زمان‌بندی مجدد قطارهای راه‌آهن شهری مبتنی بر تغییر الگوی توقف-عبور در شرایط ازدحام مسافر

سیداکبر غلامیان*، مربی، دانشگاه پیام نور، گروه مهندسی صنایع، صندوق پستی، تهران- ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Gholamian@pnu.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۰- پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۳۴۶-۳۲۳

چکیده

امروزه، راه‌آهن شهری نقش کلیدی در حمل‌ونقل عمومی شهرهای بزرگ ایفا می‌کند چراکه این نوع سیستم حمل‌ونقل در مقایسه با سایر شیوه‌های متداول حمل‌ونقل همگانی دارای ظرفیت حمل‌ونقل و راندمان بالا در ارائه خدمات به حجم قابل‌توجهی از مسافرین است. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه با تلفیق رویکرد زمانبندی مجدد و الگوی توقف-عبور در شرایط ازدحام مسافر بعد از اتمام اختلال ارائه شده است. این مدل بر اساس نرخ ورود مسافر وابسته به زمان، جریان حرکت مسافرین را بر اساس برنامه زمان‌بندی شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به پیچیدگی مسائل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها، یک الگوریتم ابتکاری تولید جواب، مبتنی بر رویکرد تجزیه مسئله، ارائه گردید. اعتبارسنجی مدل زمانبندی مجدد به کمک آزمایش‌های عددی و بر اساس داده‌های عملیاتی از خطوط راه‌آهن شهری تهران و پکن انجام شده است. بر اساس نتایج مدل زمان‌بندی مجدد، با افزایش مجموع زمان سفر قطارها به میزان کمتر از ۱٪ می‌توان ازدحام مسافرین در خط ۵ راه‌آهن شهری تهران را حدود ۳۵٪ کاهش داد. با توجه به ضرورت عکس‌العمل سریع بعد از اختلال، الگوریتم زمان‌بندی مجدد از کارایی لازم برخوردار است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که حتی در مسائل با ابعاد بزرگ، رویکرد حل مسئله دارای کیفیت جواب مناسب و زمان محاسباتی قابل‌قبولی بوده که این موضوع نشان‌دهنده کارایی آن در برنامه‌ریزی مجدد قطارهای راه‌آهن شهری است.

واژه‌های کلیدی: راه‌آهن شهری، تقاضای سفر، زمان‌بندی مجدد قطارها، ازدحام مسافر

۱-مقدمه

یکی از وظایف اصلی سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی، از جمله راه‌آهن شهری، ارائه خدمات مقرون به صرفه و کارآمد حمل‌ونقل به کاربران است (Beirão and Cabral 2007). ناکارآمدی سامانه‌های حمل‌ونقل موجب افزایش زمان انتظار و سفر مسافران خواهد شد. یکی از مشکلات برنامه‌ریزی در خطوط راه‌آهن شهری، وجود عدم‌قطعیت‌ها و نیز بروز اختلال است (Canca et al. 2016). بروز اختلال موجب افت قابلیت اطمینان، افزایش هزینه‌های عملیاتی و کاهش سطح رضایت‌مندی مسافرین می‌شود (Visentini et al. 2013). بروز اختلال در راه‌آهن شهری بطور مستقیم بر جریان تردد مسافرین تأثیرگذار است. در شرایط اختلال، از استراتژی‌های کنترلی جهت حداقل کردن تأثیر منفی اختلال استفاده می‌شود. پیاده‌سازی استراتژی‌های کنترلی، تحت عنوان مدیریت اختلال نامیده شده است (Clausen 2007). به دلیل رقابت بین انواع شیوه‌های حمل‌ونقل عمومی، بهبود اثربخشی عملیات در راه‌آهن شهری به یک ضرورت اساسی تبدیل شده است (Kabasakal, Kutlar, and Sarikaya 2013). علی‌رغم اینکه سامانه‌های راه‌آهن شهری (مانند متروی زیرزمینی) سامانه‌های حمل‌ونقل سریع و ایمن هستند، بهبود مدیریت جریان مسافر در شرایط اختلال کماکان یک ضرورت جدی است. برنامه‌ریزی جدول زمانی قطارها در راه‌آهن شهری عمدتاً طی فرآیندهای سنتی انجام می‌شود که

این موضوع باعث انعطاف‌ناپذیری و ناکارآمدی در برنامه‌ریزی عملیاتی شده است. بدیهی است، رضایت مسافر با کاهش سرفاصله (افزایش تواتر اعزام) افزایش می‌یابد. از طرفی کاهش سرفاصله زمانی موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی شرکت‌های راه‌آهن می‌شود. زمان‌بندی حرکت قطارهای راه‌آهن شهری، یک فرآیند پیچیده است. جهت مؤثر نمودن این فرآیند لازم است الگوهای متغیر با زمان و تصادفی تقاضای مسافر، محدودیت ناوگان در دسترس و مجموعه‌ای از مقررات و ملاحظات سیر و حرکت در نظر گرفته شود (Niu and Zhou 2013). تغییرات زمان انتظار در طول مسیر موجب کاهش سطح خدمات و در نتیجه کاهش مطلوبیت استفاده از سیستم حمل‌ونقل ریلی می‌شود. بر این اساس، به حداقل رساندن واریانس زمان انتظار مسافرین نیز حائز اهمیت است (Kang et al. 2014). در سیستم راه‌آهن زیرزمینی کلان‌شهر تهران، روزانه اختلالات کوچک و بزرگی رخ می‌دهند که موجب تأخیر در حرکت قطارها، افزایش هزینه‌های کنترل سیستم و افت سطح خدمت ارائه شده به مسافرین می‌شود. بر اساس اطلاعات و آمار موجود از راه‌آهن شهری تهران، اختلالات مختلفی با ریشه مسافری و زیرساختی در شبکه‌های راه‌آهن شهری رخ می‌دهند. خرابی ناوگان، زیرساخت (کنترل و علائم) و مسافر از علل اصلی بروز اختلال هستند. ذکر این نکته ضروری است که ازدحام مسافری می‌تواند یک عامل اختلال و نیز به عنوان نتیجه حاصل از بروز یک اختلال دیگر، تأثیر مهمی بر نحوه برنامه‌ریزی عملیات حمل‌ونقل ریلی دارد. با توجه به شرایط گفته شده از راه‌آهن شهری، ضرورت تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

-برآورده‌سازی اهداف کوتاه‌مدت و بلندمدت برنامه‌ریزی راه‌آهن شهری

-لزوم ارتقای بهره‌وری عملیات حمل‌ونقل راه‌آهن شهری در شرایط عادی (نرمال) و اختلال

-صرفه‌جویی در زمان سفر مسافرین با حفظ هزینه‌های عملیاتی

-اهمیت مدیریت جریان مسافر در شرایط اختلال

مدیریت مؤثر اختلال می‌تواند صرفه‌جویی در زمان سفر مسافرین، کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران تاخیرات، افزایش ایمنی سفر و بهبود سطح خدمت را به همراه داشته باشد. در این مقاله یک مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها جهت کاهش ازدحام مسافر بعد از رخداد اختلال ارائه می شود. راهکار انتخابی برای مدیریت جریان مسافر، بهینه سازی الگوی توقف–عبور حرکت قطارها در ایستگاه ها است. در این استراتژی، قطارها بدون توقف در ایستگاه‌های که توقف برای آن‌ها برنامه‌ریزی شده است، حرکت می‌کنند. در این استراتژی باید ارتباط مؤثری بین مسافرین در داخل و خارج قطار انجام شود. به کمک این استراتژی، امکان حرکت سریع‌تر قطار و پر کردن خلأ بوجود آمده در سرفاصله زمانی بین قطارها وجود دارد. در نتیجه نوآوری اصلی تحقیق حاضر در ارائه یک مدل برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطارها در مسیرهای دوخطه ریلی با استراتژی توقف–عبور و با هدف کمینه کردن زمان سفر قطارها و تعداد مسافرین منتظر در ایستگاه‌ها است.

۲–پیشینه تحقیق

علی‌رغم اهمیت موضوع، تحقیقات بسیار محدودی در حوزه مدیریت اختلال راه‌آهن شهری انجام شده است. در تحقیقی از چانگ و تیا (۱۹۹۶)، به زمان‌بندی مجدد حرکت قطارهای راه‌آهن سریع‌السیر در شرایط لحظه‌ای به کمک یک رویکرد سیستم خبره فازی پرداخته شده است. کاربرد این مدل برای زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها پس از افزایش ناگهانی جریان مسافر است. به طور خاص، این مدل از رویکرد کنترل‌گر فازی رویداد–محور برای پیش‌بینی عملیات قطار استفاده می‌کند. مطالعات شبیه‌سازی این مدل، اثربخشی آن را در شرایط اختلالات ناگهانی جریان مسافر نشان می‌دهند (Chang and Thia, 1997). در تحقیقی از کانگ و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل برنامه‌ریزی مجدد با هدف کاهش تأخیر قطارها در شبکه‌های حمل‌ونقل راه‌آهن شهری ارائه شده است. این مدل سعی در هماهنگ‌سازی زمان‌های ورود و خروج قطارها در ایستگاه‌های تقاطعی دارد بطوریکه بتواند اثر تاخیرات پیش‌بینی نشده در عملیات قطارها را خنثی نماید. این مسئله در عملیات و مدیریت شبکه‌های حمل‌ونقل راه‌آهن شهری به دلیل پیچیدگی‌های بالا در هماهنگی میان خطوط ریلی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مدل برای به حداقل رساندن انحراف بین جدول زمانی اصلی و

جدول زمان‌بندی مجدد از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج یک مطالعه موردی از شبکه حمل‌ونقل راه‌آهن پکن نشان می‌دهد که مؤثرترین راه برای بازیابی جدول زمانی تنظیم سیر قطارها است. درصورتی‌که تأخیر اولیه بصورت قابل ملاحظه‌ای طولانی نباشد، مدل پیشنهادی می‌تواند اثر تأخیر را خنثی نماید (Kang et al. 2015). در تحقیقی از جمیلی و قریشی نژاد (۲۰۱۵) مدلی برای بازیابی برنامه عملیات قطار شهری در شرایط اختلال ارائه شده است. در این مدل دو معیار از جمله (۱) زمان کل سفر از مسافران و (۲) تقاضای برآورده نشده، در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه تقاضای پوشش داده نشده، روابط جدیدی ارائه شده است. در این مدل، الگوهای بهره‌برداری بر اساس شرایط اختلال تنظیم شده است. با توجه به نتایج مطالعه موردی کارایی روش پیشنهادی در راه‌آهن شهری کرج به اثبات رسیده است (Jamili and Nejad 2015). در تحقیقی از یین و همکاران (۲۰۱٦) از روش برنامه‌ریزی پویای تقریبی، برای زمان‌بندی مجدد حرکت قطارهای راه‌آهن استفاده شده است. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی برای زمان‌بندی مجدد حرکت قطارهای راه‌آهن شهری ارائه شده است. در این مدل، صرفه‌جویی در مصرف انرژی قطارها، کاهش زمان تأخیر و زمان سفر مسافران، هزینه‌های عملیاتی و نیز تاخیرات قطارها به عنوان معیارهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. فرض شده است که تقاضای مسافر بصورت غیرقطعی و وابسته به زمان است. به عبارتی نرخ ورود مسافرین به ایستگاه یک فرآیند پوآسون ناهمگن با نرخ متغیر با زمان (بر اساس ماتریس تقاضای مبدا–مقصد) در نظر گرفته شده است. الگوریتم تقریبی پیشنهادی، توانسته است راه‌حل‌هایی با کیفیت بالا در یک زمان نسبتاً کوتاه به دست آورد (Yin et al. 216). از بین راهکارهای مدیریت اختلال، الگوی توقف–عبور قطارها در ایستگاه‌ها از کاربرد و مقبولیت بیشتری در مقایسه با سایر استراتژی‌ها برخوردار است. الگوی توقف–عبور مزایایی نظیر کاهش زمان سفر قطارها و کاهش زمان انتظار مسافرین را به همراه دارد. در تحقیقی از وانگ و همکاران (۲۰۱٤) یک رویکرد دوسطحی کارآمد برای بهینه‌سازی الگوهای توقف–عبور قطارهای راه‌آهن شهری با در نظر گرفتن تقاضای مبدأ– مقصد مسافرین ارائه شده است. این مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط فرموله شده است. توابع هدف مدل شامل به حداقل رساندن زمان سفر کل مسافران و مصرف انرژی قطارها است. رویکرد پیشنهادی مبتنی بر یک مدل ریاضی است که شامل عملیات قطار در انتهای مسیر (پایانه‌ها) و نیز در ایستگاه‌های بین‌راهی می‌شود. عملکرد این رویکرد دوسطحی کارآمد با سایر رویکردهای دوسطحی موجود در پیشینه تحقیق مقایسه شده است. علاوه بر این، مقایسه‌ای بین استراتژی توقف–عبور بهینه با استراتژی توقف کامل انجام شده است (Wang et al. 2014). کائو و همکاران (۲۰۱٤) یک روش تقریبی برای بهینه‌سازی الگوهای توقف–عبور در حمل‌ونقل ریلی شهری ارائه کرده‌اند. یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح با سه هدف شامل به حداقل رساندن انتظار و سفر زمان همه مسافران و زمان سفر قطارها ارائه و با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه حل شده است. در نهایت، این مدل به عنوان مطالعه موردی در شبکه حمل‌ونقل ریلی شهری چین بکار گرفته شده است. نتایج حاکی از این است که رویکرد پیشنهادی قادر به بهینه‌سازی جداول زمانی حرکت قطارها و بهره‌برداری بهینه از عملیات است (Cao, Yuan, and Li 2014). در تحقیقی از لی و همکاران (۲۰۱٤) مدلی برای بهینه‌سازی الگوهای توقف–عبور در عملیات راه‌آهن شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. با استفاده از انعطاف‌پذیری الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، این مدل قادر به در نظر گرفتن شرایط واقعی مانند حالت‌های مختلف دسترسی، سناریوهای توقف و توابع هدف مختلف است. اعتبارسنجی این پژوهش روی داده‌های واقعی از خط شماره ٤ راه‌آهن شهری سئول در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از پیاده‌سازی الگوی توقف–عبور بهینه، کل زمان سفر قطارها حدود ۱۷ الی ۲۰ درصد کمتر از حالتی است که تمامی قطارها در ایستگاه‌ها توقف داشته باشند. این در حالی است که بسته به محدودیت‌های مربوط به الگوی توقف–عبور، زمان سفر در حدود ۲۰ الی ۲٦ درصد کاهش داشته و زمان‌های انتظار، تعویض خط و دسترسی مسافرین حدود ۲٤ الی ۳۸٪ افزایش یافته است (Lee, Shariat, and Choi 2014). نیو و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح غیرخطی جهت به حداقل رساندن زمان‌های انتظار مسافر ارائه کرده‌اند. در این مدل، الگوهای

توقف–عبور قطارها در شرایط تقاضای پویا به عنوان ورودی مدل در نظر شده است. کارایی و اثربخشی مدل‌های پیشنهادی روی نمونه مسائلی از راه‌آهن چین مورد بررسی قرار گرفته است (Niu, Zhou, and Gao 2015). ژائو و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل برای طراحی بهینه الگوهای گردش و مسیریابی قطارها در شبکه حمل‌ونقل راه‌آهن شهری از نوع Y–شکل ارائه نموده‌اند (Zhao et al. 2016). این نوع شبکه‌ها، به دلیل شکل خاص تقاضای مسافر، از یک خط اصلی و چند خط انشعاب تشکیل شده‌اند. این نوع خاص شبکه، جهت ارائه خدمات مناسب به مسافران و کاهش هزینه‌های عملیاتی طراحی شده است. در این مطالعه، یک مدل برای مسیریابی حرکت قطارها با هدف به حداقل رساندن زمان سفر مسافرین و مسافت عملیاتی قطارها پیشنهاد شده است. متغیرهای تصمیم، الگوی گردش قطارها و تواتر اعزام است. محدودیت‌های تقاضای مسافر و شرایط عملیاتی خط در نظر گرفته شده و مدل بهینه‌سازی چندهدفه با تخصیص ضرایب وزنی، به یک مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل شده است. برای بدست آوردن راه‌حل‌های بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج محاسباتی نشان داده است که با تغییر الگوهای بهره‌برداری از ناوگان، کاهش زمان سفر مسافرین تا یک سطح مشخص، امکان‌پذیر است. در تحقیقی از یان و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل زمان‌بندی و حمل‌ونقل شهری تحت تقاضای سفر و زمان سفر تصادفی مورد مطالعه قرار گرفته است (Yan, Lin, and Lai 2013). در تحقیقی از ژو و همکاران (۲۰۱٤) به مسئله کمینه‌سازی مصرف انرژی و نرخ ازدحام مسافر در شرایط عدم قطعیت تقاضا پرداخته شده است. برای حل مسئله از روش رویکرد نقطه ایده‌آل استفاده شده است. در تحقیق مذکور فرض شده است که نرخ ورود و نسبت خروج مسافر متغیرهای فازی مثلثی هستند. چندین استراتژی عملیاتی به منظور کاهش مصرف انرژی و درجه تراکم و ازدحام مسافر ارائه شده است (Xu et al. 2014).

جمیلی و پورسیدآقایی (۲۰۱۵) یک رویکرد استوارسازی برای الگوهای توقف–عبور در خطوط راه‌آهن شهری تحت عدم‌قطعیت تقاضا پیشنهاد کرده‌اند. برای حل مدل پیشنهادی، دو الگوریتم فراابتکاری از جمله (۱) یک الگوریتم مبتنی بر تجزیه و (۲) یک الگوریتم بر اساس روش بازپخت شبیه‌سازی شده (SA) ارائه شده است. این رویکرد استوارسازی روی یکی از خطوط راه‌آهن شهری در ایران موردمطالعه قرارگرفته است (Jamili and Aghaee 2015). ژو و همکاران (۲۰۱٦) یک مدل کنترلی ظرفیت –محور برای مدیریت جریان مسافری تحت تقاضای نامعین ارائه نموده‌اند. یک الگوریتم مبتنی بر شبیه‌سازی برای حل مسئله توسعه یافته است. برای افزایش سرعت محاسبات، از رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. مطالعه موردی از عملکرد الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای کنترل جریان مسافر بر اساس محدودیت ظرفیت در سناریوهای مختلف تقاضا از کارایی لازم برخوردار است (Xu et al. 2016). یانگ و همکاران (۲۰۱٦) یک مدل احتمالی برای بهینه‌سازی یکپارچه جدول زمانی حرکت قطارهای راه‌آهن شهری و پروفایل سرعت قطارها ارائه نموده است. در این مدل، وزن قطار به عنوان متغیر غیرقطعی در زمان سیر قطارها و زمان لازم برای افزایش و شتاب، نیروی کششی، نیروی ترمز نظر گرفته شده است. این مدل یکپارچه، جهت حداقل کردن مصرف انرژی، بکار گرفته شده است. در تحقیق مذکور یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای برای تعیین جداول زمانی حرکت و سرعت قطارها تدوین و فرموله شده است. برای حل مدل یک الگوریتم ژنتیک مبتنی برشبیه‌سازی برای یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه طراحی شده است. آزمایش‌های محاسباتی بر اساس داده‌های عملیاتی از راه‌آهن شهری پکن، در ساعات اوج تقاضا انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، می‌توان کل مصرف انرژی کششی را در مقایسه با جدول زمانی فعلی و مشخصات سرعت در مدل قطعی بطور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داد (Yang et al. 2016). در تحقیقی از لی و همکاران (۲۰۱٦) یک مدل کنترلی استوار برای تنظیم جداول زمانی قطارهای راه‌آهن زیرزمینی با توجه به نامعینی جریان ورود مسافر ارائه شده است. هدف از طراحی این مدل، ارائه یک مدل پیش‌بینی کننده بازخوردی برای بهینه‌سازی تابع هزینه در سیستم راه‌آهن شهری با توجه به محدودیت‌های ایمنی در شرایط بروز اغتشاشات تصادفی است (Li et al. 2016). با توجه به بررسی ادبیات موضوع، می‌توان نتیجه گرفت که عمده ضعف مدل‌های موجود در ادبیات از نظر بکارگیری هم‌زمان ویژگی‌های مهم سامانه‌های

حمل‌ونقل ریلی مانند اندازه ناوگان، ظرفیت قطار، الگوی تقاضای متغیر با زمان، متغیر بودن زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها است. با توجه به نوسان جریان مسافر و وابستگی آن به زمان، لازم است بعد از دوره اختلال، الگوی توقف استاندارد (توقف کامل) بصورت هوشمندانه‌ای تغییر کند. بعد از اتمام دوره اختلال و در دوره بازیابی جداول زمانی، به منظور افزایش سرعت گردش قطار و کاهش ازدحام مسافران منتظر در ایستگاه‌ها، از استراتژی توقف–عبور استفاده می‌شود. بر خلاف رویکردهای رایج زمان‌بندی مجدد که در آن هدف به حداقل‌رساندن انحراف از جداول زمانی اولیه است، در اینجا، هدف مدل مدیریت اختلال، ارائه بهترین سطح خدمت به مسافرین از طریق کاهش ازدحام مسافر است. به منظور توسعه مدل بهینه‌سازی، فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

فرض ۱. هیچ قطار اضافی وارد سیستم نشده و اعزام هیچ قطاری لغو نمی‌شود.

فرض ۲. زمان سیر خالص (بدون افزایش و کاهش شتاب) بین دو ایستگاه متوالی، مقداری ثابت و مستقل از نوع الگوی توقف–عبور است. درصورتی‌که قطاری از ایستگاهی بدون توقف عبور کند، از زمان سیر واقعی قطار به اندازه زمان شتابگیری و ترمزگیری کاسته می‌شود.

فرض ۳. اگر یک مسافر در زمان t_R بر یک قطار عضو مجموعه B سوار باشد و قطار در ایستگاه مقصد این مسافر توقف نداشته باشد، این مسافر قبل از رسیدن به ایستگاه مقصد، در نزدیک‌ترین ایستگاه پیاده می‌شود و منتظر یک قطار جدید می‌ماند که بتواند او را بطور مستقیم به مقصداش برساند.

فرض ٤. برای مسافرانی که در زمان t_R هنوز داخل قطاری نیستند (هنوز سفر خود را شروع نکرده‌اند)، امکان تعویض قطار در نظر گرفته نشده است. با توجه به اطلاع‌رسانی کامل از الگوی توقف قطارها، یک مسافر سوار به قطاری می‌شود که می‌تواند او را بطور مستقیم به ایستگاه مقصداش برساند.

فرض ۵. دوره اختلال در زمان t_R پایان‌یافته است. از این لحظه به بعد، زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها تا رسیدن به یک وضعیت عادی (در اینجا تا رسیدن به ساعات غیراوج تقاضا یا اتمام دوره بهره‌برداری روزانه)، ادامه می‌یابد. در نتیجه زمان t_R نشان‌دهنده پایان دوره اختلال و آغاز دوره بازیابی جداول زمانی است.

فرض ٦. یک مسافر حداکثر برای رسیدن دو قطار متوالی منتظر می‌ماند و قطعا برای انجام سفر، سوار قطار سوم خواهد شد. چنانچه قطار اول و دوم در ایستگاه مقصد مسافر توقف نداشته باشند، این مسافر حتما سوار قطار سوم خواهد شد. این فرض بسادگی قابل تغییر است.

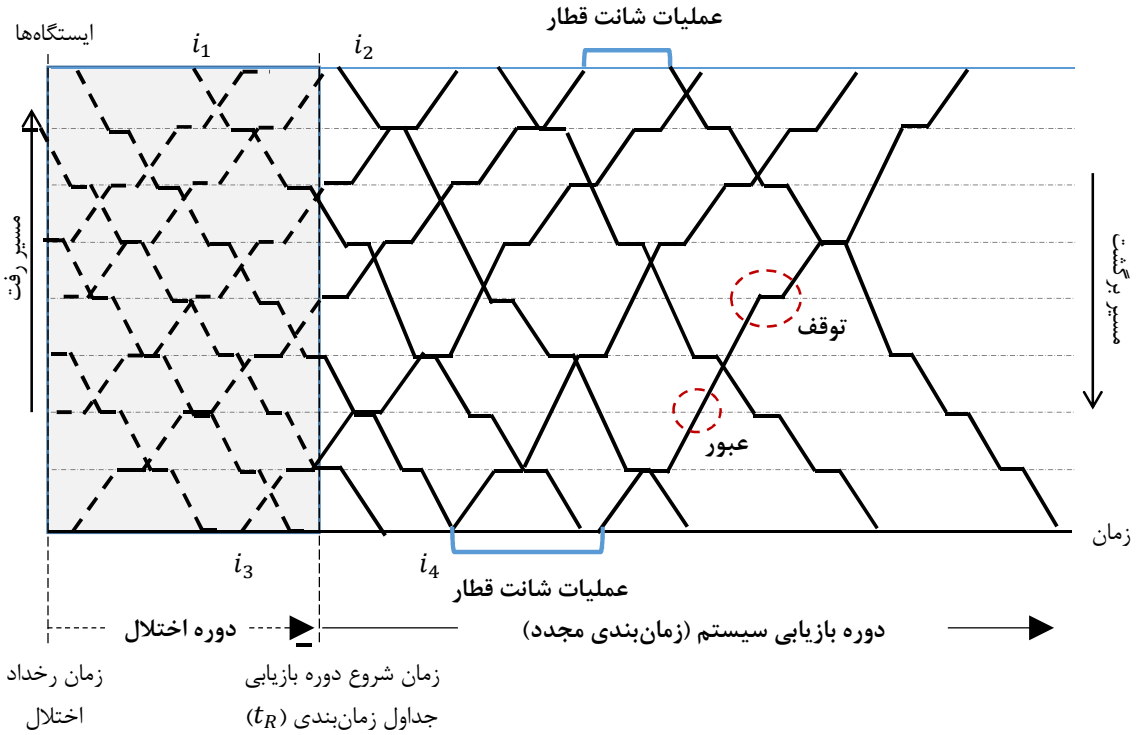
فرض ۷. مسافرانی که در یک ایستگاه منتظر ورود قطار هستند، تنها سوار قطاری می‌شوند که در هر دو ایستگاه مبدأ و مقصد توقف داشته باشد. به عبارت دیگر، انتقال بین خطوط برای مسافرانی که سفر خود را پس از زمان t_R شروع کرده‌اند، امکان‌پذیر نیست. با این حال، در زمان t_R، ممکن است مسافرانی سوار بر یک قطار عضو مجموعه B باشند. به این مسافران اطلاع داده می‌شود که این قطار در کدام ایستگاه‌ها توقف ندارد. در این حالت، مسافرین امکان تعویض خط دارند. فرض می‌شود که این مسافرین در آخرین ایستگاهی که قطار در آن توقف دارد از قطار پیاده می‌شوند (در نزدیک‌ترین ایستگاه ممکن قبل از ایستگاه مقصد)، و این مسافرین صبر می‌کنند که قطار دیگری آن‌ها را به طور مستقیم به ایستگاه مقصد خود برساند. عملیات مربوط به برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطارها در شکل ۱ •نمایش داده شده است. با توجه به اینکه در زمان رخداد اختلال ممکن است بعضی از قطارها هنوز اعزام نشده باشند، لازم است جهت سهولت مدل‌سازی مسئله، قطارها به دو دسته تقسیم شوند. در مدل پیشنهادی، قطارهایی که سفرشان تمام نشده است، به دو مجموعه A و B تقسیم شده‌اند. قطارهایی عضو مجموعه B هستند که اعزام آن‌ها قبل از پایان دوره اختلال، آغاز شده باشد. قطارهای عضو مجموعه A، قطارهایی هستند که اعزامشان در دوره بازیابی جداول زمانی شروع خواهد شد. بعبارتی این قطارها بعد از زمان t_R از یکی از ایستگاه‌های 1 یا m+1 اعزام می‌شوند. از آنجا که بروز اختلال موجب ایجاد انحراف در برنامه زمان‌بندی اولیه شده است، تعداد زیادی از مسافران در ایستگاه‌های مختلف منتظر ورود قطار هستند. اطلاعات جریان مسافرین و نیز تأثیر اختلال بر حجم مسافرین منتظر روی سکوها به عنوان ورودی مدل استفاده می‌شود. همچنین یکی از کاربردهای مدل پیشنهادی می‌تواند برای

برنامه‌ریزی عملیاتی حرکت قطارها در شرایط بدون اختلال (بهره‌برداری عادی) باشد. با $t_R = 0$ می‌توان یک برنامه زمان‌بندی اولیه حرکت قطارها با الگوی بهینه توقف–عبور بدست آورد. در نتیجه مدل پیشنهادی از انعطاف‌پذیری لازم برای استفاده در شرایط عادی و اختلال برخوردار است.

جدول ۱ آورده شده است. نماد متغیرهای تصمیم مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها شامل زمان‌های اعزام و ورود در ایستگاه‌های مسیر و نیز برنامه توقف–عبور قطارها در ایستگاه‌ها در ۰جدول ۲ آمده است. نمادهای مربوط به سایر متغیرهای مربوط به جریان مسافرین که مقادیر آن‌ها وابسته به متغیرهای اصلی مسئله است، در جدول ۳ آورده شده است.

۳- روش تحقیق

نماد پارامترها و مجموعه‌های مدل بهینه‌سازی در



شکل ۱. عملیات مربوط به برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطارها

جدول ۱. نمادها، پارامترها و مجموعه‌ها در مدل ریاضی

نماد	تعریف
t_R	زمان پایان اختلال (زمان شروع دوره بازیابی جدول زمان‌بندی)
k	اندیس اعزام قطارها
i,j	اندیس ایستگاه‌ها
λ_{it}	نرخ ورود مسافرین به ایستگاه i در زمان t
$OD^{[t]}$	ماتریس درصد تقاضای سفر مبدا–مقصد در زمان t
$\mathbf{m}_k$	مجموعه ایستگاه‌های در مسیر اعزام k (بعد از زمان t_R)
$T_A^{(u)}$	مجموعه اعزام‌های بعد از پایان اختلال در جهت رفت که سفرشان هنوز در زمان t_R آغاز نشده است
$T_A^{(d)}$	مجموعه اعزام‌های بعد از پایان اختلال که در جهت برگشت سفرشان هنوز در زمان t_R آغاز نشده است

نماد	تعریف
$T_B^{(u)}$	مجموعه اعزام‌های قبل از پایان اختلال که در زمان t_R در حال سفر در جهت رفت u هستند.
$T_B^{(d)}$	مجموعه اعزام‌های قبل از پایان اختلال که در زمان t_R در حال سفر در جهت برگشت d هستند.
T_A	مجموعه کل اعزام‌هایی که بعد از زمان t_R از مبدأ اعزام می‌شوند ($T_A = T_A^{(u)} \cup T_A^{(d)}$)
T_B	مجموعه کل اعزام‌هایی که قبل از زمان t_R از مبدأ اعزام شده‌اند ($T_E = T_E^{(u)} \cup T_E^{(d)}$)
$\boldsymbol{\pi}_k^{max}$	حداکثر تعداد ایستگاه‌های که اعزام k می‌تواند از آن‌ها بدون توقف عبور کند.
δ_{ij}	تعداد مسافرین موجود در ایستگاه i با مقصد j در زمان t_R
L_{kj}	تعداد مسافرینی که در زمان t_R در قطار اعزامی kام حضور داشته و قصد رسیدن به مقصد j را دارند.
α	زمان لازم برای افزایش یا کاهش شتاب (برای تمامی بلاک‌های مسیر یکسان فرض شده است)

جدول ۲. نماد متغیرهای تصمیم مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها

نماد	تعریف
x_{ki}	اگر اعزام kام در ایستگاه i توقف کند برابر با ۱ و در غیراینصورت برابر با ۰ است
a_{ki}	زمان رسیدن قطار در اعزام kام به ایستگاه i
d_{ki}	زمان حرکت قطار در اعزام kام از ایستگاه i

جدول ۳. نماد متغیرهای مربوط به جریان مسافرین

نماد	تعریف
w_{ki}	تعداد مسافران منتظر در ایستگاه i قبل از اعزام k
w_{kij}	تعداد مسافران منتظر در ایستگاه i با مقصد j قبل از اعزام k
r_{kij}	تعداد مسافران با مقصد ایستگاه j که بعد از اعزام قطار kام در ایستگاه i باقی می‌مانند.
b_{ki}	تعداد مسافرانی در ایستگاه i که قصد سوارشدن به قطار اعزامی kام را دارند.
b_{kij}	تعداد مسافرانی در ایستگاه i با مقصد j که قصد سوارشدن به قطار اعزامی kام را دارند.
n_{ki}	تعداد مسافرانی در ایستگاه i که می‌توانند با توجه به محدودیت ظرفیت به قطار اعزامی kام سوار شوند
n_{kij}	تعداد مسافرانی در ایستگاه i و با مقصد j که با توجه به محدودیت ظرفیت به قطار kام سوار می شوند
A_{kj}	تعداد مسافرانی در ایستگاه i که از قطار اعزامی kام پیاده می‌شوند.
l_{ki}	تعداد مسافران داخل قطار اعزامی kام زمانی که ایستگاه i را ترک می‌کند

در ادامه محدودیت‌های مربوط به تنظیم جداول زمانی حرکت قطارها و نیز روابط مربوط به جریان مسافرین تحت تأثیر الگوهای توقف–عبور ارائه می‌شود. مطابق با رابطه ۱ محدودیت زمان سیر قطارها با توجه به برنامه توقف آن‌ها در ایستگاه‌ها تعیین می‌شود. چنانچه قطار در دو ایستگاه متوالی توقف نداشته باشد، زمان سیر قطار بین این دو ایستگاه برابر با زمان سیر خالص خواهد بود. محدودیت زمان توقف در رابطه ۰ بیان شده است. اگر قطار اعزامی kام در ایستگاه i توقف داشته باشد، حداقل به اندازه dw_{min} در ایستگاه توقف خواهد داشت و در غیراینصورت زمان توقف برابر با صفر است. مطابق رابطه۳، حداقل سرفاصله زمانی بین اعزام قطارهای متوالی برابر با h_{min} است. محدودیت‌های مربوط به گردش ناوگان در پایانه و زمان شانت به تفکیک برای خطوط رفت‌وبرگشت در روابط ٤ و ٥ خلاصه شده است. قطاری که به مقصد می‌رسد، حداقل به اندازه t_{min} در پایانه توقف داشته و سپس آماده حرکت در مسیر برگشت می‌شود. محدودیت مربوط به الگوهای توقف–عبور نیز در رابطه ۰ مشخص شده است. براساس این رابطه، تعداد کل ایستگاه‌هایی که قطار اعزامی kام در آن توقف دارد بر اساس تعداد بیشینه ایستگاه‌های عبوری مجاز (π_k^{max}) تعیین می‌شود.

$$a_{k,i+1} - d_{k,i} - R_i = (x_{k,i} + x_{k,i+1}).\alpha \quad k \in T_A \cup T_B,\ i, i+1 \in \mathrm{m}_k \tag{۱}$$

$$s_{min}.x_{k,i} \le d_{k,i} - a_{k,i} \le s_{max}.x_{k,i} \quad k \in T_A \cup T_B,\ i \in \mathrm{m}_k \tag{۲}$$

$$a_{k+1,i} - d_{k,i} \ge h_{min} \quad k, k+1 \in T_A \cup T_B,\ i \in \mathrm{m}_k \tag{۳}$$

$$a_{k,1} - d_{\rho_k,2m} \ge t_{min} \quad k \in T_A^{(u)} \tag{٤}$$

$$a_{k,m+1} - d_{\rho_k,m} \ge t_{min} \quad k \in T_A^{(d)} \tag{٥}$$

$$\sum_{i \in m_k} x_{k,i} + \boldsymbol{\pi}_k^{max} \ge |m_k| \quad k \in T_A \cup T_B \tag{٦}$$

دلیل اصلی استفاده از محدودیت ۰ این است که مسافران ممکن است از عدم توقف متوالی تعدادی قطار در ایستگاه، احساس نارضایتی کنند. این موضوع برای مسافرینی که در قطارهای عضو مجموعه B هستند از اهمیت بیشتری برخوردار است چراکه این مسافرین مجبورند زودتر از موعد در ایستگاهی جهت تعویض قطار و سوارشدن به اعزام دیگری که در ایستگاه مقصد آن‌ها توقف دارد، اقدام کنند. به‌طورکلی، مقدار π_k^{max} بر اساس قوانین، مقررات، الزامات و دستورالعمل‌های بهره‌برداری، و یا نظرات مدیریتی از پیش تعیین‌شده، محاسبه می‌شود. اگر الگوی توقف–عبور مناسبی اتخاذ نشود، برخی از مسافران مجبورند برای یک مدت طولانی برای سوارشدن به قطار، منتظر بمانند تا بتواند آن‌ها را بطور مستقیم به مقصدشان برساند. به منظور جلوگیری از این وضعیت، محدودیت (۷) بر روی ایستگاه‌های عبوری، در نظر گرفته شده است:

$$x_{k,i}.x_{k,j} + x_{k+1,i}.x_{k+1,j} + x_{k+2,i}.x_{k+2,j} \ge 1 \quad k, \dots, k+2 \in T_A \cup T_B, \quad i, j \in \mathrm{m}_k \tag{۷}$$

محدودیت (۷) تضمین می‌کند که برای هر سفر بین ایستگاه‌های i و j، حداقل یک قطار در هر دو ایستگاه i و j در هر سه اعزام متوالی توقف دارد. به عبارت دیگر، مسافران که قصد سفر بین ایستگاه i و j را دارند، حداکثر دو اعزام بدون توقف را، قبل رسیدن یک قطار جهت سوارشدن، تجربه می‌کنند. باید به این نکته اشاره کرد که تعداد قطارهای مجاز عبوری، به راحتی در مدل قابل‌تغییر و اصلاح است. با اندکی تغییر در محدودیت (۷)، می‌توان نابرابری‌های مشابهی با تعداد پرش‌های مختلف به دست آورد. محدودیت ۰ غیرخطی است و در نظر گرفتن آن به همین صورت در مدل ریاضی باعث پیچیدگی‌های محاسباتی از نظر زمان حل مسئله می‌شود. می‌توان نشان داد که محدودیت خطی زیر می‌تواند جایگزین محدودیت غیرخطی ۰ شود. برای شرح بیشتر به پیوست (قضیه ٤) مراجعه شود.

$$x_{k,i} + x_{k+1,i} + x_{k+2,i} \ge 2 \quad k, k+1, k+2 \in T_A \cup T_B,\ i \in \mathrm{m}_k \tag{۸}$$

در ادامه این بخش، روابط مربوط به جریان مسافر برای قطارهای عضو مجموعه A و B بصورت جداگانه ارائه شده‌اند. سطر iام ماتریس تقاضای سفر مبدا–مقصد توصیف‌کننده درصدی از مسافران ورودی به ایستگاه i با مقصد j است که نشان می‌دهد رابطه $\sum_j \mathrm{P}_{ij}^{[t]} = 1$ برای هر ایستگاه مانند i و در زمان t برقرار است. در نتیجه بسادگی می‌توان در نظر گرفت که $\lambda_{it}.\mathrm{P}_{ij}^{[t]}$ برابر با نرخ ورود مسافرین به ایستگاه i با مقصد j در زمان t است. نحوه تغییر حجم مسافر و معادلات جریان مسافر توسط متغیرهای تصمیم که توسط الگوی توقف–عبور قطارها و زمان‌بندی مجدد تعیین می‌شود، قابل مدل‌سازی است. در اعزام‌های عضو مجموعه A، مسافران قبل سوارشدن به قطار، از الگوی توقف–عبور قطارها اطلاع دارند. با توجه به تعریف متغیرهای $w_{k,i}$ و $w_{k,i,j}$، رابطه ۰ همواره برقرار است. این رابطه بیان می‌کند که کل مسافرینی که در یک ایستگاه مانند i منتظر هستند، قصد سفر به یکی از مقاصد تعریف شده در مسیر ($j > i$) را دارند.

$$w_{k,i} = \sum_{j \in m_k, j > i} w_{k,i,j} \quad k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k \tag{۹}$$

بر مبنای فرض ٤، تعویض خطوط برای مسافرین مربوط به اعزام‌های عضو مجموعه A امکان‌پذیر نبوده و در نتیجه روابط زیر برقرار است. رابطه ۰ بیان می‌کند که تعداد کل مسافرین که در ایستگاه iام سوار قطار می‌شوند برابر است

با مجموع مسافرینی که در ایستگاه iام با مقصد ایستگاه‌های بعدی ($j > i$) سوار قطار می‌شوند. بطور مشابه، رابطه ۰ تعداد مسافرین داخل قطارها را با مقصدهای مختلف نشان می‌دهد.

$$b_{k,i} = \sum_{j \in \mathrm{m}_k, j>i} b_{k,i,j} \qquad k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k \tag{۱۰}$$

$$n_{k,i} = \sum_{j \in \mathrm{m}_k, j>i} n_{k,i,j} \quad k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k \tag{۱۱}$$

بر اساس رابطه (۱۲) با توجه به وابستگی نرخ ورود مسافرین به زمان، متغیر w_{kij} بصورت یک رابطه انتگرال‌گیری از تابع نرخ ورود مسافر محاسبه می‌شود.

$$w_{k,i,j} = \begin{cases} r_{k-1,i,j} + \int_{d_{k-1,i}}^{d_{ki}} \lambda_{it}.\mathrm{P}_{ij}^{[t]}.dt & k-1 \in T_A \cup T_B,\ k \in T_A,\ i,j \in \mathrm{m}_{k-1} \cap \mathrm{m}_k, i<j \\ \delta_{ij} + \int_{t_R}^{d_{ki}} \lambda_{it}.\mathrm{P}_{ij}^{[t]}.dt & k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k \backslash \mathrm{m}_{k-1},\ j \in \mathrm{m}_k,\ i<j \end{cases} \tag{۱۲}$$

اگر اعزام kام اولین قطار اعزامی عضو مجموعه A باشد، آنگاه قطار k-1ام آخرین اعزامی عضو مجموعه B است و به عبارتی داریم $k-1 \in T_B$. به علاوه، اگر $i \in \mathrm{m}_{k-1}$، آنگاه به اولین حالت از رابطه (۱۲) اشاره دارد که نشان می‌دهد اولین قطار اعزامی عضو مجموعه A، مسافرین باقی‌مانده از آخرین اعزام عضو مجموعه B را حمل می‌کند. اگر $i \notin \mathbf{m}_{k-1}$ باشد به این معنا است که اعزام kام اولین قطاری است که بعد از زمان t_R، در ایستگاه i توقف داشته یا از آن بدون توقف عبور می‌کند. در این حالت، به دومین بخش از رابطه (۱۲) اشاره دارد. بطور مشخص، اگر اعزام kام (عضو مجموعه A) اولین قطار اعزامی بعد از زمان t_R نباشد، آنگاه قطار اعزامی k-1 نیز یک اعزام عضو مجموعه A است و به عبارتی $k-1 \in T_A$. در این شرایط، به‌سادگی اولین حالت از عبارت بالا برای محاسبه تعداد مسافرین منتظر، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در راه‌آهن شهری، تغییرات نرخ تقاضا در فاصله بین دو اعزام متوالی ناچیز است. در نتیجه تعداد کل مسافران ورودی به ایستگاه بین دو اعزام متوالی، با توجه به نرخ ورود وابسته به زمان و سرفاصله زمانی بین قطارها محاسبه می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که جملات $(d_{ki} - t_R)$ و نیز $(d_{ki} - d_{k-1,i})$ مقادیری کوچک هستند و در طول این مدت کوتاه، نرخ ورود و ماتریس تقاضای مبدا–مقصد نوسان زیادی ندارد. در نتیجه به منظور ساده‌سازی مدل ریاضی، فرض می‌شود که نرخ ورود و نیز ماتریس تقاضای مبدا–مقصد در این مدت ثابت است. با تقریب گفته شده، می‌توان متغیر $\mathrm{w_{k,i,j}}$ را از رابطه انتگرالی بالا بصورت رابطه (۱۳) محاسبه نمود.

$$w_{k,i,j} = \begin{cases} r_{k-1,i,j} + \lambda_{it}.\mathrm{P}_{ij}^{[t]}.(d_{ki} - d_{k-1,i}) & k-1 \in T_A \cup T_B,\ k \in T_A,\ t = d_{k-1,i},\ i,j \in \mathrm{m}_{k-1} \cap \mathrm{m}_k, i<j \\ \delta_{ij} + \lambda_{it}.\mathrm{P}_{ij}^{[t]}.(d_{ki} - t_R) & k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k \backslash \mathrm{m}_{k-1},\ t = t_R,\ j \in \mathrm{m}_k,\ i<j \end{cases} \tag{۱۳}$$

قطار اعزامی kام ممکن است از چند ایستگاه بدون توقف عبور کند. در مسئله تحقیق فرض شده است که مسافرین تنها به قطاری سوار می‌شوند که بتواند آن‌ها را بصورت مستقیم به مقصدشان برساند. در نتیجه ارتباط بین متغیرهای b_{kij} و w_{kij} طبق معادله (۱٤) برقرار است.

$$b_{k,i,j} = x_{ki}.x_{kj}.w_{kij} \qquad k \in T_A,\ i,j \in \mathrm{m}_k, \qquad i<j \tag{۱٤}$$

رابطه (۱٤) نشان می‌دهد که مسافران برای سفر بین ایستگاه i و j تنها زمانی سوار قطار اعزامی kام (که بعد از رخداد اختلال اعزام شده است) می‌شوند که این قطار در هر دو ایستگاه i و j توقف داشته باشد. محدودیت ۰ یک رابطه غیرخطی است. همچنین تعداد مسافرین داخل قطار kام در هنگام اعزام آن از ایستگاه iام (l_{ki}) از رابطه ۰ محاسبه می‌شود. متغیر l_{ki} برابر است با تعداد مسافرینی که قطار از لحظه اعزام از ایستگاه قبلی (i-1) با خود حمل می‌کند بعلاوه مسافرین جدیدی که در ایستگاه i سوار قطار می‌شوند منهای تعداد مسافرینی که در ایستگاه i از قطار پیاده می‌شوند.

(۱۵)
$$l_{ki} = l_{k,i-1} + b_{k,i} - A_{k,i} \qquad k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k$$

با توجه به محدودیت ظرفیت قطار، در شرایط ازدحام، تعدادی از مسافرین ممکن است قادر به سوارشدن به اولین قطار نباشند. در نتیجه تعداد مسافرین روی سکوی ایستگاه iام که می‌توانند به قطار اعزامی kام سوار شوند ($n_{k,i}$) از رابطه (۱٦) بدست می‌آید.

(۱٦)
$$n_{k,i} = \min\{b_{k,i}, C + A_{k,i} - l_{k,i-1}\} \qquad k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k$$

رابطه ۰ نیز یک محدودیت غیرخطی است. با استفاده از متغیرهای کمکی صفر و یک، می‌توان این محدودیت را خطی نمود. مطابق رابطه ۰ $\mathrm{A_{k,i}}$ برابر کل تعداد مسافرینی است که در ایستگاه iام از قطار اعزامی kام پیاده می‌شوند. این تعداد مسافر برابر است با تعداد کل مسافرینی که از ایستگاه‌های ماقبل ($j < i$) سوار قطار kام شده‌اند و قصد پیاده‌شدن در ایستگاه مقصد مشترکشان (ایستگاه i) را دارند.

(۱۷)
$$A_{k,i} = \sum\nolimits_{j \in \mathrm{m}_k, j<i} b_{k,i,j} \qquad k \in T_A,\ i \in \mathrm{m}_k$$

همچنین پس از اعزام قطار kام، به تعداد r_{kij} مسافر با مقصد j در ایستگاه iام باقی می‌مانند. این شرایط در رابطه (۱۸) بیان شده است.

(۱۸)
$$r_{kij} = w_{kij} - n_{kij} \qquad k \in T_A,\ i,j \in \mathrm{m}_k, i < j$$

در ادامه می‌توان تعداد مسافرینی با مبدأ i و مقصد j ($i \to j$) که می‌توانند به قطار اعزامی kام سوار شوند ($b_{k,i,j}$) را محاسبه نمود. اگر $n_{k,i} = b_{k,i}$ باشد آنگاه ظرفیت کافی در قطار اعزامی kام برای سوارشدن مسافرین به آن وجود دارد و در نتیجه داریم $n_{k,i,j} = b_{k,i,j}$. با این حال، اگر $n_{k,i} < b_{k,i}$ برقرار باشد آنگاه نیاز به تخمینی از $n_{k,i,j}$ است. برای پیدا کردن یک رابطه بین متغیرهای $n_{k,i,j}$، $b_{k,i,j}$، $n_{k,i}$ و $b_{k,i}$ فرض شده است، مسافرین بصورت تصادفی به ایستگاه می‌رسند و زمان رسیدنشان به ایستگاه را از قبل برنامه‌ریزی نمی‌کنند. مشابه این فرض در تحقیقاتی نظیر وانگ و همکاران (۲۰۱۵) بکار رفته است (Wang et al. 2015). در شرایط ازدحام، مسافران صرف‌نظر از خطوطی که قصد به سفر به آن را دارند، به یک صف واحد می‌پیوندند (Trozzi et al. 2013). در نتیجه بین متغیرهای جریان مسافر، رابطه زیر برقرار است.

(۱۹)
$$n_{kij} = \frac{b_{kij}}{b_{k,i}} . n_{k,i} \qquad k \in T_A,\ i,j \in \mathrm{m}_k,\ i < j$$

از یک رویکرد تقریبی برای خطی‌سازی محدودیت (۱۸) استفاده می‌شود. اگر $b_{k,i}$، مقداری کوچک باشد و ظرفیت در قطار اعزامی kام برای این مسافران به اندازه کافی وجود داشته باشد، داریم $n_{k,i} = b_{k,i}$ و $n_{kij} = b_{kij}$. اگر $n_{k,i} < b_{k,i}$ باشد، به دلیل کوچک بودن $b_{k,i}$، این اختلاف تأثیر قابل‌توجهی بر جواب‌ها نخواهد داشت. جهت خطی سازی محدودیت (۱۹)، ابتدا این رابطه بصورت زیر نوشته می‌شود:

(۲۰)
$$n_{kij} = \frac{n_{k,i}}{b_{k,i}} . b_{kij} = \frac{b_{kij}}{b_{k,i}} . n_{k,i}$$

به ازای $k \in T_A \cup T_B$ و $i,j \in \mathrm{m}_k, i < j$ روابط (۲۱) و (۲۲) برقرار است.

(۲۱)
$$n_{kij} \le b_{kij}$$

(۲۲)
$$n_{kij} \ge \min\{b_{kij}, \gamma_{kij} . n_{ki}\}$$

به طوری که ضریب γ_{kij} از رابطه (۲۳) تقریب زده می‌شود:

$$\gamma_{kij} = \frac{\widetilde{w}_{kij}}{\widetilde{w}_{ki}} \qquad (۲۳)$$

مطابق محدودیت (۲۱) تعداد مسافرینی که می‌توانند سوار بر قطار شوند کمتر از تعداد مسافرینی است که قصد سوارشدن به قطار را دارند. در محدودیت (۲۲) جمله دوم ($\gamma_{kij}.n_{ki}$) تقریبی از عبارت $\frac{b_{kij}}{b_{k,i}}.n_{k,i}$ است. در اینجا هر دو عبارت $\widetilde{w}_{kij}$ و $\widetilde{w}_{ki}$ با این فرض محاسبه شده‌اند که قطار اعزامی kام از الگوی توقف کامل پیروی می‌کند. جمله $\widetilde{w}_{kij}$ بیان‌کننده تعداد مسافرینی است که جهت سفر بین ایستگاه i و j، منتظر رسیدن قطار kام هستند. همچنین $\widetilde{w}_{ki}$ بیانگر تعداد کل مسافرین منتظر در ایستگاه i جهت سوارشدن به قطار kام تحت الگوی توقف استاندارد است. در ادامه، معادلات جریان مسافر برای اعزام‌های عضو مجموعه B ارائه می‌شود. در اعزام‌های عضو مجموعه A، کلیه مسافرین از برنامه توقف–عبور جدید مطلع هستند، اما مسافرین موجود در قطارهای عضو B ممکن است به دلیل عدم توقف قطار در ایستگاه مقصدشان، به ناچار از قطار پیاده شوند و برای رسیدن به مقصد، سوار قطار دیگری شوند. اگر یکی از اعزام‌های عضو مجموعه B بعد از زمان t_R، از تعدادی از ایستگاه‌ها بدون توقف عبور کند، آنگاه برخی از مسافران می‌بایست قبل از ایستگاه مقصد خود از قطار فعلی پیاده شده و به قطار دیگری سوار شوند که در ایستگاه مقصدشان توقف دارد. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، فرض می‌شود که اگر یک مسافر قبل از رسیدن به ایستگاه مقصد خود مجبور به پیاده شدن از قطار باشد، این مسافر در نزدیک‌ترین محل ممکن قبل از ایستگاه مقصد از قطار پیاده می‌شود. به عنوان مثال، اگر قطار اعزامی kام، در ایستگاه i-2 توقف کرده، اما از هر دو ایستگاه i-1 و i بدون توقف عبور کند آنگاه، مسافران با ایستگاه مقصد i-1 و i از قطار kام در ایستگاه i-2 پیاده خواهند شد. در نتیجه، برای قطارهای عضو مجموعه B ($k \in T_B$)، محاسبه A_{ki} متفاوت با حالتی است که برای قطارهای عضو مجموعه A ($k \in T_A$) انجام می‌شود. با توجه به اینکه یک قطار حداکثر از π_k^{max} ایستگاه بدون توقف عبور می‌کند، می‌توان مقدار A_{ki} را از رابطه (۱۸)a.i.1.a.i.1 محاسبه نمود.

$$A_{ki} = \sum_{j\in \mathbf{m}_k, j<i} n_{kji} + x_{ki}.L_{ki} + \sum_{j\in \mathrm{m}_k, i+1\le j\le i+\pi_k^{max}} Y_{kij}.L_{kj} \quad k\in T_B,\ i\in \mathbf{m}_k \qquad (۲۴)$$

بطوریکه مقدار متغیر Y_{kij} بصورت زیر قابل تعریف است:

$$Y_{kij} = x_{ki}(1-x_{k,i+1}).(1-x_{k,i+2})\dots(1-x_{k,j}) = x_{ki}.\prod_{i<h\le j}(1-x_{k,h}) \quad i<j \qquad (۲۵)$$

جمله اول از رابطه (۲۴) اشاره به مجموع تعداد مسافرانی دارد که بعد از زمان t_R در حال سوارشدن به قطار اعزامی kام برای رسیدن به مقصد i هستند. جمله دوم اشاره به تعداد مسافرانی دارد که در زمان t_R قبلاً برای رسیدن به مقصد i به قطار اعزامی kام عضو مجموعه B سوار شده‌اند. جمله سوم نشان‌دهنده تعداد مسافرانی است که در زمان t_R قبلاً به قطار اعزامی kام سوار شده بودند و در ایستگاه iام از قطار kام پیاده می‌شوند چراکه این قطار در ایستگاه مقصد آن‌ها توقفی نخواهد داشت. دقت شود که در جمله دوم و سوم به ترتیب عبارت L_{ki} با اندیس i و عبارت L_{kj} به ازای اندیس‌های $i+1\le j$ آورده شده است لذا هیچ‌گونه اشتراکی بین این جملات وجود ندارد. در مورد قطارهای اعزامی عضو مجموعه B ذکر این نکته ضروری است که مسافرین از قبل در مورد برنامه توقف اطلاع کامل ندارند، لذا ممکن است در ایستگاهی مانند i تعداد بیشتری از مسافرین از قطار پیاده شوند. در واقع جمله اول از رابطه (۱۸)a.i.1.a.i.1 همان تعداد مسافرینی هستند که اولاً بعد از زمان t_R به قطار سوار شده‌اند و لذا از برنامه توقف–عبور قطارها مطلع هستند و طبق برنامه با توجه به اینکه ایستگاه مقصدشان ایستگاه i است از قطار پیاده می‌شود. جملات دوم و سوم رابطه (۱۸)a.i.1.a.i.1 مربوط به مسافرینی است که اولاً در زمان t_R در خود قطار حضور داشته‌اند (یعنی قبل از زمان t_R سفر خود را آغاز کرده بودند) به دلیل عدم توقف قطار kام در ایستگاه‌های مقصدشان مجبورند در ایستگاه i از قطار پیاده شده و تعویض خط کنند. در واقع جملات دوم و سوم شمارش‌گر تعداد مسافرینی است که به دلیل عدم توقف

قطار در ایستگاه مقصدشان (بین‌راه) مجبورند در ایستگاهی جلوتر از مقصد از قطار پیاده شوند. رابطه (۲۵) بسادگی قابل خطی‌سازی است. به ازای $k \in T_B$ مقدار $w_{k,i,j}$ از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$w_{k,i,j} = \begin{cases} r_{k-1,i,j} + \lambda_{it}.\mathrm{P}_{ij}^{[t]}.\left(d_{ki} - d_{k-1,i}\right) & k-1, k \in T_B,\ k \in T_A,\ t = d_{k-1,i},\ i,j \in \mathrm{m}_{k-1} \cap \mathrm{m}_k, i < j \\ \delta_{ij} + \lambda_{it}.\mathrm{P}_{ij}^{[t]}.(d_{ki} - t_R) & k \in T_B,\ i \in \mathrm{m}_k \backslash \mathrm{m}_{k-1},\ t = t_R,\quad j \in \mathrm{m}_k,\ i < j \end{cases} \quad (۲۶)$$

باید توجه شود که تفاوت ناچیزی بین رابطه (۱۳) و (۲۶) وجود دارد. در رابطه (۱۳)، بخش دوم تنها برای اولیه قطار اعزامی عضو مجموعه A نوشته شده است. درصورتی‌که در محدودیت (۲۶) بخش دوم برای تمامی اعزام‌های عضو مجموعه B بیان شده است. به ازای $k \in \mathrm{T_B},\ j \le i + \pi_k^{max}$ محاسبه $r_{k,i,j}$ متفاوت با مدل‌های قبلی خواهد بود چراکه برخی از مسافرین باید به منظور تعویض خط، جلوتر از مقصد از قطار پیاده شوند.

$$r_{k,i,j} = w_{k,i,j} - n_{kij} + Y_{kij}.L_{kj} \quad k \in \mathbf{T}_B,\ i,j \in \mathbf{m}_k, i < j \quad (۲۷)$$

در مدل بهینه‌سازی مسئله دو تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. اولین تابع هدف زمان سفر قطارها (Z_T) را در نظر می‌گیرد. تابع هدف دوم مربوط به تعداد مسافرین منتظر روی سکوها (Z_P) است. بدون دور شدن از کلیات مسئله، مجموعه توابع هدف روی متغیرهای تصمیم اصلی مسئله $\mathrm{x, a, d}$ بهینه‌سازی می‌شود. مدل زمان‌بندی مجدد قطارهای راه‌آهن شهری در مسیرهای دوخطه، بصورت زیر قابل‌بیان است.

$$\left[\mathbf{B-3}\text{مدل}\right]: \min_{\mathbf{x,a,d}} imize(Z_T, Z_P) \quad (۲۸)$$
$$s.t.$$

محدودیت‌های ۰ الی ۰، ۰ الی ۰، (۱-۱) الی ۰ و (۱۹) الی (۱۸)a.i.1.a.i.1

در مدل بالا، تابع هدف Z_T از طریق رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود. در این رابطه می‌توان از جمله ثابت (t_R) صرف‌نظر نمود.

$$Z_T = \sum_{k \in T_A \cup T_B} Z_T^{(k)} = \sum_{k \in T_A \cup T_B} (d_{k,m} - t_R) \quad (۲۹)$$

منظور از $Z_T^{(k)}$ زمان سفر قطار kام است. برای اعزام‌های عضو مجموعه B در مسیر u ($k \in T_B^{(u)}$)، این مقدار در زمان t_R آغاز شده و در زمان اعزام از ایستگاه m پایان می‌یابد. برای اعزام‌های بعد از اتمام دوره اختلال در مسیر u ($k \in T_A^{(u)}$)، این مقدار در زمان اعزام از ایستگاه m پایان می‌یابد. با در نظر گرفتن زمان گردش قطارها در انتهای خط، زمان اعزام قطار k در خط u بعد از اتمام سفر قطار اعزامی متناظر (ρ_k) در خط برگشت d انجام می‌شود که این مقدار معادل عبارت $d_{\rho_k,2m}$ است. در نتیجه در این حالت، مقدار $Z_T^{(k)}$ از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود.

$$Z_T^{(k)} = d_{k,m} - d_{\rho_k,2m} \quad (۳۰)$$

برای اعزام‌های عضو مجموعه A در خط برگشت d، روابط مربوط به محاسبه $Z_T^{(k)}$ بر اساس معادله (۳۱) بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Z_T^{(k)} = \begin{cases} d_{k,m} - t_R & k \in T_B^{(u)} \\ d_{k,m} - d_{\rho_k,2m} & k \in T_A^{(u)} \end{cases} \quad (۳۱)$$

$$Z_T^{(k)} = \begin{cases} d_{k,2m} - t_R & k \in T_B^{(d)} \\ d_{k,2m} - d_{\rho_k,m} & k \in T_A^{(d)} \end{cases} \quad (۳۲)$$

تابع هدف دوم Z_P از طریق رابطه (۳۳)(۳۳) محاسبه می‌شود.

$$Z_P = \sum_{k \in T_A \cup T_B} Z_P^{(k)} = \sum_{k \in T_A \cup T_B} \sum_{i \in \mathrm{m}_k} \sum_{j \in \mathrm{m}_k, j > i} r_{kij} \quad (۳۳)$$

منظور از $Z_P^{(k)}$ تعداد مسافرینی است که نتوانسته‌اند سوار قطار kام شوند. ابعاد مدل زمان‌بندی مجدد در مسائل واقعی بسیار بزرگ بوده و حل مدل اصلی [MP] با توجه به محدودیت زمانی، بسیار دشوار است. برای حل مشکل اول، از روش‌های خطی‌سازی استفاده شد. برای حل مسئله، یک روش ابتکاری تولید جواب مبتنی بر رویکرد تجزیه، ارائه شده است.

حل مسئله با رویکرد تجزیه

جهت خطی‌سازی مدل [MP] به تعریف تعداد زیادی محدودیت و متغیرهای عددصحیح اضافی نیاز است. با توجه به ضرورت حل مسئله در زمان معقول، ارائه یک استراتژی بهینه‌سازی مؤثر مبتنی بر تجزیه، مدنظر قرار دارد. با توجه به فرض عدم‌سبقت قطارها، یکی از ایده‌های حل، تجزیه مسئله اصلی به مجموعه‌ای از زیر مسائل برای تولید جدول زمانی هر یک از قطارهای اعزامی است. این رویکرد تجزیه مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها در تحقیقاتی از بران لوند و همکاران، ۱۹۹۸؛ ژو و زونگ ۲۰۰۵، پیشنهاد شده است (Zhou and Zhong 2005). مدل بهینه‌سازی مربوط به زیر مسئله kام بصورت زیر فرموله می‌شود:

$$[\mathbf{SP}_k]: \quad \underset{\boldsymbol{x_k},\boldsymbol{a_k},\boldsymbol{d_k}}{minimize}\ Z_T^{(k)} \quad \underset{\boldsymbol{x_k},\boldsymbol{a_k},\boldsymbol{d_k}}{minimize}\ Z_P^{(k)} \qquad (۳٤)$$

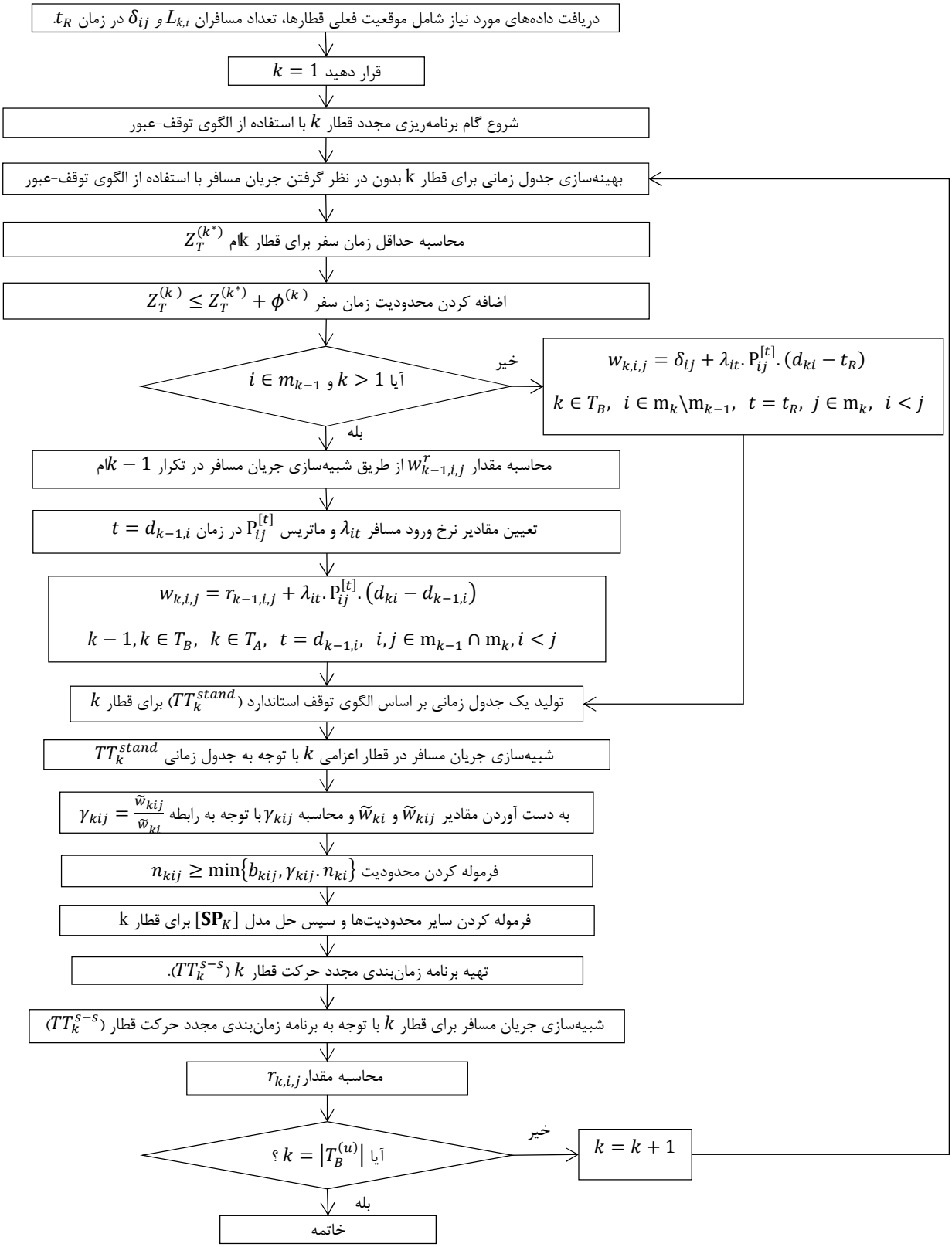
s.t.محدودیت‌های (۱) الی (٦) و (۸) و فرم خطی روابط ۰ الی ۰، (۱−) الی ۰، (۱۸) الی ۰، (۱۸) الی (۱۸)a.i.1.a.i.1

برای حل این مدل بهینه‌سازی در حالت دوهدفه یکی از توابع هدف به محدودیت‌های مسئله انتقال می‌یابد. در اینجا، میزان انحراف تابع هدف زمان سفر هر قطار از مقدار بهینه آن به محدودیت‌های مسئله اضافه می‌شود. در نتیجه، مسئله بصورت تک‌هدفه بیان می‌شود.

$$[\mathbf{SP}_K]: \ minimize_{\boldsymbol{x_k},\boldsymbol{a_k},\boldsymbol{d_k}}\ Z_P^{(k)}$$
s.t.
$$Z_T^{(k)} \le Z_T^{(k_*)} + \phi^{(k)}$$

محدودیت‌های (۱) الی (٦) و (۸) فرم خطی محدودیت‌های ۰ الی ۰، (۱−) الی ۰، (۱۸) الی (۱۸)a.i.1.a.i.1 به ازای قطار kام

بطوریکه $\phi^{(k)} \ge 0$ و داریم: $Z_T^{(k_*)} = \min_{\boldsymbol{x_k},\boldsymbol{a_k},\boldsymbol{d_k}} \left\{ Z_P^{(k)} \right\}$ و برنامه زمان‌بندی قطارهایی که قبل از قطار kام اعزام شده‌اند، معلوم هستند. به منظور حل زیرمسئله kام $[\mathrm{SP}_K]$ ابتدا یک مسئله زمان‌بندی ساده‌تر حل می‌شود تا حداقل زمان سفر برای قطار اعزامی kام ($Z_T^{(k_*)}$) بدست آید. سپس، محدودیت زمان سفر، $Z_T^{(k)} \le Z_T^{(k_*)} + \phi^{(k)}$ به مدل $[\mathrm{SP_K}]$ اضافه شده و بهینه‌سازی تابع هدف دوم انجام می‌شود. بدیهی است، مدل $[\mathrm{SP}_K]$ یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح خطی تک‌هدفه با مقیاس بسیار کوچک‌تر در مقایسه با مدل اولیه است که توسط نرم‌افزارهای بهینه‌سازی در زمان کوتاه قابل حل است. باید توجه داشت که این الگوریتم ابتکاری، یک روش ایجاد جواب بصورت حریصانه است و لزوما نمی‌تواند تضمینی از بهینگی برای مسئله اصلی ارائه کند.



شکل ۲. الگوریتم زمان‌بندی مجدد قطارهای اعزامی عضو مجموعه B

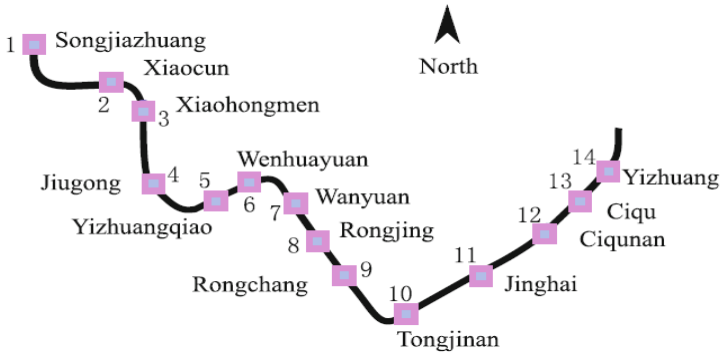
شکل ۳. الگوریتم زمان‌بندی مجدد قطارهای اعزامی عضو مجموعه A

در هر مرحله از تولید جواب، بهترین برنامه حرکت قطار فعلی را با توجه به برنامه زمان‌بندی قطارهای قبلی، تنظیم می‌کند. با توجه به تفاوت قابل‌توجه بین اعزام‌های عضو مجموعه A و B از نظر روابط و معادلات جریان مسافر، فرآیند زمان‌بندی مجدد قطارها به دو مرحله، (۱) زمان‌بندی مجدد قطارهای عضو مجموعه B و (۲) زمان‌بندی مجدد قطارهای اعزامی عضو مجموعه A قابل‌تقسیم است. الگوریتم‌ها بر اساس نمادهای قطارهای اعزامی خط رفت (u) نوشته شده‌اند و بطور مشابه برای زمان‌بندی مجدد قطارهای خط برگشت نیز قابل‌اجرا هستند.

۳-نتایج

۳-۱-اعتبارسنجی مدل روی داده‌های خط $L_۲$ راه‌آهن شهری پکن

در این بخش، اعتبارسنجی مدل زمان‌بندی مجدد روی داده‌های نمونه از راه‌آهن چین مورد آزمایش قرار می‌گیرد. راه‌آهن شهر پکن با ۱۵ خط اصلی، به طول ۲۰۰ کیلومتر، ۱۲۳ ایستگاه و جابه‌جایی روزانه ۳،۵۶۵ میلیون نفر است. خط $L_۲$ یکی از ریلی شهر پکن به طول حدود ۲۳،٤ کیلومتر با ۱۳ ایستگاه (٦ ایستگاه زیرزمینی و ۷ ایستگاه روی سطح زمین) است که در سال ۲۰۱۰ به بهره‌برداری رسیده است. نقشه ریلی این مسیر در •نمایش داده شده است.

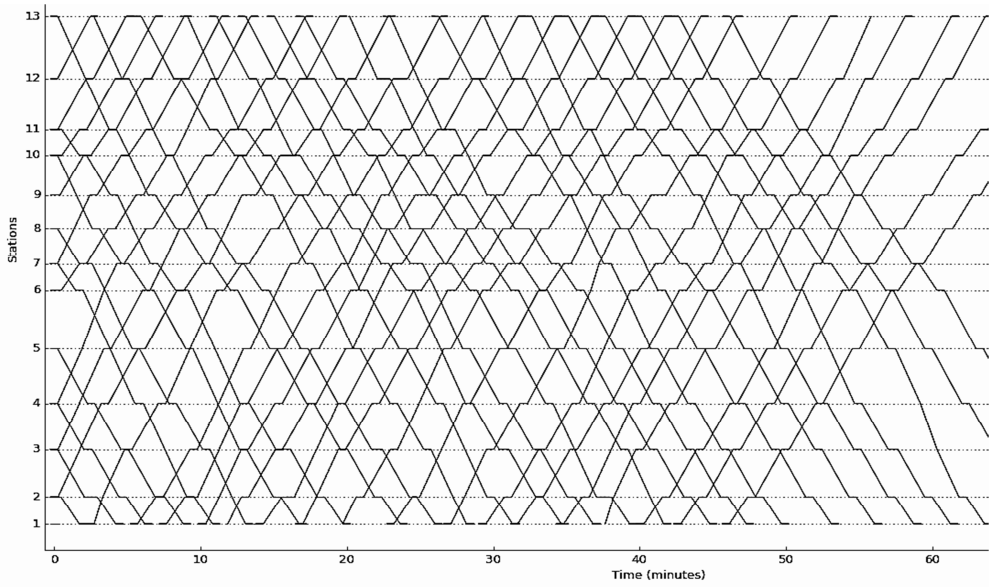


شکل ٤. خط L۲ از راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ

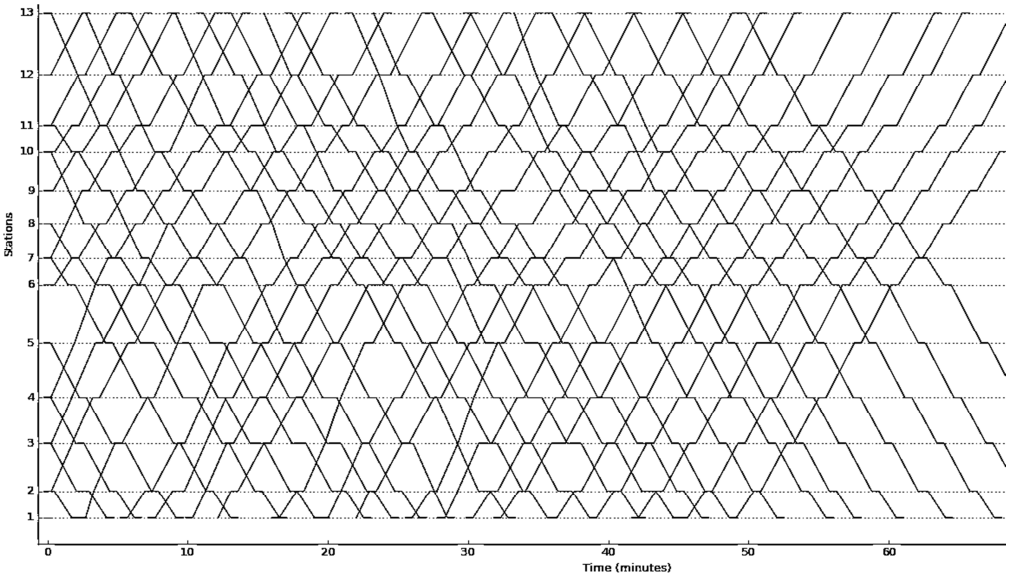
جدول ٤. پارامترهای عملیاتی خط L۲ از راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ

C	s_{min}	s_{max}	h_{min}	h_{max}	α	t_{min}
۱٤۸٦ نفر	۰،۵ دقیقه	۲،۵ دقیقه	۱،۵ دقیقه	۷ دقیقه	۲۰ ثانیه	۲،۵ دقیقه

گراف ایستگاه-زمان در برنامه مجدد حرکت قطارها در خط $L_۲$ راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ به ازای مقادیر مختلف مقادیر آستانه برای انحراف زمان سفر هر قطار از مقدار بهینه آن در شکل‌های ۵ و ٦ نمایش داده شده است. در این ٤ سناریو، به ازای افزایش مقادیر ϕ، درصد کل ایستگاه‌های عبوری (بدون توقف) توسط قطارها کاهش می‌یابد. مطابق نتایج جدول ۵ کلیه نمونه مسائل در زمانی کمتر از ۸،۵ دقیقه حل شده‌اند. با توجه به زمان محاسباتی قابل‌قبول الگوریتم پیشنهادی، امکان پیاده‌سازی این روش در عمل با توجه به محدودیت زمانی مسئله مدیریت اختلال وجود دارد. با افزایش ۹،٦٪ مجموع زمان سفر قطارها، می‌توان حدود ۷٪ از ازدحام مسافرین در ایستگاه‌ها کاست و در این حالت، قطارها تنها در ۵٪ از ایستگاه‌ها توقف ندارند. با توجه به اینکه یک عامل محدودکننده برای بهبود کیفیت جواب، تعداد ایستگاه‌های مجاز برای توقف قطارها است، می‌توان تحلیل حساسیتی روی این پارامتر مدل بهینه‌سازی انجام داد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ٦ اگر هر قطار امکان عدم توقف در حداکثر ۸ ایستگاه را داشته باشد ($\boldsymbol{\pi}_k^{max} = 8$)، می‌توان مجموع زمان سفر قطارها را حدود ٤،۵٪ کاهش داد. همچنین میزان افزایش درصد توقف-عبور قطارها در خط $L_۲$ راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ ($\phi = 0$) با افزایش حداکثر تعداد ایستگاه‌های مجاز عبوری توسط هر قطار در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵. گراف برنامه مجدد حرکت قطارها در خط L_2 راه‌آهن پکن-یی‌ژوانگ ($\phi = 60$)



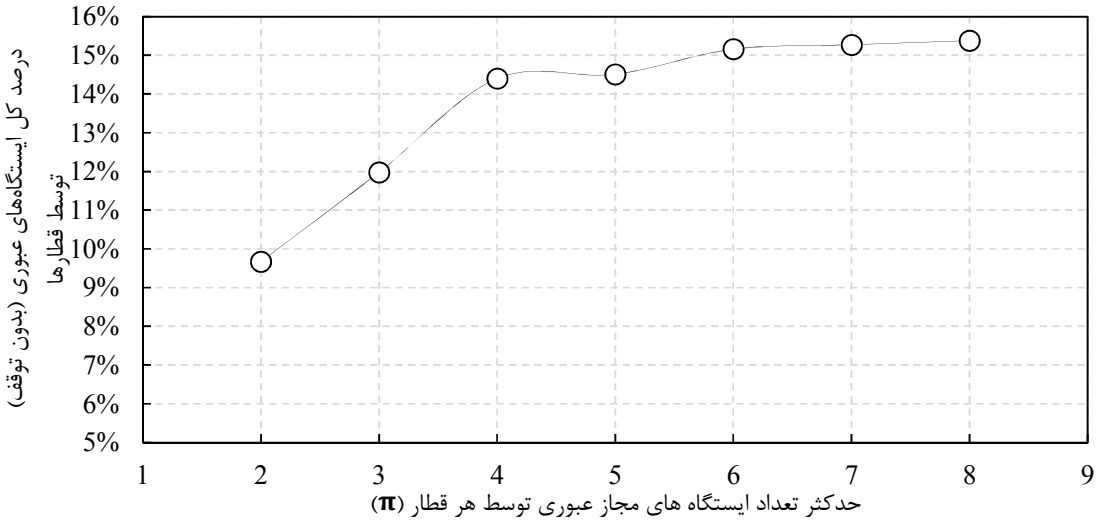
شکل ٦. گراف برنامه مجدد حرکت قطارها در خط L_2 راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ ($\phi = 120$)

جدول ۵. نتایج محاسباتی در خط L_2 راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ (مدت اختلال: ۱ ساعت)

نمونه مسئله	ϕ	درصد کل ایستگاه‌های عبوری (بدون توقف) توسط قطارها	مجموع زمان سفر قطارها (دقیقه)	متوسط تعداد مسافرین منتظر در هر ایستگاه		زمان حل مسئله (دقیقه)
				در کل دوره زمان‌بندی مجدد	در یک ساعت	
۱	۰	٪۱۲	۵۸۲۱۹	٦٨٣٤,١	۱۷۰۸,۵	٤,٢٠
۲	٦٠	٪۹	٦٠٠٠٢	٦٤٢٧,٣	١٦٠٦,٨	٦,٨٥
۳	۹۰	٪۷	٦١٨٦١	٦٣٥١,٥	١٥٨٧,٩	٨,٥٠
٤	١٢٠	٪۵	٦٣٨٥٨	٦٣٥٥,٩	١٥٨٩,٠	٧,٩١

جدول ٦. تحلیل حساسیت نتایج رویکرد ابتکاری در خط L_2 راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ به ازای $\phi = 0$

π_k^{max}	درصد کل ایستگاه‌های عبوری (بدون توقف) توسط قطارها	مجموع زمان سفر قطارها (دقیقه)	متوسط تعداد مسافرین منتظر در هر ایستگاه		زمان حل مسئله (دقیقه)
			در کل دوره زمان‌بندی مجدد	در یک ساعت	
۲	٪۹,٦۷	٥۹۳۰۹	٦۸۹٥,۷	۱۷۲۳,۹	۲,۹۱
۳	٪۱۱,۹۸	٥۸۲۱۹	٦۸۳٤,۱	۱۷۰۸,٥	٤,۲۰
٤	٪۱٤,٤۰	٥۷۱۳۷	۷۰٦۲,٥	۱۷٦٥,٦	۲,۸٤
٥	٪۱٤,٥۱	٥۷۱۷۳	۷۰٥۹,۹	۱۷٦٥,۰	۲,۲٤
٦	٪۱٥,۱٦	٥٦۹۸۷	۷۰٦٤,۱	۱۷٦٦,۰	۲,۱۱
۷	٪۱٥,۲۷	٥٦۸۹٥	۷۱۰۳,٤	۱۷۷٥,۸	۱,۸٦
۸	٪۱٥,۳۸	٥٦٦۸۸	۷۳۲۱,٦	۱۸۳۰,٤	۱,۸۱

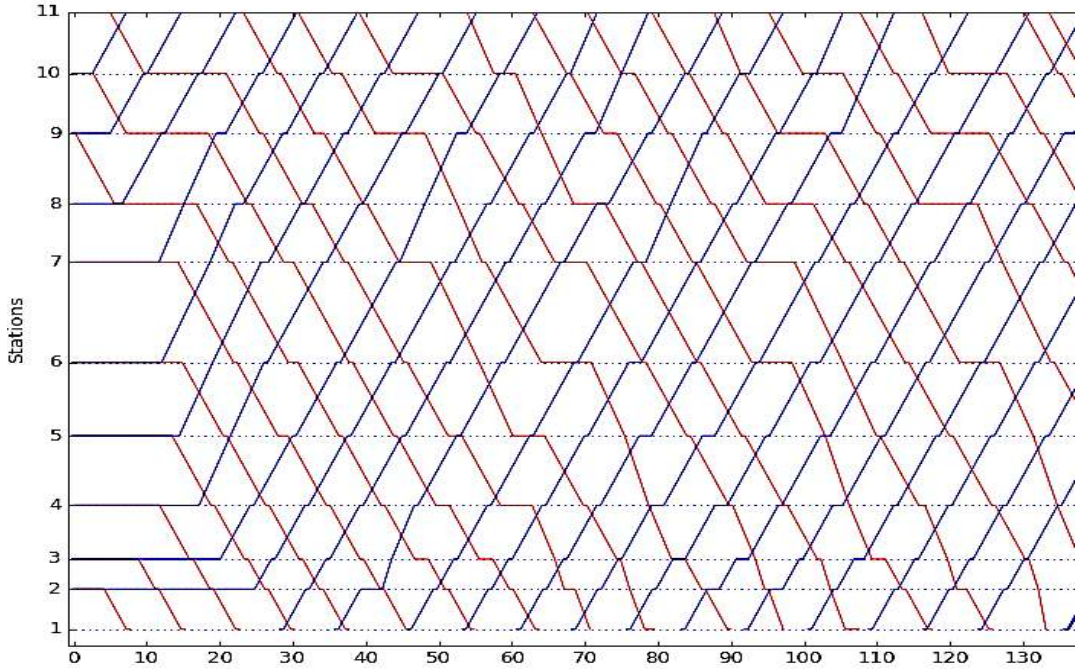


شکل ۷. درصد توقف-عبور در خط L۲ راه‌آهن شهری پکن-یی‌ژوانگ ($\phi = 0$)

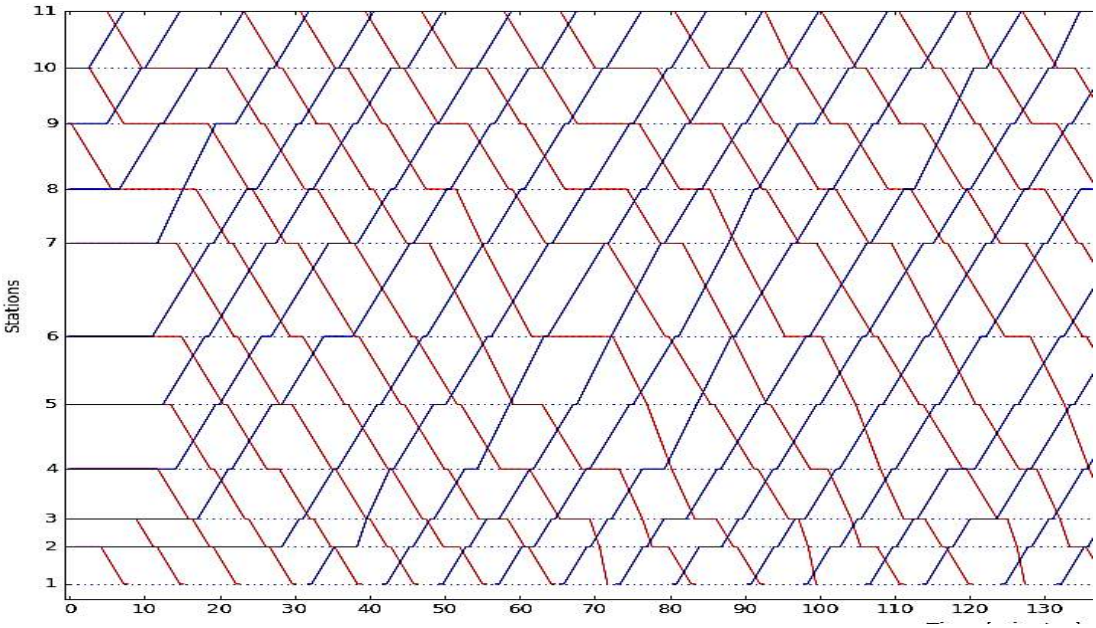
۳-۲-مطالعه موردی: خط ٥ راه‌آهن شهری تهران

بر اساس اطلاعات موجود از خط ٥ راه‌آهن شهری تهران، زمان لازم برای افزایش یا کاهش شتاب در بخش‌های مختلف مسیر برابر با $\alpha = \beta = 60$ ثانیه است. برای حل مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها از نرم‌افزار بهینه‌سازی Gurobi 6.5.2 استفاده شده است. این برنامه شامل الگوریتم‌های مانع و روش‌های بهبودیافته انشعاب و برش برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط و برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط درجه دوم است. حداکثر تعداد ایستگاه‌های مجاز برای عبور برابر با ۳ است ($\pi_k^{max} = 3$). تعداد کل قطارهای در حال حرکت نیز برابر با ۳٥ است. ماتریس تقاضای مبدا-مقصد سفر ناهمگن و دوره اختلال ٦۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. اختلال در ساعت اوج تقاضا رخ می‌دهد و قبل از اختلال، حرکت قطارها با حداقل سرفاصله زمانی انجام می‌شود. در طول دوره اختلال، تمامی قطارها در ایستگاه‌ها توقف می‌کنند. اگر قطاری در حال توقف در ایستگاه باشد، مسافرین جدید که به ایستگاه می‌رسند با توجه به محدودیت ظرفیت قطار سوار به آن می‌شوند و اگر در این زمان قطاری به ایستگاه نرسیده باشد، مسافرین منتظر روی سکوها می‌مانند. مسافرین در ایستگاه i که قصد رسیدن به ایستگاه i+1 را دارند، از سیستم راه‌آهن شهری خارج می‌شوند. به دلیل مسافت کوتاه بین دو ایستگاه متوالی، این مسافرین ترجیح می‌دهند که از سیستم راه‌آهن شهری در شرایط اختلال استفاده نکنند. گراف ایستگاه-زمان در الگوی توقف-

عبور بهینه در حالات مختلف در شکل‌های زیر آورده شده است. این نمودارها، برنامه مجدد حرکت قطارها در ایستگاه‌های مختلف خط ۵ راه‌آهن شهری تهران و حومه در ساعات اوج تقاضا (صبح) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، زمانی که قطارها در ایستگاه توقف ندارند، به دلیل کاهش زمان سیر، سرعت عملیاتی حرکت قطارها افزایش یافته و امکان جابجایی مسافرین در زمان کوتاه‌تر فراهم شده است.



شکل ۸. گراف حرکت قطارها در خط ۵ متروی تهران ($\phi = 80$) در ساعات اوج تقاضای صبح



شکل ۹. گراف حرکت قطارها در خط ۵ متروی تهران ($\phi = 100$) در ساعات اوج تقاضای صبح

جدول ۷. نتایج محاسباتی بر اساس داده‌های ساعات اوج تقاضا (صبح)، مدت اختلال ۶۰ دقیقه و $\pi_k^{max} = 3$

نمونه مسئله	Ø (ثانیه)	درصد کل ایستگاه‌های عبوری (بدون توقف) توسط قطارها	مجموع زمان سفر قطارها (ساعت)	متوسط زمان سفر یک قطار (دقیقه)	متوسط تعداد مسافرین منتظر در هر ایستگاه		زمان حل مسئله (دقیقه)
					در کل دوره زمان‌بندی مجدد	در یک ساعت	
۱	۷۰	٪۹	٤٦,٧٦	٥٦,١١	١٠٠٥١,١	٢٥١٢,٨	٢,٥١
٢	٨٠	٪٧	٤٧,١٨	٥٦,٦١	٦٥٦٩,٢	١٦٤٢,٣	٣,٠٢
٣	٩٠	٪٨	٤٨,٥٩	٥٨,٣١	١٠٢٨١,٥	٢٥٧٠,٤	٣,٣٥
٤	١٠٠	٪٨	٤٧,٩٣	٥٧,٥٢	١٠٧٣٣,٠	٢٦٨٣,٣	٣,١١
٥	١٣٠	٪٦	٤٧,٢٦	٥٦,٧١	١٠٣٩٥,٦	٢٥٩٨,٩	٣,٤١
٦	٢٠٠	٪١٠	٥١,٠٤	٦١,٢٥	١١٢٤٥,٤	٢٨١١,٣	٤,٠٥
٧	٢٦٠	٪٧	٥٥,٩٦	٦٧,١٥	١١٤٧٥,٨	٢٨٦٨,٩	٤,٢٣

بر اساس نتایج بدست آمده، زمان حل ۷ مسئله نمونه، کمتر از ٤,٥ دقیقه است. به ازای $\phi = 80$ ثانیه، قطارها در ۷٪ از ایستگاه‌های مسیر توقف ندارند. در این حالت متوسط زمان سفر یک قطار حدود ٥٦,٦١ دقیقه بوده و متوسط تعداد مسافر منتظر در هر ایستگاه که قادر به سوارشدن به اولین قطار نباشند، برابر با ٦٥٧٠ نفر است. از مقایسه مسئله نمونه ۱ و۲ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مجموع زمان سفر قطارها به میزان کمتر از ۱ درصد (٪۰,۸۹) می‌توان حدود ۳۵٪ تعداد مسافرینی که نتوانسته‌اند سوار اولین قطار اعزامی شوند را کاهش داد. در این حالت، قطارها در تنها حدود ۷٪ از ایستگاه‌ها توقف ندارند. به عنوان نمونه الگوی توقف-عبور قطارها در مسیر رفت‌وبرگشت در مسئله شماره ۳ ($\phi = 90$ ثانیه) در جداول ۸ و ۹ نمایش داده شده است. این برنامه توقف-عبور برای سایر قطارها بصورت الگوی توقف کامل (استاندارد) بدست آمده است. نتایج زیر نشان می‌دهد هرچه مقدار ϕ افزایش یابد، مجموع زمان سفر قطارها نیز بصورت نسبی افزایش یافته و زمان حل مسئله نیز بطور تقریبی افزایش می‌یابد. در این شرایط باید تعادلی بین تابع هدف مربوط به ازدحام مسافرین و تابع هدف زمان سفر قطارها برقرار شود.

جدول ۸. الگوی توقف-عبور قطارها در مسیر رفت در مسئله شماره ۳

شماره قطار/شماره ایستگاه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
۱٥	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱
۲۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۲۳	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲٤	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲٥	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱
۲٦	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۹. الگوی توقف-عبور قطارها در مسیر برگشت در مسئله شماره ۳

شماره قطار/شماره ایستگاه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
۹	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱

۱۲	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۳	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱٤	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱
۱۵	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱
۱٦	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۷	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۱۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۱۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱
۲۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۲۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱
۲۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱
۲۳	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۲٤	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱
۲۵	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۱۰. نتایج محاسباتی رویکرد ابتکاری پیشنهادی در ساعات اوج تقاضا (صبح) به ازای $\boldsymbol{\phi = 90}$ ثانیه

π_k^{max}	درصد کل ایستگاه‌های عبوری (بدون توقف) توسط قطارها	مجموع زمان سفر قطارها (دقیقه)	متوسط تعداد مسافرین منتظر در هر ایستگاه (در کل دوره زمانبندی مجدد)	متوسط تعداد مسافرین منتظر در هر ایستگاه (در یک ساعت)	زمان حل مسئله (دقیقه)
۱	٪۵	۱٦۳۸٤۹	۱۱۳۸۷,٦	۲۸٤٦,۹	٤,٤۹
۳	٪۸	۱۷٤۹۲۰	۱۰۲۸۱,۵	۲۵۷۰,٤	۳,۳۵
٦	٪۷	۱۷٦۰۷۹	۹۷۵۷,۵	۲٤۳۹,٤	۳,۸۱

جدول ۱۱. نتایج محاسباتی رویکرد ابتکاری پیشنهادی بر اساس داده های ساعات اوج تقاضا (عصر)

نمونه مسئله	$\boldsymbol{\phi}$ (ثانیه)	درصد کل ایستگاه‌های عبوری (بدون توقف) توسط قطارها	مجموع زمان سفر قطارها (دقیقه)	متوسط تعداد مسافرین منتظر در هر ایستگاه (در کل دوره زمانبندی مجدد)	متوسط تعداد مسافرین منتظر در هر ایستگاه (در یک ساعت)	زمان حل مسئله (دقیقه)
۱	٤۰	٪٤	۱٦۲۲۰۸	۱۲۱۲,٤	۳۰۳,۱	٤,۳۹
۲	۵۰	٪۳	۱٦۲۲٦۲	۱۰۸٦,۳	۲۷۱,٦	٤,۵۱
۳	٦۰	٪۳	۱٦۲۸۵۸	۱۰۷۳,۵	۲٦۸,٤	۳,۹۸
٤	۸۰	٪۳	۱٦٦۳۳٦	۱۲٤۵,۰	۳۱۱,۳	٤,۰۸

نتایج مدل تلفیقی زمان‌بندی مجدد و توقف-عبور نشان می‌دهد که با تغییر الگوهای توقف قطارها می‌توان با درصد کمی افزایش زمان سفر قطارها، ازدحام مسافرین را بطور قابل‌توجهی کاهش داد. بر اساس نتایج مدل زمان‌بندی مجدد، با افزایش مجموع زمان سفر قطارها در خط ۵ راه‌آهن شهری تهران به میزان کمتر از ۱٪ می‌توان ازدحام مسافر در ایستگاه‌ها را حدود ۳۵٪ کاهش داد و در این حالت، قطارها حدوداً در ۷٪ از ایستگاه‌ها توقف ندارند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که الگوریتم‌های پیشنهادی مبتنی بر تجزیه مسئله از کارایی لازم برای حل مسائل تحقیق برخوردار بوده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده اثربخشی روش‌های پیشنهادی برای حل مسائل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارهای راه‌آهن شهری در

ابعاد واقعی با توجه به محدودیت‌های زمانی و نیز بهبود شاخص سطح سرویس و رضایت‌مندی مسافرین نسبت به راه‌حل موجود است. خروجی‌های مدل زمان‌بندی مجدد روی نمونه مسائلی از راه‌آهن شهری تهران و پکن نشان می‌دهد که زمان حل مسئله توسط روش ابتکاری، با توجه به محدودیت زمانی برای تصمیم‌گیری در شرایط لحظه‌ای، قابل‌قبول است.

۵-نتیجه‌گیری

امروزه، راه‌آهن شهری نقش کلیدی در حمل‌ونقل عمومی شهرهای بزرگ ایفا می‌کند چراکه این نوع سیستم حمل‌ونقل در مقایسه با سایر شیوه‌های متداول حمل‌ونقل همگانی دارای ظرفیت حمل‌ونقل و راندمان بالا در ارائه خدمات به حجم قابل‌توجهی از مسافرین است. برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی درون‌شهری و به خصوص برنامه‌ریزی حرکت قطارها در خطوط راه‌آهن شهری زیرزمینی بصورت روزانه و با توجه به ظرفیت حمل‌ونقل و برای پاسخ به تغییرات تقاضای مسافرین انجام می‌شود. راه‌آهن شهری امروزه با مشکل تقاضای روزافزون سفر شهری و رقابت با سایر سامانه‌های حمل‌ونقل نیز مواجه است. به منظور غلبه بر این چالش‌ها، مدیریت قطار شهری باید به تلاش برای استفاده هرچه بهتر از برنامه‌ها و منابع خود جهت ارائه بهترین خدمت به مسافرین بپردازد. تغییرات تصادفی در تقاضای مسافر و اثرات ثانویه آن از جمله ازدحام مسافری، به خصوص در ساعات اوج ترافیک، از رایج‌ترین علل اختلال در عملیات حمل‌ونقل راه‌آهن شهری از جمله در راه‌آهن شهری تهران است. عدم واکنش سریع و مناسب به این تغییرات غیرمنتظره در تقاضای مسافر، بی‌نظمی سرفاصله زمانی حرکت قطارها و افزایش زمان‌های سفر و انتظار مسافرین ناشی از اختلالات را به دنبال خواهد داشت. در این شرایط؛ یک برنامه توقف-عبور به دنبال یافتن راه‌حلی مؤثر برای کاهش ازدحام مسافرین در ایستگاه‌ها است. چنانچه بروز اختلال موجب انحراف قابل‌ملاحظه از برنامه اولیه شود، ناچار باید برنامه زمان‌بندی اولیه و همچنین الگوهای بهره‌برداری از ناوگان جهت جبران تاخیرات تغییر یابد. اصلاح جداول زمان‌بندی به معنای مجموعه‌ای از تصمیمات است که توسط مدیریت عملیات برای بیشینه کردن سطح خدمت بعد از رخداد اختلالات انجام می‌شود. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه با تلفیق رویکرد زمانبندی مجدد و الگوی توقف-عبور در شرایط ازدحام مسافر بعد از اتمام اختلال ارائه شد. این مدل بر اساس نرخ ورود مسافر وابسته به زمان، جریان حرکت مسافرین را بر اساس برنامه زمان‌بندی شبیه‌سازی می‌کند. در مدل برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطارها امکان تعویض خط برای مسافرانی که در حین اختلال در داخل قطارها هستند، در نظر شده است. با توجه به پیچیدگی مسائل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها، حل مدل ریاضی در ابعاد واقعی به کمک روش‌های حل دقیق ممکن نبود. بر این اساس، یک الگوریتم ابتکاری تولید جواب، مبتنی بر رویکرد تجزیه مسئله، ارائه گردید. اعتبارسنجی مدل زمانبندی مجدد به کمک آزمایش‌های عددی و بر اساس داده‌های عملیاتی از خطوط راه‌آهن شهری تهران و پکن انجام شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که حتی در مسائل با ابعاد بزرگ، رویکرد حل مسئله دارای کیفیت جواب مناسب و زمان محاسباتی قابل‌قبولی بوده که این موضوع نشان‌دهنده کارایی آن در برنامه‌ریزی مجدد قطارهای راه‌آهن شهری است.

در انتها می‌توان به برخی از نقاط ضعف و نیز محدودیت‌های تحقیق اشاره نمود. در مراحل انجام این تحقیق سعی گردید که جوانب مهم مسائل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در راه‌آهن شهری در شرایط اختلال موردتوجه قرار گیرد. بر این اساس محدودیت‌های تحقیق در این مطالعه به شرح زیر شناسایی شده است: (۱) در اجرای تحقیق، دسترسی کامل به دستورالعمل‌های بهره‌برداری و روش‌های مورد استفاده توسط کارشناسان خبره در اتاق فرمان (کنترل مرکزی) شرکت راه‌آهن شهری تهران در شرایطی که اختلال رخ می‌دهد، میسر نبود. لذا امکان مقایسه آنچه در شرایط اختلال توسط کارشناسان بخش حمل‌ونقل ریلی رخ می‌دهد و آنچه مدل پیشنهادی در تحقیق عمل می‌کند، ممکن نبود، (۲) به دلیل فقدان سامانه‌های شمارش مسافر بصورت لحظه‌ای در خطوط راه‌آهن شهری تهران، امکان حل مدل زمان‌بندی مجدد بصورت پویا و بر اساس اطلاعات لحظه‌ای میسر نبود.

توسعه مدل زمان‌بندی مجدد به حالت شبکه و در نظر گرفتن اثر اختلال و تاخیرات روی زمان اضافی لازم برای

تعویض خط مسافرین یکی از زمینه‌های تحقیقات آتی است. استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری و انتخاب مسیر در شرایط اختلال، از جمله مدل‌های انتخاب شیوه سفر برای مدل‌سازی واکنش مسافرین به اختلال می‌تواند در تحقیقات آتی مدنظر قرار گیرد.

۷-مراجع

- Beirão, G. and Cabral, J.S., (2007), "Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study" Transport policy, Vol. 14, pp. 478-489.

- Canca, D., Barrena, E., Laporte, G. and Ortega, F.A., (2016), "A short-turning policy for the management of demand disruptions in rapid transit systems," Annals of Operations Research, Vol. *246*, pp.145-166.

- Clausen, J. (2007), "Disruption management in passenger transportation-from air to tracks," in 7th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways, pp. 30-47.

- Cao, Z., Yuan, Z. and Li, D., (2014), "Estimation method for a skip-stop operation strategy for urban rail transit in China" Journal of Modern Transportation, Vol. 22, pp. 174-182.

- Chang, C.S. and Thia, B.S., (1996), "Online rescheduling of mass rapid transit systems: fuzzy expert system approach" IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 143, pp. 307-316.

- Jamili, A. and Aghaee, M.P., (2015), "Robust stop-skipping patterns in urban railway operations under traffic alteration situation" Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 61, pp. 63-74.

- Jamili, A. and Nejad, M.G., "Urban Railway Operation Recovery During Disruption" in 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2015, pp. 2825-2830.

- Kabasakal, A., Kutlar, A. and Sarikaya, M., (2015), "Efficiency determinations of the worldwide railway companies via DEA and contributions of the outputs to the efficiency and TFP by panel regression," Central European Journal of Operations Research, vol. 23, pp. 69-88.

- Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X. and Wang, B., (2015), "A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks" Omega, vol. 50, pp. 29-42.

- Kang, L., Zhu, X., Wu, J., Sun, H., Siriya, S. and Kanokvate, T., (2014) "Departure Time Optimization of Last Trains in Subway Networks: Mean-Variance Model and GSA Algorithm" Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 29, pp.04014081.

- Lee, Y.J., Shariat, S. and Choi, K., (2014) "Optimizing skip-stop rail transit stopping strategy using a genetic algorithm" Journal of Public Transportation, Vol. 17, pp. 1-7.

- Li, S., De Schutter, B., Yang, L. and Gao, Z., (2016), "Robust model predictive control for train regulation in underground railway transportation" IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, pp. 1075-1083.

- Niu, H. and Zhou, X., (2013), "Optimizing urban rail timetable under time-dependent demand and oversaturated conditions," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 36, pp. 212-230.

- Niu, H., Zhou, X. and Gao, R., (2015), "Train scheduling for minimizing passenger waiting time with time-dependent demand and skip-stop patterns: Nonlinear integer programming models with linear constraints" Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 76, pp. 117-135.

- Trozzi, V., Gentile, G., Bell, M. and Kaparias, I., (2013), "Dynamic user equilibrium in public transport networks with passenger congestion and hyperpaths"

and Transportation Review, vol. 87, pp. 130-148.

– Yan, S., Lin, J.R. and Lai, C.W., (2013), "The planning and real-time adjustment of courier routing and scheduling under stochastic travel times and demands" Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 53, pp. 34-48.

– Yang, X., Chen, A., Ning, B. and Tang, T., (2016) "A stochastic model for the integrated optimization on metro timetable and speed profile with uncertain train mass" Transportation Research Part B: Methodological, vol. 91, pp. 424-445.

– Yin, J., Tang, T., Yang, L., Gao, Z. and Ran, B., (2016), "Energy-efficient metro train rescheduling with uncertain time-variant passenger demands: An approximate dynamic programming approach" Transportation Research Part B: Methodological, vol. 91, pp. 178-210.

– Zhao, X., Sun, Q., Zhu, Y., Ding, Y., Ma, C. and Chen, Z., (2016), "Multi-routing planning design of Y-type urban rail transit" Advances in Mechanical Engineering, Vol. 8, pp. 1687814016667385.

–

– Zhou, X. and Zhong, M., (2005), "Bicriteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications" European Journal of Operational Research, vol. 167, pp. 752-771.

Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol. 80, pp.427-454.

– Visentini, M.S., Borenstein, D., Li, J.Q. and Mirchandani, P.B., (2014), "Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services," Journal of Scheduling, Vol. 17, pp.541-567.

– Wang, Y., De Schutter, B., van den Boom, T.J., Ning, B. and Tang, T., (2014), "Efficient bilevel approach for urban rail transit operation with stop-skipping" IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 15, pp. 2658-2670.

– Wang, Y., Tang, T., Ning, B., van den Boom, T.J. and De Schutter, B., (2015), "Passenger-demands-oriented train scheduling for an urban rail transit network" Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 60, pp. 1-23.

– Xu, X., Li, K. and Li, X., (2014), "Research on Passenger Flow and Energy Consumption in A Subway System with Fuzzy Passenger Arrival Rates" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, pp. 0954409714524378.

– Xu, X.Y., Liu, J., Li, H.Y. and Jiang, M., (2016), "Capacity-oriented passenger flow control under uncertain demand: Algorithm development and real-world case study" Transportation Research Part E: Logistics