجه زمان سیر قطار فراهم می‌شود. همچنین با بررسی سایر داده‌های دو جدول قبلی می‌توان دریافت که میانگین تاخیر قطار شماره ۳۱۹ از میانگین

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

مسیر دوم	مسیر نخست				
	$n_1 = 1$	$n_2 = 2$	$n_3 = 3$	$n_4 = 4$	$n_5 = 5$
$n_1 = 1$	۲۶	۲۶	۱۰/۳	۹/۷	۶/۹
$n_2 = 2$	۲۶	۲۶	۱۰/۳	۷/۷	۶/۹
$n_3 = 3$	۱۰/۳	۱۰/۳	۳۳/۱	-	۱۵/۴
$n_4 = 4$	۷/۷	۷/۷	-	۲۳/۱	-
$n_5 = 5$	۶/۹	۶/۹	۱۵/۴	-	۱۰/۳

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 (۸) به دست می‌آید:

$$\varphi_w = \frac{t_o}{T} \quad (8)$$

با استفاده از این رابطه میزان انحراف از جداول زمانی اسمی برای ایستگاه متروی شاهد ۰/۳۸ به دست می‌آید. همچنین یافته‌های به دست آمده از تابع توزیع احتمال با توجه به تحلیل طیف داده‌های جمع‌آوری شده، نشان می‌دهد که بروز تاخیر در ایستگاه مقصد لزوماً به مجموع تمامی تاخیرهای رخ داده در طول مسیر حرکتی بستگی ندارد. بنابراین در برخی تحقیقات توصیه شده است تاخیرهای غیرمنفی در محاسبات تابع توزیع احتمال لحاظ شود زیرا به دست آمدن خروجی‌های منفی نشان می‌دهد که تاخیرها واقعی نیستند. از این رو در برخی مطالعات پیشین ورودی‌های غیرمنفی تاخیرها را از طریق یک توزیع نمایی توصیف نموده‌اند [۴۴]. یافته‌های به دست آمده در تحقیق حاضر تا حدود زیادی با نتایج مطالعه [۴۴] که نشان می‌دهد در حالت کلی توزیع وایبل بیشترین تناسب را با احتمال بروز تاخیرهای ورودی و خروجی‌های منفی قطارها در جداول زمان‌بندی دارد، انطباق دارد. در برخی مطالعات نیز بر استفاده از توزیع‌هایی تاکید شده است که از انعطاف‌پذیری بیشتری برای مواجهه با تاخیرها برخوردار است. به عنوان مثال در مطالعه [۳۰]، پوتوف و همکاران یک توزیع نمایی برای یافتن تاخیرهای خطوط ریلی پیشنهاد کرده‌اند که می‌تواند پایه‌ای برای توصیف

¹ De Schutter

توقف دومرحله‌ای به منظور نشان دادن توالی قطارها در مسیر ریلی مترو ارائه نمود که می‌تواند امید ریاضی تاخیرهای 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 (۱۱) ارائه نماید:

$$\bar{F}_{ij}(x) = 1 - F_{ij}(x) \quad (11)$$

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

$$S_{ij} = \{(t_{j1}^b, h_{j1}^m, q_{j1}), \dots, (t_{jk}^b, h_{jk}^m, q_{jk}), \dots, (t_{jm}^b, h_{jm}^m, q_{jm})\} \quad (12)$$

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} به انضمام زمان بافر نگاشت می‌گردد. زمان بافر تخصیص یافته به قطار j در رابطه (۱۳) نشان داده شده است.

$$t_{jj}^b = T - h_{jj}^m \quad (13)$$

زمان بافر برای قطارهای مفروض و متوالی k در مسیر ریلی b در دوره زمانی T به صورت t_{jk}^b نمایش داده شده و از طریق رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$t_{jk}^b = \begin{cases} (arr_k - arr_j) - h_{jk}^m & \text{if } arr_j < arr_k \\ (arr_k - arr_j) - h_{jk}^m + T & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

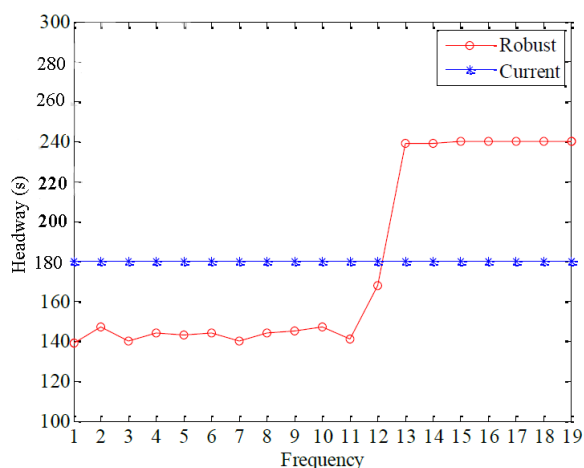
در رابطه فوق arr_k زمان رسیدن قطار k به یک قطعه ریلی خاص در مسیر b و arr_j زمان رسیدن قطار j به همان نقطه است. علاوه بر این در رابطه (۱۴) فرض بر این بوده است که جدول زمان‌بندی در هنگام برنامه‌ریزی اولیه حالت عدم وجود اختلال در قطعه ریلی و نرمال بودن شرایط را پوشش می‌دهد که در این صورت مقدار به دست آمده به معنی غیرمنفی بودن مقادیر محاسبه شده در نقطه t_{jk}^b است. جدول (۶) خروجی‌های مدل پیشنهادی (حداقل سرفاصله زمانی و زمان بافر) را برای

کل تاخیرهای اعزام و دریافت ایستگاه شاهد بیشتر است که می‌توان دلیل آن را چنین توضیح داد که برخی قطارها به صورت سریع‌السير بوده و ایستگاه‌های طول مسیر خط یک را بدون توقف طی می‌نمایند و این در حالی است که با مطالعه داده‌های ترافیکی درمی‌یابیم که 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، خطر بروز تعارض در مسیر ریلی افزایش می‌یابد. بهره‌گیری از بافر سبب بهبودهای کوچکی از طریق افزایش زمان بافر در جایگزین‌های مرتبط با شاخص‌های استواری در مسیر ریلی می‌گردد [۴۵].

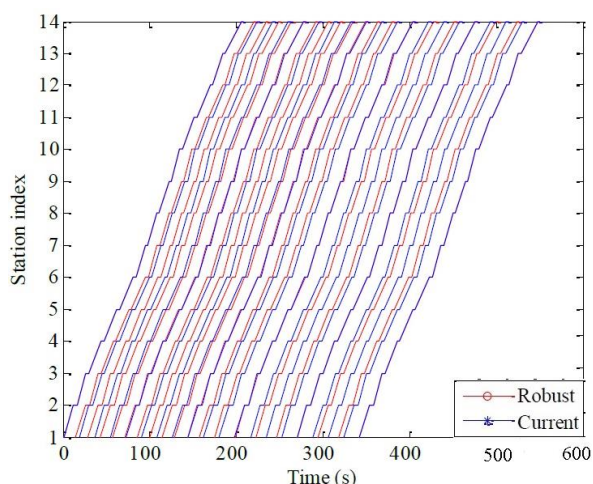
جدول (۵): نمایش اعوجاجات قطارها برای ایستگاه متروی شاهد در بازه زمانی ۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰

شماره قطار اعزامی/دریافتی	مقدار میانه برحسب ثانیه	میانگین برحسب ثانیه	انحراف معیار برحسب ثانیه	بیشتر از یک دقیقه و کمتر از سه دقیقه	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 در نظر گرفتن ادبیات موضوع برای ارائه یک مدل تصمیم‌گیری در تحقیق حاضر می‌توان یک طرح دنباله‌ای برای توزیع زمان‌های



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



شکل (۹): مقایسه جدول زمانبندی فعلی در متروی تهران با جدول زمانبندی پیشنهادی در تحقیق بر اساس رویکرد استوار برای ایستگاه‌های جنوبی خط

۵. نتیجه‌گیری

عوامل غیرقطعی متعددی ممکن است فرآیند سیر و حرکت قطارها را متاثر 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

قطارهای i و j و قطار مفروض k در مسیرهای منتهی به قطعات ریلی ایستگاه متروی شاهد را نشان می‌دهد.

جدول (۶) 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 کمینه کردن 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.

جدول (۶): 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

در شکل (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 (۱۵:۰۰ تا ۱۶:۰۰) در سرفاصله‌های زمانی مختلف (از ۳ تا ۶ دقیقه) ترسیم شده است. همچنین از منظر شرایط ترافیکی چنانچه در یک بازه زمانی ۱۰۰ تا ۶۰۰ ثانیه‌ای 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 پیردازیم، شکل (۹) گویای نتایج این مقایسه خواهد بود.

است که سبب شد مساله 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 به عنوان یک راه‌حل مطلوب در این بخش از طریق شبیه‌سازی دنبال گردید. در مدل پیشنهادی رابطه میان ورودی‌ها و خروجی‌های مساله، 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.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافعی ندارند.

برای دوره‌های زمانی مختلف باشد، در نتیجه به عنوان عوامل اغتشاش در فرآیندهای 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 تاخیر برای جداول زمانی ارائه شده در مطالعات داده‌های ترافیکی تا سال ۱۳۹۹ نشان می‌دهد که قطارها با تاخیر به نسبت 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 تاخیر قطار اعزامی از ایستگاه شاهد در مقایسه با تاخیرهای 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 تاخیرها را با استفاده از زمان‌های بافر با تقریب بالا جذب نماید. بنابراین برای حل مساله 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

مراجع

- [1] L. Zhang, P. Hou, and D. Qiang, "Transit-Oriented Development in New Towns: Identifying Its Association with Urban Function in Shanghai, China," *Buildings*, vol. 12, no. 9, p. 1394, 2022, doi: 10.3390/buildings12091394.
- [2] G. Caimi, L.G. Kroon, and C. Liebchen, "Models for railway timetable optimization: Applicability and applications in practice," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol. 6, no. 4, pp. 285-312, 2017, doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.11.002.
- [3] M. Tamnai, "Rescheduling of train movement in two-track rail routes," PhD thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, 2013 [In Persian].
- [4] T. Albrecht, "Automated timetable design for demand-oriented service on suburban railways," *Public Transp.*, vol. 1, no. 1, pp. 5-20, 2009, doi: 10.1007/s12469-008-0003-4.
- [5] P.-A. Andersson and G.-P. Scalia-Tomba, "A mathematical model of an urban bus route," *Transp. Res. Part B: Methodol.*, vol. 15, no. 4, pp. 249-266, 1981, doi: 10.1016/0191-2615(81)90011-4.
- [6] S. Zhan, S.C. Wong, Q. Peng, and S.M. Lo, "Passenger-oriented Railway Timetable Rescheduling in a Complete Blockage," in 14th Int. Conf. Adv. Syst. Public Transp. (CASPT), Brisbane Convention Centre, Brisbane, Australia, 2018, pp. 1-20.
- [7] N. Ahmadi Asl, R. Effatnejad, M. Hedayati, and P. Hajihosseini, "Introducing a new scheme for demand

- response of a smart residential community with a variety of demand response models,” Karafan J., vol. 20, no. 3, pp. 311-339, 2023, doi: 10.48301/KSSA.2021.287832.1547 [In Persian].
- [8] M. Goerigk and A. Schobel, Algorithm engineering in robust optimization, in *Algorithm Engineering*, pp. 245-279, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-49487-6_8.
- [9] M.R. Amin-Naseri and V. Baradaran, “Accurate Estimation of Average Waiting Time in Public Transportation Systems,” *Transp. Sci.*, vol. 49, no. 2, pp. 213-222, 2015, doi: 10.1287/trsc.2013.0514.
- [10] Y. Yue, S. Wang, L. Zhou, L. Tong, and M.R. Saat, “Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors,” *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.*, vol. 63, pp. 126-146, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2018.12.007.
- [11] H. Gong, X. Chen, L. Yu, and L. Wu, “An application-oriented model of passenger waiting time based on bus departure time intervals,” *Transp. Plan. Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 424-37, 2016, doi: 10.1080/03081060.2016.1160583.
- [12] G. Laporte, J.A. Mesa, and F. Perea, “A game theoretic framework for the robust railway transit network design problem,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 44, no. 4, pp. 447-459, 2010, doi: 10.1016/j.trb.2009.08.004.
- [13] M.S. Visentini, D. Borenstein, L.Q. Li, and P.B. Mirchandani, “Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services,” *J. Sched.*, vol. 17, no. 6, pp. 541-567, 2014, doi: 10.1007/s10951-013-0339-8.
- [14] N. Ghaemi, R.M. Goverde, and O. Cats, “Railway disruption timetable: Short-turnings in case of complete blockage,” in *IEEE Int. Conf. Intell. Rail Transp. (ICIRT)*, Birmingham, UK, 2016, pp. 210-218, doi: 10.1109/ICIRT.2016.7588734.
- [15] S. Shen and N.H. Wilson, “An Optimal Integrated Real-time Disruption Control Model for Rail Transit Systems,” in *Computer-Aided Scheduling of Public Transport. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol. 505, Springer, Berlin, Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-642-56423-9_19.
- [16] J.D. Schmocker, S. Cooper, and W. Adeney, “Metro service delay recovery: comparison of strategies and constraints across systems,” *Transp. Res. Record J.*, vol. 1930, no. 1, pp. 30-37, 2005, doi: 10.3141/1930-04.
- [17] J. Brimberg, E. Korach, M. Eben-Chaim, and A. Mehrez, “The Capacitated p-facility Location Problem on the Real Line,” *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 8, no. 6, pp. 727-738, 2002, doi: 10.1111/1475-3995.t01-1-00334.
- [18] N. Askari and M.H. Taheri, “Numerical Investigation of a MHD Natural Convection Heat Transfer Flow in a Square Enclosure with Two Heaters on the Bottom Wall,” *Karafan J.*, vol. 17, no. 1, pp. 97-114, 2020, doi: 10.48301/kssa.2020.112759.
- [19] K. Yang, Y. Lu, L. Yang, and Z. Gao, “Distributionally robust last-train coordination planning problem with dwell time adjustment strategy,” *Appl. Math. Model.*, vol. 91, pp. 1154-1174, 2021, doi: 10.1016/j.apm.2020.10.035.
- [20] A. D’Ariano, F. Corman, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, “Reordering and local rerouting strategies to manage train traffic in real time,” *Transp. Sci.*, vol. 42, no. 4, pp. 405-419, 2008, doi: 10.1287/trsc.1080.0247.
- [21] F. Corman, A. D’Ariano, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, “Dispatching and coordination in multi-area railway traffic management,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 44, pp. 146-160, 2014, doi: 10.1016/j.cor.2013.11.011.
- [22] X.J. Eberlein, N.H.M. Wilson, and D. Bernstein, “Modeling Real-Time Control Strategies In Public Transit Operations,” in *Computer-Aided Transit Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol. 471, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999, doi: 10.1007/978-3-642-85970-0_16.
- [23] M. Clerc and J. Kennedy, “The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, 2002, doi: 10.1109/4235.985692.
- [24] B. De Schutter, T. van den Boom, and A. Hegyi, “Model predictive control approach for recovery from delays in railway systems,” *Transp. Res. Record*, vol. 1793, no. 1, pp. 15-20, 2002, doi:

- 10.3141/1793-03.
- [25] M. Hasanzadeh and R. Bashizade, "Optimizing University Course Timetable Using Local Search Methods," *Soft Comput. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 24-31, 2012, doi: 20.1001.1.23223707.1391.1.1.111.8 [In Persian].
- [26] P.D. Site and F. Filippi, "Service optimization for bus corridors with short-turn strategies and variable vehicle size," *Transp. Res. Part A Policy Practice*, vol. 32, no. 1, pp. 19-38, 1998, doi: 10.1016/S0965-8564(97)00016-5.
- [27] N. Daneshpour, "Optimizing Process of Data Extraction, Transformation and Load in Data Warehouse Based on Parallel Processing," *Soft Comput. J.*, vol. 4, no. 2, pp.18-31, 2016, doi: 20.1001.1.23223707.1394.4.2.55.5 [In Persian].
- [28] X. Luo, T. Tang, J. Yin, and H. Liu, "A robust mpc approach with controller tuning for close following operation of virtually coupled train set," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 151, p. 104116, 2023, doi: 10.1016/j.trc.2023.104116.
- [29] X. Luo, Y. Jiang, Z. Yao, Y. Tang, and Y. Liu, "Designing Limited-Stop Transit Service with Fixed Fleet Size in Peak Hours by Exploiting Transit Data," *Transp. Res. Record*, vol. 2647, no. 1, pp. 134-141, 2017, doi: 10.3141/2647-16.
- [30] D. Potthoff, D. Huisman, and G. Desaulniers, "Column generation with dynamic duty selection for railway crew rescheduling," *Transp. Sci.*, vol. 44, no. 4, pp. 493-505, 2010, doi: 10.1287/trsc.1100.0322.
- [31] Y. Lu, L. Yang, H. Yang, H. Zhou, and Z. Gao, "Robust collaborative passenger flow control on a congested metro line: A joint optimization with train timetabling," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 168, pp. 27-55, 2023, doi: 10.1016/j.trb.2022.12.008.
- [32] A. Brochard, W. Pasillas-Lepine, and B. Demaya, "Cascaded Train Speed Regulation: Robustness to Feedback Delay and Measurement Filtering," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 34, pp. 126-131, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.11.319.
- [33] Y. Wang, J. Chen, Y. Qin, and X. Yang, "Timetable rescheduling of metro network during the last train period," *Tunn. Underground Space Technol.*, vol. 139, p. 105226, 2023, doi: 10.1016/j.tust.2023.105226.
- [34] V. Cacchiani, J. Qi, and L. Yang, "Robust optimization models for integrated train stop planning and timetabling with passenger demand uncertainty," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 136, pp. 1-29, 2020, doi: 10.1016/j.trb.2020.03.009.
- [35] C.E. Cortes, D. Saez, F. Milla, A. Nunez, and M. Riquelme, "Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 757-769, 2010, doi: 10.1016/j.trc.2009.05.016.
- [36] Y. Wang, B. De Schutter, T.J.J. van den Boom, B. Ning, and T. Tang, "Efficient bilevel approach for urban rail transit operation with stop-skipping," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 6, pp. 2658-2670, 2014, doi: 10.1109/TITS.2014.2323116.
- [37] R.A. Chapman, H.E. Gault, and L.A. Jenkins, *Factors affecting the operation of urban bus routes*, Newcastle-Upon-Tyne University, England, 1981, issn: 0306-3402.
- [38] A. Caprara, M. Monaci, P. Toth, and P.L. Guida, "A Lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem," *Discret. Appl. Math.* Vol. 154, no. 5, pp. 738-753, 2006, doi: 10.1016/j.dam.2005.05.026.
- [39] Z. Cao, Z. Yuan, and D. Li, "Estimation method for a skip-stop operation strategy for urban rail transit in China," *J. Mod. Transp.*, vol. 22, pp. 174-182, 2014, doi: 10.1007/s40534-014-0059-6.
- [40] D. Canca, E. Barrena, E. Algaba, and A. Zarzo, "Design and analysis of demand-adapted railway timetables," *J. Adv. Transp.*, vol. 48, no. 2, pp. 119-137, 2014, doi: 10.1002/atr.126.
- [41] L. Cadarso, A. Marin, and G. Maroti, "Recovery of disruptions in rapid transit networks," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 53, pp. 15-33, 2013, doi: 10.1016/j.tre.2013.01.013.
- [42] E. Barrena, D. Canca, L.C. Coelho, and G. Laporte, "Exact formulations and algorithm for the train timetabling problem with dynamic demand," *Comput. Oper. Res.*, vol. 44, pp. 66-74, 2014, doi: 10.1016/j.cor.2013.11.003.
- [43] R.L. Burdett and E. Kozan, "A disjunctive graph

model and framework for constructing new train schedules,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 200, no. 1, pp. 85-98, 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2008.12.005.

[44] G. Maroti, “A branch-and-bound approach for robust railway timetabling,” *Public Transp.*, vol. 9, no. 1-2, pp. 73-94, 2017, doi: 10.1007/s12469-016-0143-x.

[45] M. Mohammadpour, B. Minaei, and H. Parvin, “Introducing a new meta-heuristic algorithm based on See-See Partridge Chicks Optimization to solve dynamic optimization problems,” *Soft Comput. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 38-65, 2020, doi: 10.22052/8.2.38 [In Persian].