مدل برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطارهای مسافری در شرایط مسدودی خطوط شبکه ریلی

عرفان حسن‌نایبی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
سیدحسام الدین ذگردی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمدرضا امین ناصری، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
مسعود یقینی، دانشیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
هاشم کلانتری، مدیر گروه بهره برداری، مرکز تحقیقات و آموزش راه آهن ج.ا.ا، تهران، ایران

E-mail: zegordi@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٤/۱۰/۲۵ **پذیرش: ۱۳۹۵/۰٤/۲۰**

چکیده

رخداد حوادث و اختلالات پیش‌بینی نشده در شبکه‌های ریلی موجب افزایش زمان‌های تأخیر قطارها، کاهش ظرفیت بالقوه مسیر، افت قابلیت اطمینان و استواری برنامه زمان‌بندی می‌شود. مدیریت اختلال در راه‌آهن، شامل مجموعه روش‌هایی است که جهت مدیریت رخدادهای پیش‌بینی نشده و کاهش انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه، اتخاذ می‌گردد. در این تحقیق، مسدودی موقتی بلاک‌های یک شبکه ریلی در اثر حوادث، به عنوان عامل اختلال در برنامه حرکت قطارها در نظر گرفته شده است. زمان شروع مسدودی و مدت زمان لازم برای رفع اختلال مشخص است. در مقاله حاضر، ابتدا مدل زمان‌بندی اولیه حرکت قطارها با هدف کمینه کردن مجموع زمان سفر قطارها ارائه خواهد شد. سپس مدل برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطارها که توسعه‌یافته مدل زمان‌بندی اولیه است ارائه می‌شود. برنامه حاصل از مدل زمان‌بندی اولیه مبنای مقایسه بوده و به عنوان ورودی مدل زمان‌بندی مجدد در نظر گرفته می‌شود . مدل زمان‌بندی مجدد ارائه شده در این تحقیق می‌تواند در یک شبکه ریلی، برنامه جدیدی ارائه نماید که در آن مجموع وزنی تا خیرات قطارها در رسیدن به ایستگاه‌های مسافر گیری، کمینه شده و برنامه جدید کمترین انحراف را نسبت به برنامه اولیه داشته باشد. این برنامه جدید شامل تعیین زمان‌های حرکت قطارها در شبکه ریلی و تعیین ایستگاه‌های جدید جهت توقف برای اقامه نماز مسافرین است. به منظور افزایش سرعت حل مسئله، یک روش ابتکاری مبتنی بر محدود نمودن فضای جواب پیشنهاد شده است. جهت اعتبارسنجی مدل زمان‌بندی مجدد، از چند سناریوی مسدودی یک بلاک در مسیر تهران-اهواز-خرمشهر استفاده شده است. نتایج حل مسئله و مثال‌های واقعی نشان می‌دهد که مدل زمان‌بندی مجدد با ارائه برنامه زمان‌بندی مجدد در زمان معقول، از کارآیی مناسبی در تصمیم‌گیری بهینه در شرایط بروز اختلال از نوع مسدودی خط برخوردار است.

واژه های کلیدی: برنامه‌ریزی مجدد قطارها، مسدودی بلاک، مدیریت اختلال، شبکه ریلی

۱. مقدمه

برنامه‌ریزی اولیه در هنگام اجرا و در گام عملیاتی، به دلایل مختلفی از جمله اختلالات، با تغییرات اجتناب‌ناپذیری روبه‌رو می‌شود. اختلال یک رویداد غیرمنتظره است که در هنگام اجرای عملیات برنامه‌ریزی شده رخ داده و موجب بروز تاخیرات و انحراف از برنامه اولیه می‌شود [Kuster, Jannach and Friedrich, 2009]. تاخیرات قطارها در شبکه‌های ریلی باعث کاهش ظرفیت بالقوه، کاهش قابلیت اطمینان، ایمنی و استواری برنامه اولیه شده و می‌بایست در کمینه مقدار ممکن خود قرار داشته باشد. بروز اختلالات باعث تحمیل شدن هزینه‌های اضافی و پایین آمدن سطح خدمت به مسافرین می‌شود [Visentini et al. 2013]. بروز اختلالات اجتناب‌ناپذیر است اما سیستم حمل‌ونقل ریلی باید آمادگی لازم برای مواجهه با تبعات آن را داشته باشد. مدیریت اختلال به فرآیند انتخاب مجموعه مناسبی از اقدامات و استراتژی‌های اصلاحی بعد از رخداد یک اختلال گفته می‌شود [Kuster, Jannach and Friedrich, 2009]. معمولاً تلاش اصلی مدیریت اختلال در پیدا کردن راهی برای برگشتن به مسیر اصلی، وضعیت عادی و یا برنامه اولیه است. در تعریف دقیق‌تر، منظور از مدیریت اختلالات در شبکه‌های ریلی، مجموعه روش‌هایی جهت مدیریت و برخورد با اختلالات جهت ارائه بهترین خدمت به مسافرین است که از طریق اصلاح برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها، برنامه تخصیص و گردش واگن‌ها و لوکوموتیوها و زمان‌بندی خدمه، در حین و بعد از رخداد اختلال، صورت گیرد. به عنوان نمونه استفاده از سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر الگوریتم‌های حل مسئله زمان‌بندی مجدد راهبران و خدمه ریلی در شبکه راه‌آهن هلند مزایای مهمی به دنبال داشته است. در حادثه‌ای در سال ۲۰۰۹ که منجر به خارج شدن یک قطار باری در نزدیکی یکی از ایستگاه‌های مهم و خرابی بخشی از مسیر ریلی به طول ۵ کیلومتر شده بود، به مدت یک هفته برنامه حرکت قطارها، ناوگان و خدمه نیاز به برنامه مجدد داشت [Jespersen-Groth et al. 2009].

در راه‌آهن ایران نیز که از مشکلاتی نظیر فرسودگی ناوگان، مشکلات زیرساخت خطوط ریلی، کمبود ناوگان ریلی مناسب، ضعف سیستم‌های علائم و کنترل حرکت قطار و سرعت پایین قطارهای باری در بلاک‌ها رنج می‌برد، مسئله مدیریت اختلال از اهمیت بسیاری برخوردار است. به عنوان نمونه، محور راه‌آهن تهران – جنوب نقش مهمی در انتقال و جابجایی بار و مسافر از بنادر جنوب کشور به پایتخت را ایفا می‌کند. بر اساس اطلاعات موجود، ۷ حادثه طی ۷ ماه در محور ریلی جنوب کشور در سال ۹۳ رخ داده است. عامل اصلی بروز اختلال در تردد قطارهای این محور، خروج قطارها و واگن‌های باری از ریل بوده که عوامل اصلی ایجاد کننده آن، رخداد سوانح در این محور به دلیل فرسودگی خطوط و نیز قدمت بالای ناوگان گزارش شده است. به عنوان مثال در پی حادثه خروج ٤ واگن باری از مسیر در حد فاصل ایستگاه تنگ پنج و تنگ هفت، بخشی از مسیر برای چند ساعت مسدود شده بود. حوادث مشابهی نیز در بلاک‌های قارون- دورود، دورود - اندیمشک و سپیددشت – چمسنگر از محور به وقوع پیوسته است. در حادثه دیگری به دلیل خروج قطار از ریل در حدفاصل ایستگاه کشور و تنگ‌هفت در ناحیه لرستان و محور شمال به جنوب بخشی از مسیر مسدود شده که علت وقوع آن بارش شدید باران و ریزش کوه بوده است.

بطورکلی فرسودگی زیرساخت ریلی و ناوگان در راه‌آهن کشور باعث افزایش احتمال خرابی‌ها، حوادث و بطورکلی بروز اختلالات در شبکه ریلی شده است وعلی رغم اهمیت این موضوع، تاکنون هیچ سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی مجدد و عملیاتی حرکت قطارها تحت شرایط اختلال در راه‌آهن ایران پیاده‌سازی نشده است. سؤالات اصلی تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- "رویکردهای مربوط به مدیریت اختلالات در شبکه‌های ریلی چگونه بصورت یکپارچه قابل مدل‌سازی بوده و چه روش‌هایی برای حل این مسئله در زمان محدود مناسب‌تر است؟".
- "اختلالات مهم و محدودیت‌های خاص مسئله مدیریت اختلال در شبکه راه‌آهن کشور چیست و چگونه می‌توان مدل‌های انعطاف‌پذیری در پاسخ به این اختلالات توسعه داد؟".
- "در هنگام بروز اختلالات از نوع مسدودی خطوط که باعث کاهش ظرفیت بالقوه بهره‌برداری از مسیر می‌شود، چگونه می‌توان زمان‌های تأخیر و نیز میزان انحراف از برنامه زمان‌بندی را کاهش داد؟"

در این تحقیق مدل‌های برنامه‌ریزی عددصحیح به منظور زمان‌بندی اولیه و نیز زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در ساختارهای عمومی شبکه ریلی و با در نظر گرفتن برنامه توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی توسعه داده شده‌اند به نحوی که زمان تأخیر قطارها در ایستگاه‌های مسافری کمینه گردد. مدل‌های ارائه شده در این تحقیق قادر به تولید یک برنامه زمان‌بندی جدید در شرایط مسدودی خطوط است. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح با در نظر گرفتن شرایط راه‌آهن ایران و نیز برنامه‌ریزی مجدد توقف قطارها برای انجام فریضه نماز ارائه شده است. همچنین یک رویکرد ابتکاری به منظور کاهش زمان حل مسئله ارائه شده است. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ریاضی، چند سناریوی اختلال از نوع مسدودی بلاک در بخشی از شبکه راه‌آهن ایران (محور جنوب) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

از جمله نوآوری‌های این تحقیق ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدیدی برای برنامه‌ریزی مجدد قطارها در شبکه ریلی در شرایط اختلال از نوع مسدودی بلاک‌های تک‌خطه، دوخطه است. برای این منظور از ترکیبی از راهکارهای مدیریت اختلال از جمله تغییر زمان‌بندی، تغییر توالی اعزام و تغییر برنامه توقف قطارها استفاده شده است. مدل مدیریت اختلال پیشنهادی برای شبکه راه‌آهن برون‌شهری ایران قابل استفاده بوده و با توجه به ویژگی‌های بومی راه‌آهن کشور و محدودیت‌های خاصی مانند توقف قطارها برای اقامه نماز توسعه داده شده است. همچنین برای حل مسئله چند روش ابتکاری پیشنهاد شده است که قادر به حل مسئله در ابعاد واقعی در زمان محدود است.

۲. مرور تحقیقات گذشته

بطور کلی مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها بر اساس طول افق برنامه‌ریزی به مسائل زمان‌بندی اولیه، زمان‌بندی مجدد و زمان‌بندی لحظه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. اولین مقاله در حوزه زمان‌بندی حرکت قطارها از [Szpigel, 1973] است که در آن کمینه کردن مدت زمان کل سفر مدنظر قرار گرفته و از روش دقیق شاخه و حد برای حل مسئله استفاده شده است. نشان داده شده است که مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها از نظر پیچیدگی محاسباتی در رده مسائل NP-complete قرار دارد [Caprara, Fischetti and Toth, 2002] در ادبیات موضوع، تلاش زیادی برای ارائه و توسعه برنامه زمان‌بندی اولیه بهینه یا نزدیک به بهینه شده است. از طرفی تحقیقات کمتری به مسئله زمان‌بندی مجدد قطارها پرداخته‌اند. اولین تحقیق در زمینه زمان‌بندی مجدد قطارها در شرایط اختلال در مسیرهای تک‌خطه با استفاده از روش شاخه و کران انجام شده است [Araya, Abe and Fukumori, 1983]. زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها به معنی تدوین برنامه زمان‌بندی جدید، با هدف کاهش انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه است [Törnquist, 2007]. بطورکلی مراحل زمان‌بندی مجدد قطارها در شرایط بروز اختلال در شبکه ریلی، به شرح زیر است [Corman, Goverde and D'Ariano, 2009]:

۱. موقعیت‌یابی لحظه‌ای قطارها و تعیین پروفیل سرعت لحظه‌ای آن‌ها
۲. شناسایی تلاقی‌های احتمالی قطارها و رفع تلاقی آن‌ها از طریق به تأخیر انداختن قطارها یا تغییر نوبت یا توالی قطارها در ورود به بلاک‌ها و مسیریابی مجدد قطارها
۳. تعیین سرعت حرکت قطارها در طی مسیر در هر بلاک

ممکن است اختلال کوچکی در بخشی از یک برنامه زمان‌بندی باعث تأثیر در کل برنامه زمان‌بندی در یک شبکه ریلی شود. یک برنامه زمان‌بندی در صورت بروز یک عامل اختلال در شبکه، نیاز به اصلاح برنامه و ارائه زمان‌بندی مجدد در یک مدت زمان کوتاه دارد. برای شناسایی یک وضعیت اختلال در شبکه، باید اطلاعات لحظه‌ای از موقعیت قطارها و سرعت آن‌ها در اختیار باشد. در نتیجه، مسئله مدیریت اختلالات در شبکه ریلی، با مسئله زمان‌بندی لحظه‌ای (آنلاین) قطارها نیز در ارتباط مستقیم است. در اختلالاتی مانند مسدودی در بلاک‌ها و خطوط ایستگاه‌ها، عبور قطارها از مسیرهای جایگزین و یا بهره‌برداری از مسیر بصورت تک-خطه انجام می‌شود. با بکارگیری سیستم‌های پیشرفته علائم و کنترل حرکت قطارها، امکان مدیریت پیشرفته عملیات حمل و نقل ریلی میسر خواهد بود. مدل‌های بهینه‌سازی نیز سعی در کمینه کردن هزینه تا خیرات، یافتن جواب‌هایی برای ترمیم و بازگرداندن سناریوهای مختل شده به یک برنامه و زمان‌بندی عملیاتی، بهبود جریان ترافیکی

روی خطوط گلوگاهی و پرازدحام شبکه ریلی و همچنین بهبود توزیع سرفاصله زمانی اعزام قطارها می‌کنند.

مسئله زمان‌بندی مجدد قطارها در مسیرهای تک‌خطه در هنگام بروز اختلال به کمک رویکرد مدل‌سازی ریاضی مطالعه شده است [Şahin, 1999]. برای حل مسئله از روش‌های ابتکاری برای کمینه کردن زمان‌های تأخیر قطارها در ایستگاه‌های مبدأ، مقصد و ایستگاه‌هایی که توقف از پیش تعیین شده وجود دارد، استفاده شده است. در تحقیقی از نوریو و همکاران (۲۰۰۵) از راهکارهایی نظیر لغو حرکت قطارها، تغییر در توالی ورود یا اعزام قطارها در ایستگاه‌ها و بلاک‌ها، تغییر مسیر حرکت و تنظیم سرعت قطارها در هنگام زمان‌بندی مجدد استفاده شده است [Norio et al. 2005]. تورنکوئیست و پرسون (۲۰۰۷) برای مسئله زمان‌بندی مجدد قطارها با هدف کمینه‌سازی تأثیر انتقال تاخیرات قطارها در یک شبکه ریلی با بلاک‌های چندخطه، یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط ارائه کرده‌اند [Törnquist and Persson, 2007]. همچنین مسئله زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها که هدف آن تولید یک برنامه زمان‌بندی جدید، بعد از رخداد یک یا چند عامل اختلال با در نظر گرفتن شاخص کل تاخیرات قطارها است، بررسی شده است [Acuna-Agost et al. 2009]. برای این مسئله علاوه بر ارائه مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط، از روش تحلیل آماری نشر وقایع SAPI[1] استفاده شده است. در تحقیقی از فن، رابرتز و وستون (۲۰۱۲) به مقایسه و نقد رویکردهای بهینه‌سازی موجود در پیشینه تحقیق شامل قواعد ساده و ابتکاری اعزام شامل ترتیب با اولویت زمان ورود و نظم FIFO[2]، الگوریتم‌های فراابتکاری از جمله جستجوی ممنوع، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید SA[3]، الگوریتم ژنتیک GA[4]، الگوریتم اجتماع مورچگان ACO[5]، برنامه‌ریزی پویا و درخت تصمیم برای کمینه کردن هزینه تاخیرات قطارها پرداخته شده است [Fan, Roberts and Weston, 2012]. مسئله زمان‌بندی مجدد قطارهای مسافری تحت شرایط اختلال از نوع مسدودی جزئی یا کلی خطوط ریلی مورد بررسی قرار گرفته است [Louwerse and Huisman, 2012]. در این مسئله باید تعیین شود که چه اعزام‌هایی لغو شده و برنامه زمان‌بندی جدید برای قطارهای باقیمانده در شبکه نیز تعیین شود. در مدل برنامه‌ریزی عددصحیح پیشنهادی، مسئله برنامه‌ریزی مجدد ناوگان بطور صریح مدل‌سازی نشده است اما مدل به نحوی توسعه داده شده است که احتمال یافتن جواب‌های موجه برای این مسئله نیز بالا است. تابع هدف بصورت بیشینه کردن سطح خدمت ارائه شده به مسافرین در نظر گرفته شده و مدل پیشنهادی روی نمونه مسائل واقعی از راه‌آهن هلند ارزیابی شده است. در جدول ۱ خلاصه از مهم‌ترین مقالات در حوزه زمان‌بندی مجدد قطارها ارائه شده است.

در تحقیقات اخیر، از روش‌های ابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی محدودیت‌ها برای برنامه‌ریزی مجدد قطارها در شبکه راه‌آهن استفاده شده است. حل مسئله زمان‌بندی مجدد بصورت پویا در شرایط رخداد اختلالات انجام شده است. یک توپولوژی از شبکه تعریف شده و جدول زمانی اولیه به عنوان ورودی‌های مدل زمان‌بندی مجدد لحاظ شده است [Mladenovic et al. 2015]. همچنین مدلی توسط وانگ و همکاران (۲۰۱٤) جهت کمینه کردن کل تاخیرات و نیز تعداد قطارهای متأثر از اختلال پرداخته شده است [Wang et al. 2014]. در این مدل تقلیل سرعت حرکت روی بلاک به عنوان عامل اختلال در خطوط مسافری سریع‌السیر در نظر گرفته شده است. به عنوان مطالعه موردی، خط ریلی شانگهای چین به منظور اعتبارسنجی مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیقی از آزاد، هاسینی و ورما (۲۰۱٦) یک مدل مدیریت ریسک اختلال در شبکه راه‌آهن مبتنی بر یک روش بهینه‌سازی ارائه شده است [Azad, Hassini and Verma, 2016]. همچنین یک مدل پیش‌بینی برای شناسایی عوامل اختلال ارائه شده است که بر این اساس یک استراتژی برای کاهش زمانی‌های تأخیر طراحی شده است. این روش مدیریت ریسک اختلال در شبکه حمل و نقل راه‌آهن در شناسایی عوامل اختلال و کمک به کاهش تأثیر اختلال و تسهیل بازیابی سطح خدمت ارائه شده به مسافرین ارائه شده است. در تحقیقی از تمنایی و همکاران مدل برنامه‌ریزی مجدد قطارها برای شرایط رخداد حادثه در مسیرهای ریلی دوخطه ارائه شده است [Tamannaei et al. 2016]. برای حل مدل بهینه‌سازی از روش‌های مبتنی بر تجزیه مسئله استفاده شده است. برای کاهش زمان محاسبه، یک روش ابتکاری ارائه شده که قادر است با تجزیه مسئله و حل هر کدام از مسائل فرعی توسط الگوریتم شاخه و کران، جواب بهینه برای مسئله را بدست آورد. تجزیه و تحلیل رویکرد پیشنهاد شده در راه‌آهن خطه از شبکه ریلی ایران، نشان می‌دهد که روش تجزیه قادر به

ارائه راه‌حل‌های نزدیک به بهینه با زمان انجام محاسبات بسیار کوتاه‌تر در مقایسه با نرم‌افزار CPLEX است.

در تحقیقی از هو و همکاران (۲۰۱۶) مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها و تولید جداول زمانی حرکت در مسیرهای راه‌آهن با رویکرد تغییر زمان حرکت بر اساس اولویت قطارها ارائه شده است [Huo et al. 2016]. در تحقیق فوق، عامل اختلال ناشی از تغییر در جدول زمانی حرکت قطارها در نظر گرفته شده و با استفاده از مفهوم آنتروپی بیان شده است. در مقاله مذکور، یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط پیشنهاد شده است که می‌تواند از آن به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی مجدد جدول زمانی در هنگام بروز حوادث ریلی استفاده نمود. علاوه بر این، یک الگوریتم جستجوی ابتکاری مبتنی بر رویکرد شاخه و کران ارائه شده است. در تحقیقی از ساما و همکاران (۲۰۱۶) از الگوریتم‌های جستجوی همسایگی متغیر VNS برای برنامه‌ریزی و مسیریابی مجدد حرکت قطار در راه‌آهن سریع در شرایط ترافیک مختل شده با هدف به کمینه رساندن تأخیر قطارها استفاده کرده است [Samà, Corman and Pacciarelli, 2016]. در مقاله فوق تمرکز بر توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مشکل مدیریت ترافیک لحظه‌ای حرکت قطارها و برنامه‌ریزی و مسیریابی مجدد قطارها در شبکه‌های پیچیده راه‌آهن است. این مسئله بهینه‌سازی می‌تواند در قالب یک مدل برنامه صحیح خطی مختلط فرموله شود. با این حال، از آنجا که این مسئله به شدت NP-hard است، معمولاً تنها الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافته راه‌حل با کیفیت مناسب در یک زمان کوتاه هستند. الگوریتم فراابتکاری جدید در مقایسه یک الگوریتم جستجوی ممنوع و یک برنامه تجاری برای حل مدل‌های ریاضی مورد آزمایش قرار گرفته است. ارزیابی فوق روی چندین شبکه با ویژگی‌های ترافیکی و زیرساخت‌های ریلی مختلف انجام شده است. نتایج آزمایش‌های محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مقاله مذکور، قادر به تولید جواب‌های بهتر در مقایسه با روش‌های موجود در تحقیقات قبلی است.

تحقیقات داخلی در مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها در ایران نیز بیشتر در زمینه ارائه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی و روش‌های فراابتکاری و در تعداد محدودی نیز توسعه مدل‌های شبیه‌سازی بوده است. از جمله تحقیقات اخیر در این زمینه می‌توان به یقینی و محمدزاده (۱۳۹۰)، جمیلی (۱۳۹۰)، یقینی و نیکو (۱۳۹۰) و صفارزاده، یقینی و تمنایی (۱۳۹۱) اشاره نمود. در مدل پیشنهاد شده توسط یقینی و محمدزاده (۱۳۹۰)، بهترین ایستگاه برای توقف قطارها جهت انجام فریضه نماز انتخاب می‌شود به نحوی که باعث کاهش مجموع زمان سیر قطارها شود. حسن‌نایبی و همکاران (۱۳۹۱) یک برنامه نرم‌افزاری مبتنی بر شبیه‌سازی برای زمان‌بندی حرکت قطارهای راه‌آهن برون‌شهری ارائه کرده‌اند. نرم‌افزار پیشنهادی بر پایه متدولوژی بهینه‌سازی بر پایه‌ی شبیه‌سازی گسسته-پیشامد طراحی شده و قادر به کمینه‌سازی زمان‌های سفر قطارها در شبکه ریلی است. بر اساس مرور تحقیقات پیشین، تنها مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در تحقیقی از روشنی (۱۳۸۹) ارائه شده است. برای حل مسئله از ترکیب سیستم خبره و مدل‌سازی ریاضی استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا دسته‌بندی انواع حوادث به کمک سیستم خبره انجام شده و سپس روشی برای زمان‌بندی مجدد قطارها در شرایط بروز حوادث ارائه شده است. مدل برنامه‌ریزی عددصحیح ارائه شده، سعی در یافتن برنامه زمان‌بندی مجدد با هدف کمینه نمودن انحراف از برنامه اولیه را دارد.

از مطالعه و نقد ادبیات موضوع می‌توان نتیجه گرفت که تعداد مقالات اندکی موضوع زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها را بویژه در شبکه ریلی بررسی کرده‌اند و بنابراین با توجه به اینکه زیرساخت ریلی در راه‌آهن کشورهای مختلف مانند ایران به شکل شبکه‌ای است، کاربرد مدل‌های شبکه‌ای از اهمیت بسیاری برخوردار است. همچنین مسئله برنامه‌ریزی مجدد قطارها در شبکه راه‌آهن کشور به دلیل وجود برنامه توقف برای اقامه نماز و وجود نقاط گلوگاهی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در تحقیقات داخلی تاکنون مدلی جهت برنامه‌ریزی مجدد قطارها در شبکه‌های ریلی با ساختارهای عمومی، محدودیت‌های خط و سکو و نیز فرض توقف قطارها برای انجام فریضه نماز مسافرین ارائه نشده است. در ادامه به بیان مسئله و مدل‌سازی آن می‌پردازیم.

جدول ۱. دسته‌بندی مدل‌های زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها

نویسندگان تحقیق	نوع مسئله	مدل‌سازی	تابع هدف	زیرساخت		محدودیت‌های ویژه		روش حل
				L	N	نقاط ارتباطی (تقاطع)	تخصیص خط و سکو	
[Törnquist and Persson, 2007]	زمان‌بندی مجدد قطارها	MILP	کمینه کردن کل تاخیرات و هزینه‌ها	×	√	√	×	روش BandB
[D'Ariano et al., 2008]	زمان‌بندی و مسیریابی لحظه‌ای قطارها	مدل گراف آلترناتیو (AG)	کمینه کردن بیشینه تأخیر و متوسط تأخیرهای ثانویه	×	√	√	√	روش جستجوی محلی و BandB
[Acuna-Agost et al., 2009]	زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها	مدل MILP	کل تاخیرات قطارها	×	√	×	√	برنامه‌ریزی محدودیت‌ها CP و روش تحلیل آماری SAPI
[Corman et al., 2010]	زمان‌بندی و مسیریابی مجدد قطارها	مدل گراف آلترناتیو (AG)	کمینه کردن بیشینه تأخیر	×	√	√	×	TS
[Acuna-Agost et al., 2011]	زمان‌بندی مجدد قطارها	MILP	کمینه کردن هزینه کل	√	×	√	×	الگوریتم مبتنی بر MIP و جستجوی محلی
[Alwadood, Shuib and Hamid, 2012]	زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها	بهینه سازی- شبیه‌سازی	کمینه کردن تاخیرات	×	√	√	×	روش‌های ابتکاری
[Almodóvar and García-Ródenas, 2013]	زمان‌بندی مجدد قطارها	گراف	کمینه کردن کل زمان در سیستم	√	×	√	×	روش‌های ابتکاری حریصانه
[Kecman et al., 2013]	زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها	گراف	کمینه کردن تاخیرات ثانویه قطارها	×	√	√	√	روش ابتکاری

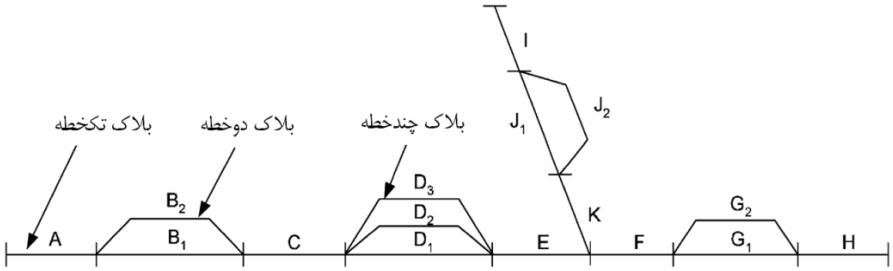
نویسندگان تحقیق	نوع مسئله	مدل‌سازی	تابع هدف	زیرساخت		محدودیت‌های ویژه		روش حل
				L	N	نقاط ارتباطی (تقاطع)	تخصیص خط و سکو	
[Yang, Zhou and Gao, 2013]	زمان‌بندی مجدد قطارها	مدل فازی MILP	کمینه کردن جریمه تاخیرات	√	×	×	×	نرم‌افزار GAMS
[Yang, Zhou and Gao, 2014]	زمان‌بندی مجدد قطارها	مدل فازی MILP	کمینه کردن جریمه تاخیرات	×	√	×	×	نرم‌افزار GAMS
[Zhan et al., 2015]	زمان‌بندی مجدد قطارها	MILP	کمینه کردن مجموع وزنی تاخیرات و اعزام‌های لغو شده	√	×	×	√	روش ابتکاری و نرم‌افزار CPLEX
[Xu, Li and Yang, 2015]	زمان‌بندی و مسیریابی مجدد قطارها	شبیه‌سازی گسسته-پیشامد	کمینه کردن تاخیرات	√	×	×	×	روش‌های ابتکاری اعزام قطارها
تحقیق حاضر	برنامه‌ریزی مجدد قطارها	مدل برنامه‌ریزی عددصحیح خطی MILP	کمینه کردن مجموع وزنی جریمه تأخیر قطارها و انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه	×	√	×	√	روش ابتکاری و نرم‌افزار GAMS

منظور از نمادهای L و N به ترتیب خط و شبکه است.

۳. بیان مسئله و مدل‌سازی

۳-۱ مفروضات

یک شبکه ریلی متشکل از ایستگاه‌های با ظرفیت مشخص و بلاک‌های تکخطه، دوخطه یا چند خطه مفروض است (شکل ۱). قطارها از مسیرهای مختلفی بین مبدأ و مقصد تعریف شده در شبکه حرکت می‌کنند. فرض می‌شود که یک برنامه زمان‌بندی اولیه برای قطارهای شبکه موجود بوده و یا توسط مدل ارائه شده در تحقیق حاضر، قابل تولید است. در لحظه بروز اختلال، قطارها در موقعیت منحصر به فردی قرار دارند و اولین بلاک/ایستگاهی که بعد از رخداد اختلال، وارد آن می‌شوند، به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. یک شبکه ریلی با بلاک‌های تکخطه، دوخطه و چندخطه

مسدودی بلاک به عنوان تنها عامل اختلال در مدل زمان‌بندی مجدد در نظر گرفته شده است. زمان شروع مسدودی (لحظه بروز اختلال) و مدت رفع مسدودی ورودی مسئله است. مسدودی می‌تواند در بلاک تک‌خطه یا دوخطه رخ دهد که هر کدام شرایط خاصی را برای ترافیک شبکه ایجاد می‌نمایند. در صورتی که مسدودی در بلاک تکخطه رخ دهد، تا زمان رفع مسدودی، هیچ قطاری امکان حرکت در مسیر را ندارد. اما در صورتی که یکی از خطوط بلاک دوخطه مسدود شود، بهره‌برداری از مسیر در مدت اختلال بصورت تکخطه و بعد از آن بصورت عادی انجام می‌شود (شکل ۲). هدف اصلی، ارائه یک برنامه زمان‌بندی مجدد از لحظه بروز اختلال تا انتهای افق زمان‌بندی است، به نحوی که هزینه تاخیرات و انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه در آن کمینه باشد.

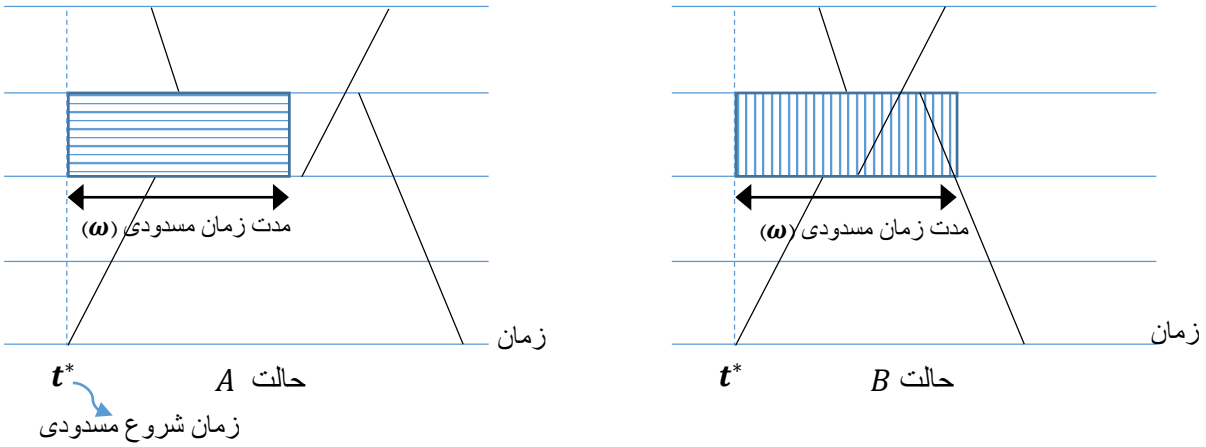
مطابق مقررات عمومی سیر و حرکت در راه‌آهن ج.ا.ا، کلیه دستورات و فرمان‌های لازم برای حرکت و توقف قطارها که در شرایط اضطراری و رخداد اختلال، از طرف کارشناس کنترل مرکزی به رئیس قطار ابلاغ می‌شود. مأمورین کنترل وظیفه نظارت بر سیر قطارها مطابق برنامه را بر عهده دارند و برای حرکت، تلاقی، سبقت قطارها و همچنین برای عملیات مانور به موقع دستورات لازم را به ایستگاه‌ها بدهد و در مواقعی که قطاری زودتر یا دیرتر از برنامه ابلاغی به ایستگاهی وارد شود به منظور اینکه در سر ساعت مقرر و یا حدود آن به مقصد برسد، از توقف در ایستگاه‌ها تا آنجا که میسر باشد با نظر و اطلاع ایستگاه مربوطه بکاهد ولی تحت هیچ شرایطی هیچ قطاری زودتر از برنامه تنظیم شده مجاز به حرکت از ایستگاه‌ها نیست. با انطباق مقررات عمومی سیر و حرکت در راه‌آهن ج.ا.ا، مدل برنامه زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها ارائه شده در این تحقیق، از ترکیب استراتژی‌های زیر استفاده می‌کند:

- تغییر توالی ورود قطارها به بلاک‌ها و امکان سبقت قطارها در ایستگاه‌ها
- افزایش یا کاهش زمان سیر قطارها روی بلاک‌ها در بازه مجاز
- کاهش یا افزایش سرفاصله زمانی حرکت بین قطارها در بازه مجاز
- تغییر در برنامه توقف قطارها شامل افزایش یا کاهش زمان توقف در ایستگاه‌ها و در بازه مجاز
- تغییر ایستگاه توقف قطارها برای اقامه نماز

۳-۲ مدل‌های زمان‌بندی اولیه و زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در شبکه‌های ریلی

در این بخش، مدل‌های زمان‌بندی اولیه و نیز زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در شبکه‌های ریلی توسعه داده می‌شود. نمادهای بکاررفته در مدل‌های برنامه‌ریزی اولیه و برنامه‌ریزی مجدد در

جدول ۲ خلاصه شده است. مجموعه‌ای از قطارهایی که در لحظه بروز اختلال هنوز زمان‌بندی آن‌ها تمام نشده است، موجود بوده و در مجموعه I قرار داده شده‌اند. هر قطار از m_i بلاک یا ایستگاه عبور می‌کند. در بین ایستگاه‌های موجود در مسیر هر قطار، تعدادی جهت مسافرگیری در نظر گرفته می‌شود که دیرکرد در رسیدن به این ایستگاه‌ها و نیز اعزام با تأخیر از آن‌ها با جریمه همراه است. با توجه به ساختار شبکه‌ای ریلی در این تحقیق، موقعیت هر قطار بعد از رویداد اختلال با اولین بلاک یا ایستگاهی که به آن وارد می‌شود، مشخص می‌گردد که برای این منظور از نماد β_i استفاده شده است.



شکل ۲. مسدودی در بلاک‌های تک خطه (A) و دوخطه (B) و نحوه رفع تلاقی حرکت قطارها

جهت مدل‌سازی صحیح شرایط رفع تلاقی قطارها در بلاک‌های تکخطه و نیز خطوط ایستگاه، از پارامتر v_{ij} به منظور تعیین جهت حرکت در هر بخش از شبکه ریلی استفاده شده است. بصورت قراردادی و بدون وارد شدن خدشه‌ای به کلیت مدل‌سازی، برای هر بلاک/ایستگاه دو جهت رفت و برگشت تعریف می‌شود. اگر قطاری از بلاکی عبور نکند مقدار v_{ij} متناظر با آن برابر با صفر است. حال اگر مقدار v_{ij} برای دو قطار در یک بلاک غیرصفر و حاصل‌ضرب آن منفی باشد نشان دهنده این است که دو قطار غیرهم‌جهت بوده و برای رفع تلاقی نیاز به برقراری یک محدودیت ریاضی در مدل است. برای ایستگاه‌های مسیر نیز اگر دو قطار به خط مشترکی از یک ایستگاه تخصیص یافته باشند، در این صورت نیز مشابه رفع تلاقی در بلاک‌های مسیر، شرایط مدل در نظر گرفته می‌شود.

تأخیر در زمان اعزام قطار در ایستگاه‌های مسافری باعث افزایش زمان انتظار مسافرین روی سکو می‌شود. همچنین دیرکردها باعث افزایش زمان سفر مسافرین داخل قطار می‌گردد. برای این منظور با توجه به وجود ایستگاه‌های مسافر گیری در بین راه برای قطار i، تأخیر در رسیدن به ایستگاه و یا زودتر رسیدن قطار به ایستگاه، مستلزم یک جریمه بوده که برای این منظور از نماد μ_{ij}^{S} استفاده شده است. همچنین اعزام دیرتر قطار از برنامه اولیه در ایستگاه‌های مسافرگیری باعث افزایش زمان انتظار مسافرین می‌گردد که برای این منظور نیز بصورت جداگانه از پارامتر جریمه μ_{ij}^{E} استفاده شده است. این جریمه متناسب با حجم مسافر داخل قطار و نیز حجم تقاضای سفر در ایستگاه‌های مختلف، تعیین می‌شود.

در مورد مسدودی بلاک‌ها، ذکر این توضیح ضروری است که اگر $nt_j = 1$ باشد، آنگاه مسدودی به یک بلاک تک‌خطه اشاره دارد، اگر $nt_j = 2$ باشد، می‌تواند به یک بلاک دوخطه و یا یک ایستگاه با دو خط قبول و اعزام اطلاق گردد. همچنین $nt_j \geq 3$ نیز معمولاً به ایستگاه با کمینه ۳ خط قبول و اعزام اشاره دارد. گرچه می‌تواند معادل با یک بلاک ۳ خطه نیز در نظر گرفته شود به‌طوری که هر خط ایستگاه به یکی از مسیرهای ورودی و خروجی به ایستگاه اختصاص یافته باشد. متغیرهای تصمیم مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. متغیرهای تصمیم شامل زمان‌های ورود و خروج جدید در ایستگاه‌ها، برنامه توقف جدید قطارها در ایستگاه‌ها برای انجام فریضه نماز و تخصیص مجدد قطارها به خطوط داخل ایستگاه است. همچنین متغیرهای رفع تلاقی قطارها در بلاک‌های تک خطه و یا در زمان مسدودی در مدل لحاظ شده است.

جدول ۲. نمادها، پارامترها و مجموعه‌ها در مدل برنامه‌ریزی ریاضی

نماد	تعریف
i	اندیس قطار
j	اندیس بلاک-ایستگاه
u	اندیس شماره خط ایستگاه
k	شمارنده بلاک/ایستگاه در مسیر حرکت هر قطار
p	اندیس بازه‌های افق شرعی (که زمان انتهای آن بازه، بعد از زمان رخداد اختلال باشد)
J	مجموعه بلاک‌ها/ایستگاه‌های موجود در شبکه
I	مجموعه قطارهایی که در لحظه بروز اختلال هنوز به مقصد نرسیده‌اند.
J_i	مجموعه ایستگاه‌ها/بلاک‌هایی که قطار iام از آن عبور می‌کند. ($J_i \subseteq J$)
J_B	مجموعه بلاک‌هایی که مسدودی در آن‌ها رخ داده است ($J_B \subseteq J$)
E_i	مجموعه ایستگاه‌هایی که قطار iام جهت مسافرگیری در آن‌ها توقف دارد. ($E_i \subseteq J_i$)
U_j	مجموعه خطوط ایستگاه/بلاک jام
N	تعداد کل قطارهای شبکه ریلی
P	تعداد بازه‌های افق شرعی در یک شبانه‌روز
m_i	تعداد کل بلاک‌ها و ایستگاه‌های مسیر قطار iام
nt_j	تعداد خطوط ایستگاه/بلاک jام
$t_{ij}^{min}, t_{ij}^{max}$	کمینه و حداکثر زمان سیر/توقف قطار iام در بلاک/ایستگاه jام
r_i^L, r_i^U	زودترین و دیرترین زمان برنامه‌ریزی شده اعزام قطار iام از مبدأش
h_j	کمینه سرفاصله زمانی بین ورود/خروج هم‌زمان قطارها از ایستگاه j
$\hat{S}_{ij}$	زمان ورود قطار iام به بلاک/ایستگاه jام در برنامه زمان‌بندی اولیه
$\hat{E}_{ij}$	زمان ترک قطار iام از بلاک/ایستگاه jام در برنامه زمان‌بندی اولیه
α_{ik}	شماره kامین بلاک/ایستگاهی که قطار iام از آن عبور می‌کند.
β_i	شماره اولین بلاک/ایستگاه در مسیر قطار i که بعد از لحظه اختلال، وارد آن می‌شود. (اگر $\beta_i = 1$ باشد، آنگاه قطار iام در لحظه بروز اختلال، هنوز اعزام نشده و اگر $\beta_i > 1$ باشد، آنگاه قطار iام در لحظه بروز اختلال، از ایستگاه مبدأش اعزام شده است)
v_{ij}	اندیس جهت حرکت قطار روی بلاک jام (۰ برای عدم عبور، ۱ برای رفت و ۱- برای برگشت)
t_j^*	زمان شروع مسدودی بلاک jام (دقیقه)
ω_j	مدت زمان مسدودی بلاک jام (دقیقه)
μ_{ij}^{S}	جریمه زود کرد/دیرکرد ورود قطار i به ایستگاه j
μ_{ij}^{E}	جریمه دیرکرد اعزام قطار i از ایستگاه j
G_{pi}	اگر قطار i قبل از شروع مسدودی، در بازه افق شرعی p برای اقامه نماز توقف داشته است برابر با ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
q_{pj}	زمان توقف قطارها به دلیل اقامه نماز در بازه افق شرعی pام در ایستگاه j
γ_j	اگر ایستگاه j دارای نمازخانه باشد برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
L_p, U_p	ابتدا و انتهای بازه افق شرعی pام

نماد	تعریف
M	یک عدد مثبت بسیار بزرگ

جدول ۳. متغیرهای تصمیم مدل برنامه‌ریزی عددصحیح

نماد	تعریف
s_{ij}	زمان جدید ورود قطار i به بلاک/ایستگاه j
e_{ij}	زمان جدید ترک قطار i از بلاک/ایستگاه j
t_{ij}	زمان جدید سیر یا توقف قطار iام در بلاک/ایستگاه jام
b_{ij}	اگر زمان ورود قطار i به بلاک مسدودی jام قبل از زمان اتمام مسدودی باشد برابر ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
$x_{i_1,i_2,j}$	اگر قطار i_1 قبل از قطار i_2 وارد بلاک/ایستگاه j شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
$y_{i_1,i_2,j}$	اگر قطار i_1 بعد از قطار i_2 وارد بلاک/ایستگاه j شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
z_{iju}	اگر قطار i در بلاک/ایستگاه j به خط شماره u وارد شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.
g_{pij}	اگر قطار i در بازه افق شرعی pام در ایستگاه j توقف کند برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
AP_{pi}	اگر قطار i ملزم به توقف در بازه افق شرعی pام باشد برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر ۰ است.
τ_{pi}	اگر در لحظه اختلال، زمان اعزام قطار i از اولین ایستگاه/بلاک در مسیرش، قبل از شروع بازه افق شرعی pام باشد برابر ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
φ_{pi}	اگر زمان رسیدن قطار i به مقصد بعد از انتهای بازه افق شرعی pام باشد برابر ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.
$\xi_{i,\alpha_{ik}}$	متغیر کمکی صفر و یک به منظور خطی سازی تابع هدف مدل زمان‌بندی مجدد

جهت نمادگذاری بهتر مسئله، مدل زمان‌بندی اولیه با نماد $[\mathrm{TTP_B}]$ و مدل زمان‌بندی مجدد با نماد $[\mathrm{TTP_R}]$ نمایش داده خواهد شد. تابع هدف مدل زمان‌بندی اولیه، مجموع زمان سفر قطارها است که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. عبارت $e_{i,\alpha_{i,m_i}}$ بیانگر زمان رسیدن به مقصد برای قطار i و عبارت $s_{i,\alpha_{i,1}}$ نیز زمان حرکت از مبدأ قطار را نشان می‌دهد.

$$\min z = \sum_{i\in I}\left(e_{i,\alpha_{i,m_i}} - s_{i,\alpha_{i,1}}\right) \qquad (۱)$$

تابع هدف مسئله زمان‌بندی مجدد تحت شرایط اختلال، کمینه کردن مجموع جریمه تأخیر در اعزام از ایستگاه‌ها؛ جمله اول از رابطه (۲) و جریمه انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه؛ جمله دوم از رابطه (۲) در کلیه ایستگاه‌های مسافرگیری در مسیر حرکت قطارها است. در مورد جمله دوم تابع هدف نیز ذکر این نکته ضروری است که به دلیل اینکه رسیدن زودتر یا دیرتر قطار به ایستگاه موجب انحراف از برنامه اولیه می‌شود، بنابراین هر دو انحراف زودکرد یا دیرکرد آن ممکن است رخ دهد و در نتیجه این انحرافات در تابع هدف با جریمه همراه شده است.

$$\min z = \sum_{i\in I,\alpha_{ik}\in E_i,\beta_i\le k\le m_i}\left(\mu^{\mathrm{E}}_{i,\alpha_{ik}}.\left(e_{i,\alpha_{ik}} - \hat{E}_{i,\alpha_{ik}}\right) + \mu^{\mathrm{S}}_{i,\alpha_{ik}}.\left|s_{i,\alpha_{ik}} - \hat{S}_{i,\alpha_{ik}}\right|\right) \qquad (۲)$$

به منظور خطی سازی عبارت قدرمطلق در جمله تابع هدف از لم ارائه شده در پیوست استفاده شده است. بعد از خطی سازی عبارت غیرخطی، تابع هدف مدل زمان‌بندی مجدد بصورت زیر خلاصه شده و محدودیت (٤) نیز به مدل ریاضی اضافه می‌شود.

$$\min z = \sum_{i\in I,\alpha_{ik}\in E_i,\beta_i\le k\le m_i}\left(\mu^{\mathrm{E}}_{i,\alpha_{ik}}.\left(e_{i,\alpha_{ik}} - \hat{E}_{i,\alpha_{ik}}\right) + \mu^{\mathrm{S}}_{i,\alpha_{ik}}.\left(s_{i,\alpha_{ik}} - \hat{S}_{i,\alpha_{ik}} + 2\xi_{i,\alpha_{ik}}\right)\right) \qquad (۳)$$

$$\hat{S}_{i,\alpha_{ik}} - s_{i,\alpha_{ik}} + \xi_{i,\alpha_{ik}} \le 0 \quad i \in I,\ \alpha_{ik} \in E_i, \beta_i \le k \le m_i \qquad (٤)$$

محدودیت رفع تلاقی در مجموعه بلاک‌های مسدودی در روابط (۵) الی (۷) بیان شده است. اگر بلاک مسدود شده، تک‌خطه باشد، آنگاه زمان ورود تمامی قطارهای ورودی به آن بلاک، باید بعد از اتمام زمان مسدودی باشد. رابطه (۵) بیان می‌کند، به شرط قرارگیری یک بلاک مسدودی ($j \in J_B$) در مسیر یک قطار ($j \in J_i$)، زمان ورود به بلاک مسدودی باید بعد از اتمام زمان مسدودی خط باشد ($t_j^* + \omega_j$).

$$s_{ij} \ge t_j^* + \omega_j \quad i \in I, \quad j \in J_B, \quad j \in J_i, \quad nt_j = 1 \qquad (٥)$$

اگر مسدودی در یکی از خطوط یک بلاک دوخطه رخ داده باشد، آنگاه در مدت رفع اختلال، بهره‌برداری از مسیر بصورت تک‌خطه صورت گرفته و باید رفع تلاقی قطارها و ترتیب ورود آن‌ها به بلاک تعیین انجام شود. این شرایط در روابط (٦) و (٧) خلاصه شده است. با توجه به اینکه در مدل زمان‌بندی مجدد، برنامه‌ریزی قطارها از زمان $t = \min_{j \in J_B}\{t_j^*\}$ به بعد انجام می‌شود، در نتیجه تنها کافی است که زمان انتهای مسدودی در محدودیت‌های مدل بررسی شود.

$$s_{ij} \le t_j^* + \omega_j + M.\left(1 - b_{ij}\right) \quad i \in I, j \in J_B, j \in J_i, nt_j = 2 \qquad (٦)$$

$$s_{ij} \ge t_j^* + \omega_j - M.\, b_{ij} \quad i \in I, j \in J_B, j \in J_i, nt_j = 2 \qquad (٧)$$

بطور کلی اگر مسدودی در بلاک تک‌خطه ($nt_j = 1,\ j \in J_B$) باشد، آنگاه نیازی به تعریف متغیر b_{ij} نیست. مطابق با محدودیت (۸) در ایستگاه‌های مسافرگیری، قطارها اجازه ندارند زودتر از موعد برنامه‌ریزی شده اعزام شوند. اما برای سایر ایستگاه‌ها، قطارها در صورت تغییر برنامه می‌توانند زودتر از موعد مقرر اعزام شوند.

$$e_{ij} \ge \hat{E}_{ij} \quad i \in I, j \in E_i \qquad (٨)$$

مطابق رابطه (۹) زمان رسیدن به انتهای هر بلاک (یا زمان اعزام از ایستگاه) برای هر قطار برابر است با زمان ورود به بلاک/ایستگاه بعلاوه زمان سیر/توقف آن در بلاک/ایستگاه موردنظر.

$$e_{i,\alpha_{ik}} = s_{i,\alpha_{ik}} + t_{i,\alpha_{ik}} \quad i \in I, \beta_i \le k \le m_i \qquad (٩)$$

رابطه (۱۰) بیان می‌کند که در صورتی که قطار در لحظه اختلال هنوز از مبدأش اعزام نشده باشد، باید محدودیت زمان اعزام از مبدأ را رعایت نماید.

$$r_i^L \le s_{i,\alpha_{i1}} \le r_i^U \quad i \in I, \beta_i = 1 \qquad (١٠)$$

مطابق با رابطه (۱۱) زمان شروع به حرکت قطار از ایستگاه/بلاک معادل با زمان ترک بلاک/ایستگاه قبلی است.

$$e_{i,\alpha_{ik}} = s_{i,\alpha_{i,k+1}} \quad \beta_i \le k \le m_i - 1 \qquad (١١)$$

بر اساس فرضیات مسئله، زمان سیر/توقف قطار در بلاک/ایستگاه متغیر بوده اما باید در محدوده کمینه و حداکثر تعریف شده قرار بگیرد.

$$t_{i,\alpha_{ik}}^{min} \le t_{i,\alpha_{ik}} \le t_{i,\alpha_{ik}}^{max} \quad i \in I, \beta_i \le k \le m_i \qquad (١٢)$$

محدودیت رفع تلاقی قطارها در روابط (۱۳) و (١٤) بیان شده است. اگر هر دو قطار i_1, i_2 قصد عبور از بلاک/ایستگاه را داشته باشند ($v_{i_1,j} * v_{i_2,j} \ne 0$)، آنگاه باید یک کمینه فاصله زمانی (h_j) بین ورود قطارها به آن بلاک/ایستگاه تعریف شود.

$$s_{i_2,j} \ge e_{i_1 j} + h_j - M.\left(3 - x_{i_1,i_2,j} - b_{i_1,j} - b_{i_2,j}\right) \quad i_1, i_2 \in I,\ i_1 < i_2 \quad v_{i_1,j} * v_{i_2,j} \ne 0 \qquad (١٣)$$

$$s_{i_1,j} \ge e_{i_2,j} + h_j - M.\left(3 - y_{i_1,i_2,j} - b_{i_1,j} - b_{i_2,j}\right) \quad i_1, i_2 \in I,\ i_1 < i_2 \quad v_{i_1,j} * v_{i_2,j} \ne 0 \qquad (١٤)$$

محدودیت تخصیص خطوط به قطارها نیز در رابطه (۱۵) بیان شده است. هر قطار برای عبور از ایستگاه/بلاک تنها به یکی از خطوط قابل‌قبول تخصیص می‌یابد.

$$\sum_{u=1}^{nt_{\alpha_{ik}}} z_{i,\alpha_{ik},u} = 1 \quad i \in I, \beta_i \le k \le m_i \qquad (١٥)$$

ارتباط منطقی بین متغیرهای توالی ورود به خطوط ریلی در محدودیت‌های (١٦) و (١٧) خلاصه شده است. اگر هر دو قطار i_1 و i_2 به یک خط مشترک از ایستگاه/بلاک j تخصیص یافته باشند، آنگاه روابط پیش‌نیازی بین این دو قطار در ورود به ایستگاه/بلاک j تعریف می‌شود. محدودیت (۱۷) نشان می‌دهد که هر دو قطار i_1 و i_2 می‌بایست با ترتیب مشخصی به هر خط از شبکه ریلی وارد شوند.

$$z_{i_1,j,u} + z_{i_2,j,u} - 1 \le x_{i_1,i_2,j} + y_{i_1,i_2,j} \quad i_1, i_2 \in I,\ i_1 < i_2,\ v_{i_1,j} * v_{i_2,j} \neq 0,\ 1 \le u \le nt_i \tag{۱۶}$$

$$x_{i_1,i_2,j} + y_{i_1,i_2,j} \le 1 \quad i_1, i_2 \in I,\ i_1 < i_2,\ v_{i_1,j} * v_{i_2,j} \neq 0 \tag{۱۷}$$

مطابق قوانین سیر و حرکت راه‌آهن ایران، شرکت قطارهای مسافری در برنامه همه قطارهایی که با فاصله زمانی کمتر از

$$\sum_{\beta_i \le k \le m_i} g_{p,i,\alpha_{ik}} = AP_{pi}.\ 1 - G_{pi} \quad i \in I,\ \forall p \tag{۱۸}$$

بیان می‌کند که در صورتی که قطار i ملزم به توقف در بازه افق شرعی p باشد ($AP_{pi} = 1$) و همچنین قبل از شروع مسدودی، توقف برای اقامه نماز نداشته باشد، باید در یکی از ایستگاه‌های بین راه توقف کند. محدودیت (۱۹) نشان می‌دهد که قطارها فقط در ایستگاه‌هایی که به نمازخانه مجهز است امکان توقف برای اقامه نماز را دارند. محدودیت (۲۰) بیان می‌کند که اگر قطاری در بازه افق شرعی اعزام شده باشد و بعد از انتهای بازه افق شرعی به مقصد برسد، بایستی در بین راه برای اقامه نماز توقف داشته باشد و در غیر اینصورت، ملزم به توقف نیست. متغیرهای کمکی τ_{pi} و φ_{pi} برای تعیین وجود یا عدم وجود هم‌پوشانی بین اوقات شرعی و زمان حرکت قطار از اولین ایستگاه و رسیدن به ایستگاه مقصد، تعریف شده‌اند و محدودیت‌های مربوطه در روابط (۲۱) و (۲۲) آمده است. رابطه (۲۱) تعیین می‌کند که آیا زمان ورود قطار به ایستگاه قبل از شروع بازه مجاز برای توقف قطارها جهت اقامه نماز است یا خیر. بطور مشابه محدودیت (۲۲) اشاره به شرایطی دارد که زمان ورود قطار به ایستگاه بعد از انتهای بازه مجاز توقف قطارها جهت اقامه نماز است. محدودیت (۲۳) نیز بیان می‌کند که در صورت توقف قطار برای اقامه نماز، باید کل زمان در بازه مجاز قرار داشته باشد. در مدل زمان‌بندی اولیه، مقادیر پارامتر β_i همگی برابر با ۱ و مقدار G_{pi} برابر با ۰ خواهند بود. همچنین مقادیر متغیرهای b_i نیز برابر با ۱ است. برای مدل زمان‌بندی مجدد و در صورتی که اختلال در مسیر تک‌خطه رخ دهد آنگاه b_i نیز برابر با ۱ است.

$$\sum_{\beta_i \le k \le m_i} g_{p,i,\alpha_{ik}} = AP_{pi}.\left(1 - G_{pi}\right) \quad i \in I,\ \forall p \tag{۱۸}$$

$$g_{pij} \le \gamma_j, \quad \forall p,\ i \in I,\ j \in J_i. \tag{۱۹}$$

یک ساعت بعد از اذان از ایستگاه مبدأ حرکت می‌کنند و مدت سیر آن به قدری طولانی است که پس از رسیدن به مقصد آن وعده نماز قضا می‌شود، پیش‌بینی اجرای فریضه نماز می‌شود. به همین ترتیب، قطار در ایستگاهی که از قبل برنامه‌ریزی شده است به مدت ۲۰ دقیقه توقف می‌نماید. رابطه

در پایان این بخش، مدل‌های زمان‌بندی اولیه و زمان‌بندی مجدد بصورت زیر خلاصه می‌شوند:

$$[\mathrm{TTP_B}]: \min z = \sum_{i \in I} (e_{i,\alpha_{i,m_i}} - s_{i,\alpha_{i,1}})$$
s.t.

محدودیت‌های (۲۴)-(۹)

$$[\mathrm{TTP_R}]: \min z = \sum_{i \in I, \alpha_{ik} \in E_i, \beta_i \le k \le m_i} \left(\mu^{\mathrm{E}}_{i,\alpha_{ik}}.\left(e_{i,\alpha_{ik}} - \hat{E}_{i,\alpha_{ik}}\right) + \mu^{\mathrm{S}}_{i,\alpha_{ik}}.\left(s_{i,\alpha_{ik}} - \hat{S}_{i,\alpha_{ik}} + 2\xi_{i,\alpha_{ik}}\right)\right)$$
s.t.

محدودیت‌های (۲۴)-(٤)

مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی با بیش از دو مرحله، در رده مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد [Pinedo, 2012]. مدل ارائه شده در این تحقیق نیز حالت پیچیده‌تری از مسئله زمان‌بندی کارکارگاهی است و برای حالتی که تعداد ایستگاه‌های مسیر کمینه ۳ ($m \ge 3$) و کمینه ۲ قطار ($n \ge 2$) جهت زمان‌بندی وجود داشته باشد، مسئله در رده مسائل NP-Hard است. مدل زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها نیز در قالب یک مدل زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر یا محدودیت ظرفیت ماشین‌ها، قابل‌بیان است. در تحقیقی از آلبرشت، پاتون، و لی (۲۰۱۳) به پیچیدگی محاسباتی مدل‌های زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در شبکه‌های ریلی اشاره شده است و نشان داده شده است که این مسئله در رده مسائل با پیچیدگی محاسباتی NP-complete قرار دارد [Albrecht, Panton, and Lee, 2013].

$$2.AP_{pi} \le \tau_{pi} + \varphi_{pi} \le 1 + AP_{pi}, \quad \forall p,\ i \in I. \tag{۲۰}$$

$$e_{i,\alpha_{i,\beta_i}} \le L_p + M.(1-\tau_{pi}), \qquad \forall p,\ i \in I. \tag{۲۱}$$

$$U_p \le e_{i,\alpha_{i,m_i}} + M.(1-\varphi_{pi}), \qquad \forall p,\ i \in I. \tag{۲۲}$$

$$L_p - M.(1-g_{pij}) \le e_{ij} \le U_p + M.(1-g_{pij}) - q_{pj}, \quad \forall p,\ i \in I,\ j \in J_i. \tag{۲۳}$$

$$x_{i_1,i_2,j}, y_{i_1,i_2,j}, z_{iju}, b_i, g_{pij}, \varphi_{pi}, \tau_{pi}, AP_{pi}, \xi_{i,\alpha_{ik}} \in \{0,1\}, \qquad s_{ij}, t_{ij}, e_{ij} \in \mathcal{R}^+. \tag{۲۴}$$

٤. روش حل ابتکاری

در این بخش، یک روش ابتکاری برای حل مسئله پیشنهاد شده است. ایده اصلی در روش پیشنهادی این است که ساختار جواب برنامه زمان‌بندی مجدد تا حد ممکن به برنامه زمان‌بندی اولیه باشد. در واقع انتظار می‌رود بخش عمده‌ای از مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در جواب اولیه، برای جواب بهینه مدل زمان‌بندی مجدد نیز ثابت باقی بمانند. البته این موضوع به شرایط و نیز تبعات اختلال بستگی دارد. بدین ترتیب با محدود نمودن فضای جواب مدل زمان‌بندی مجدد می‌توان، سرعت حل مسئله را بهبود بخشید. موضوع مهم دیگر، امکان غیرموجه شدن جواب‌ها با اضافه شدن محدودیت‌های گفته شده است. در تحقیقی از ژان و همکاران (۲۰۱۵) یک روش ابتکاری مبتنی بر قاعده اعزام بر اساس اولویت قطارها ارائه شده است [Zhan et al. 2015]. بر اساس این قاعده، ترتیب اعزام قطارهای هم‌جهت بر اساس برنامه اولیه بوده و تغییر در توالی اعزام انجام نمی‌شود. بدین ترتیب امکان سبقت قطارها نیز وجود نخواهد داشت. در این قاعده، کماکان امکان تغییر برنامه تخصیص قطارها به خطوط داخل ایستگاه وجود دارد. به منظور بررسی اینکه استراتژی‌های زمان‌بندی مجدد در مدل پیشنهادی به درستی عمل می‌کنند، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از این قاعده اعزام قطارها مقایسه می‌شود. طبق این قاعده، اگر در برنامه زمان‌بندی اولیه، قطار t_1 قبل از قطار t_2 اعزام شده باشد، در برنامه زمان‌بندی جدید این ترتیب حفظ خواهد شد (در صورتی که هر دو قطار اعزام شوند و برنامه حرکت آن‌ها لغو نشود). با توجه به این واقعیت که تنها تعداد اندکی از قطارها می‌توانند ترتیب اعزام خود را در زمان اختلال تغییر دهند. این قاعده اعزام معمولاً توسط مأمورین اعزام قطارها در ایستگاه‌های راه‌آهن ایران نیز رعایت می‌شود. در ادامه سه استراتژی برای محدود نمودن فضای جواب تشریح می‌شود.

۱. ثابت نگه‌داشتن برنامه تخصیص قطارها به تمام یا زیرمجموعه‌ای از خطوط ایستگاه در برنامه زمان‌بندی مجدد

در این روش، پارامتری برای ذخیره مقادیر بهینه متغیر تصمیم مربوط به تخصیص قطارها به خطوط ایستگاه‌ها تعریف می‌شود. برای این منظور از نماد $\hat{Z}_{iju}$ استفاده می شود:

$\hat{Z}_{iju}$ اگر در برنامه زمان‌بندی اولیه، قطار i در بلاک/ایستگاه j به خط شماره u تخصیص داده شده باشد برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

در استراتژی اول، محدودیت (۱۵) از مدل حذف شده و به جای آن محدودیت زیر به مدل برنامه‌ریزی مجدد قطارها اضافه می‌شود:

$$z_{iju} = \hat{Z}_{iju} \qquad i \in I, \quad j \in E_i, \quad u \in U_j \tag{۲۵}$$

۲. ثابت نگه‌داشتن ترتیب اعزام قطارها و توالی ورود به تمام یا زیرمجموعه‌ای از بلاک‌ها مطابق با برنامه اولیه

در این روش، پارامترهایی برای ذخیره مقادیر بهینه متغیر تصمیم مربوط به توالی ورود/اعزام قطارها به بلاک‌ها تعریف می‌شوند. برای این منظور از نمادهای $\hat{x}_{i_1,i_2,j}$ و $\hat{y}_{i_1,i_2,j}$ استفاده می شود:

$\hat{x}_{i_1,i_2,j}$ اگر در زمان‌بندی اولیه، قطار i_1 قبل از قطار i_2 وارد بلاک/ایستگاه j شده باشد برابر با ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.

اگر در زمان‌بندی اولیه، قطار i_1 بعد از قطار i_2

$\hat{y}_{i_1,i_2,j}$ وارد بلاک/ایستگاه j شده باشد برابر با ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.

در استراتژی دوم، محدودیت (۱۷) از مدل حذف شده و به جای آن محدودیت‌های زیر به مدل برنامه‌ریزی مجدد قطارها اضافه می‌شود:

$$x_{i_1,i_2,j} = \hat{x}_{i_1,i_2,j} \quad i \in I, \quad j \in E_i, \quad u \in U_j \qquad (۲۶)$$

$$y_{i_1,i_2,j} = \hat{y}_{i_1,i_2,j} \quad i \in I, \quad j \in E_i, \quad u \in U_j \qquad (۲۷)$$

۵. ترکیب استراتژی‌های اول و دوم

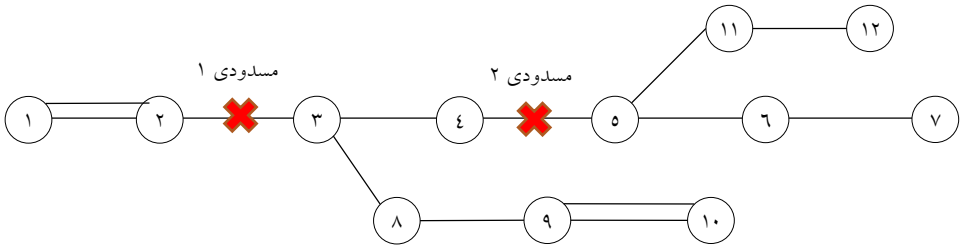
در استراتژی سوم، ترکیبی از رویکردهای قبلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت‌های (۱۵)-(۱۷) از مدل ریاضی حذف شده و به جای آن محدودیت‌های (۲۵) الی (۲۷) به مدل برنامه‌ریزی مجدد قطارها اضافه می‌شود. در این تحقیق از استراتژی سوم به منظور حل مسئله استفاده می‌شود.

٦. مثال عددی

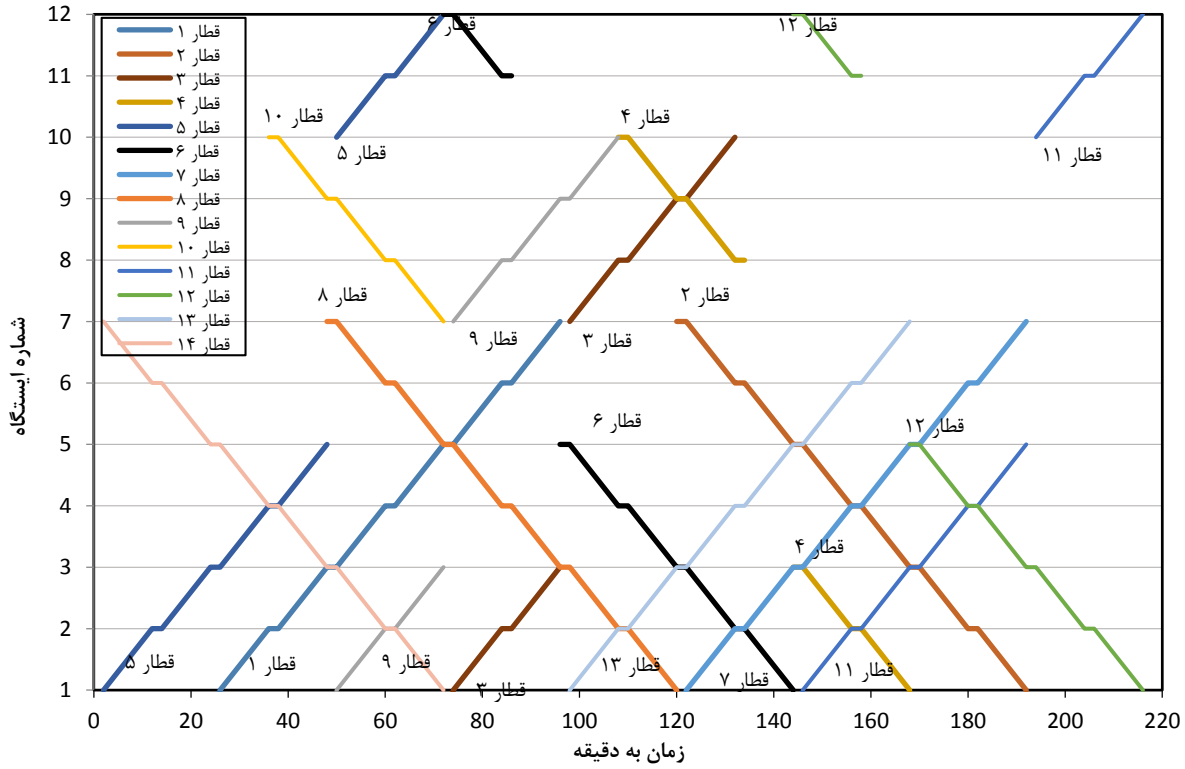
در این بخش، اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در شرایطی که چندین اختلال در بلاک‌های مختلف در شبکه ریلی رخ می‌دهند انجام می‌شود. برای این منظور از یک مثال عددی استفاده شده است. زیرساخت ریلی در این مثال عددی شامل یک شبکه با ۱۲ ایستگاه است (شکل ۳). فرض شده است که مسدودی در دو بلاک در حدفاصل ایستگاه‌های ۲-۳ (مسدودی شماره ۱) و نیز ٤-۵ (مسدودی شماره ۱) رخ می‌دهد. مسدودی شماره ۱ به مدت ۱۵ دقیقه بوده و از زمان t=۲۰ دقیقه آغاز می‌شود. مسدودی شماره ۲ نیز به مدت ۱۰ دقیقه بوده و از زمان t=۲۵ آغاز می‌شود. در نتیجه زمان‌بندی مجدد از لحظه t=۲۰ دقیقه آغاز می‌شود. اطلاعات مربوط به ناوگان و زمان‌های اعزام پیشنهادی قطارها در جدول ۱ پیوست آمده‌اند. ابتدا مدل زمان‌بندی اولیه برای تولید برنامه زمان‌بندی بهینه حرکت قطارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدون دور شدن از کلیات مدل‌سازی فرض می‌شود که طول بلاک‌های شبکه یکسان بوده و زمان سیر قطارها در تمام بلاک‌ها برابر با ۱۰ دقیقه است. همچنین کمینه و حداکثر زمان توقف قطارها در هر ایستگاه به ترتیب برابر با ۲ و ۱۰ دقیقه است. کمینه سرفاصله زمانی بین اعزام یا ورود هم‌زمان قطارها در هر ایستگاه نیز برابر با ۲ دقیقه است. هر ایستگاه نیز دارای دو خط جهت قبول و اعزام قطارها است.

با حل مدل زمان‌بندی اولیه، مجموع زمان‌های سفر قطارها برابر با ۹۸۸ دقیقه بدست آمده است. گراف اولیه زمان‌بندی حرکت قطارها در شکل ٤ نمایش داده شده است. گراف زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گراف رفع تلاقی شده حرکت قطارها با در نظر گرفتن زمان‌های مسدودی خطوط ریلی بدست آمده است. نتایج حاصله نشان دهنده قابلیت مدل پیشنهادی برای در نظر گرفتن چندین اختلال بطور هم‌زمان در شبکه است. در برنامه زمان‌بندی جدید، مجموع زمان‌های سفر قطارها و مجموع تاخیرات زمانی قطارها با جریمه انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه به ترتیب برابر با ۱۰٦۳ و ۵۳۱ دقیقه بدست آمده‌اند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مسدودی خطوط باعث افزایش مجموع زمان‌های سفر قطارها به میزان ٪۷.۵ نسبت به برنامه زمان‌بندی اولیه شده است.

با حل مدل زمان‌بندی اولیه، مجموع زمان‌های سفر قطارها برابر با ۹۸۸ دقیقه بدست آمده است. گراف اولیه زمان‌بندی حرکت قطارها در شکل ٤ نمایش داده شده است. گراف زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گراف رفع تلاقی شده حرکت قطارها با در نظر گرفتن زمان‌های مسدودی خطوط ریلی بدست آمده است. نتایج حاصله نشان دهنده قابلیت مدل پیشنهادی برای در نظر گرفتن چندین اختلال بطور هم‌زمان در شبکه است. در برنامه زمان‌بندی جدید، مجموع زمان‌های سفر قطارها و مجموع تاخیرات زمانی قطارها با جریمه انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه به ترتیب برابر با ۱۰٦۳ و ۵۳۱ دقیقه بدست آمده‌اند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مسدودی خطوط باعث افزایش مجموع زمان‌های سفر قطارها به میزان ٪۷.۵ نسبت به برنامه زمان‌بندی اولیه شده است.



شکل ۳. شبکه ریلی در مثال عددی



شکل ٤. گراف بهینه حرکت قطارها در برنامه زمان‌بندی اولیه در مثال عددی

۷. مطالعه موردی

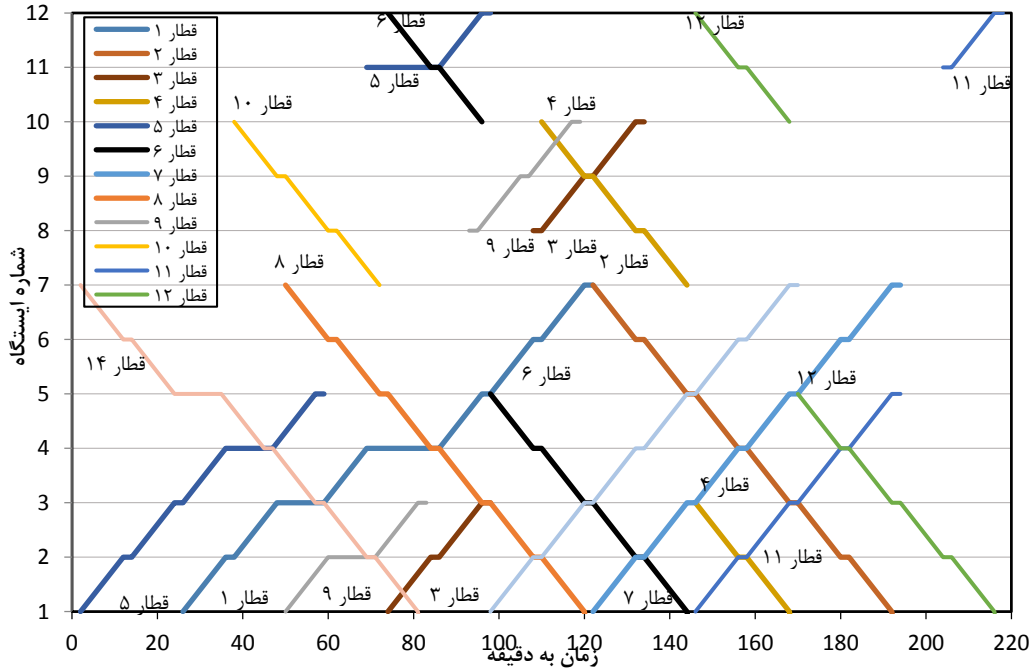
در این تحقیق، اعتبار مدل زمان‌بندی مجدد برای محور جنوب و مسیر تهران–اهواز–خرمشهر که متشکل از ٥٤ ایستگاه و ٢٦ قطار است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. موقعیت قرارگیری ایستگاه‌ها در این محور در شکل ٦ نمایش داده شده است. محل بروز اختلال (بلاک تک خطه سپیددشت–چمسنگر) نیز تقریباً در میانه مسیر تهران–خرمشهر قرار گرفته است. از اطلاعات جداول زمان‌بندی فصل بهار سال ۱۳۹۰ (مستخرج از سایت راه‌آهن ج.ا.ا. www.rai.ir) برای حل مسئله استفاده شده است. اطلاعات ناوگان ریلی و زمان‌های اعزام پیشنهادی نیز در جدول ۲ پیوست خلاصه شده است. اطلاعات اوقات شرعی ایستگاه‌های دارای نمازخانه و بازه مجاز توقف قطارها در هر ایستگاه در جدول ۳ پیوست آمده است. همچنین اطلاعات کمینه و حداکثر زمان سیر قطارها در بلاک‌ها در جدول ٤ و اطلاعات کمینه و حداکثر زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها در جدول ٥ در پیوست آورده شده است. از جمله دلایل انتخاب محور جنوب و مسیر تهران–اهواز–خرمشهر به عنوان مطالعه موردی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. بخش مهمی از شبکه ریلی کشور با توجه به اتصال مرکز کشور (پایتخت) به جنوب کشور
۲. وجود بلاک‌های تک–خطه و دوخطه در مسیر که امکان آزمایش مدل زمان‌بندی مجدد در

سناریوهای مختلف اختلال در بلاک‌های تکخطه و نیز دوخطه را فراهم می‌کند.

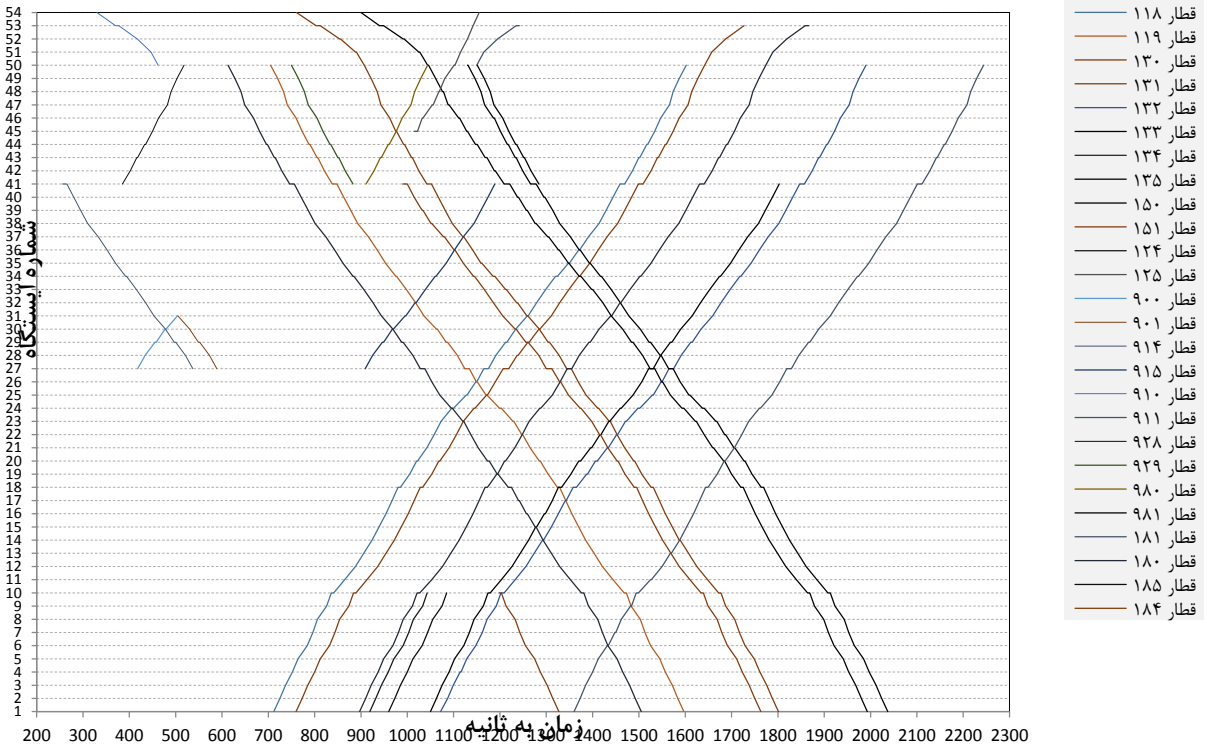
۳. شرایط ترافیکی خاص مسیر و نیز سابقه قبلی از رخداد اختلالات، حوادث و مسدودی‌های مختلف در بخش‌های مختلف مسیر که باعث تاخیرات در زمان‌بندی حرکت قطارها شده است.

گراف اولیه زمان‌بندی قطارها (بدون اختلال) در مسیر تهران–اهواز–خرمشهر در شکل ۷ نمایش داده شده است. ایستگاه ۱ و ٥٤ به ترتیب تهران و خرمشهر است. این برنامه زمان‌بندی اولیه با استفاده از مدل زمان‌بندی اولیه $[\mathrm{TTP_B}]$ بدست آمده و در آن محدودیت‌ها ظرفیت ایستگاه، تلاقی و توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی لحاظ شده است. در برنامه زمان‌بندی اولیه، مجموع زمان سفر قطارها برابر با ۲۲۰,۷۳ ساعت بدست آمده است و بطور متوسط زمان سفر هر قطار برابر با ۸,٤۹ ساعت خواهد بود. سناریوهای اختلال بر اساس اطلاعات موجود از سانحه خروج تعدادی واگن باری در محدوده راه‌آهن لرستان، حدفاصل ایستگاه‌های سپیددشت و چمسنگر (بلاک تک‌خطه) که موجب مسدودی محور جنوب شد، تدوین شده است. زمان مسدودی بلاک در شرایط واقعی و در اختلالات خاصی می‌تواند نامشخص بوده و با افزایش مدت آن، برنامه زمان‌بندی مجدد را مختل نماید. بنابراین در حالتی که پیش‌بینی زمان رفع اختلال، با دقت کمی در پیش‌بینی همراه باشد، می‌توان حساسیت جواب بهینه را نسبت به تغییر مدت رفع اختلال، ارزیابی نمود. برای این منظور در این تحقیق، ارزیابی مدل زمان‌بندی مجدد در سناریوهای مختلفی از مدت زمان رفع مسدودی بلاک (ω) انجام می شود. برای این منظور ٦ سناریوی مختلف تدوین شده است. در کلیه سناریوها زمان رخداد اختلال در لحظه $t^* =$ 900 دقیقه بوده و مکان رخداد اختلال نیز بلاک سپیددشت–چمسنگر است. مدت زمان رفع مسدودی نیز به ترتیب در سناریوهای مختلف برابر با $\omega = \{30, 60, 90, 120, 150, 240\}$ دقیقه در نظر گرفته می‌شوند. گراف حرکت قطارهای مسیر تهران–خرمشهر–اهواز در سناریوهای مختلف اختلال در شکل ۸ الی شکل ۱۱ آمده است. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، زمان‌بندی مجدد از زمان ساعت ۱۵ عصر (t=۹۰۰ دقیقه) به بعد انجام شده و زمان مسدودی بلاک نیز بصورت هاشور خورده نشان داده شده است.

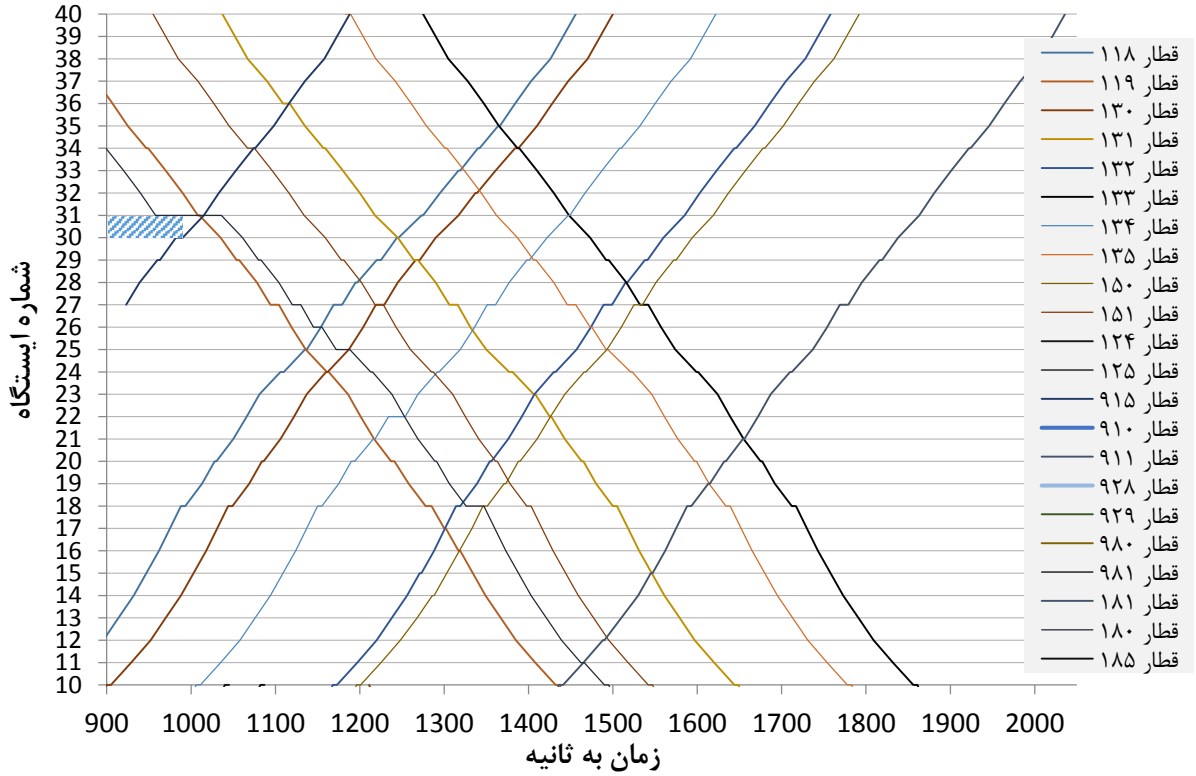


شکل ۵. گراف بهینه حرکت قطارها در برنامه زمان‌بندی مجدد در مثال عددی

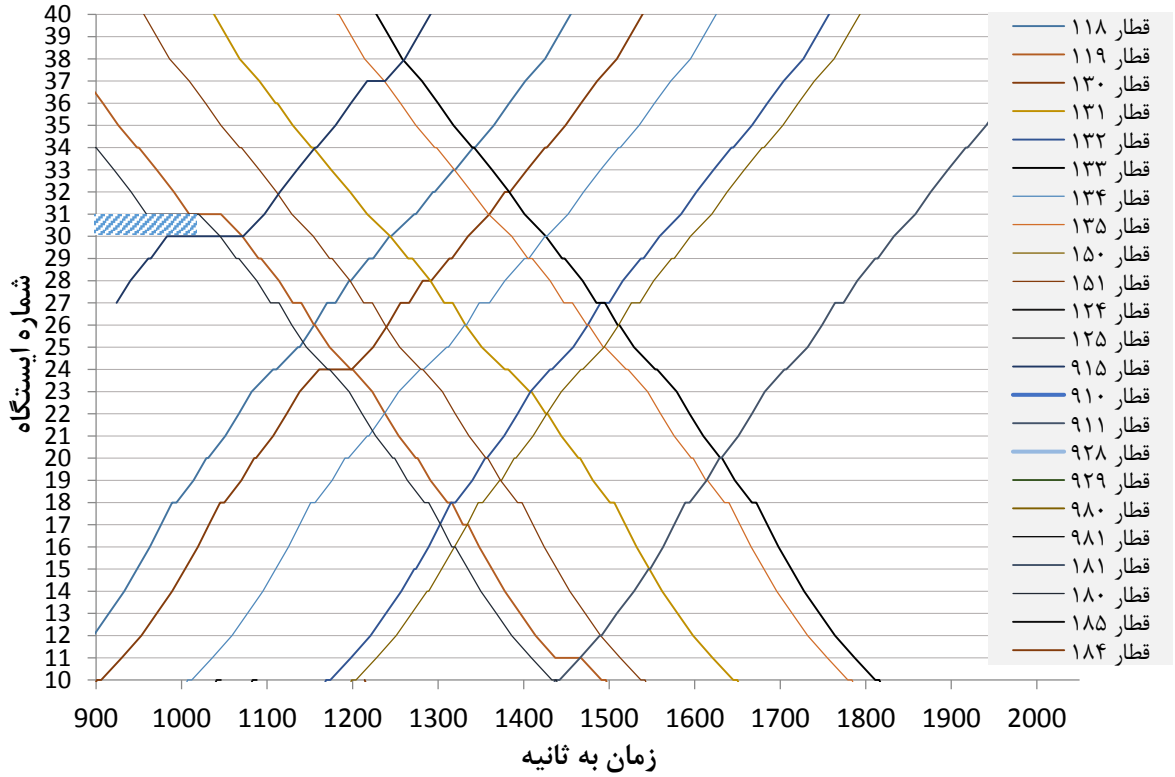
شکل ٦. بخشی از شبکه ریلی کشور (مسیر تهران–اهواز–خرمشهر)



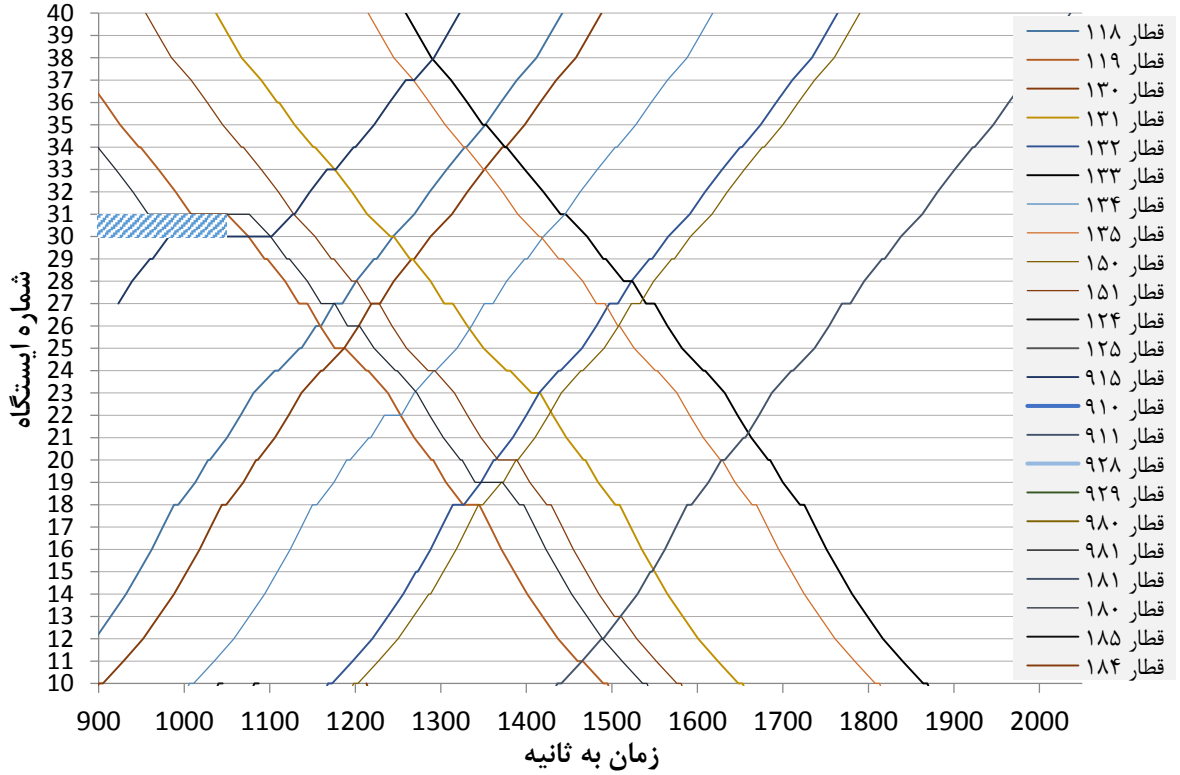
شکل ۷. گراف برنامه اولیه حرکت قطارها در مسیر تهران–اهواز–خرمشهر



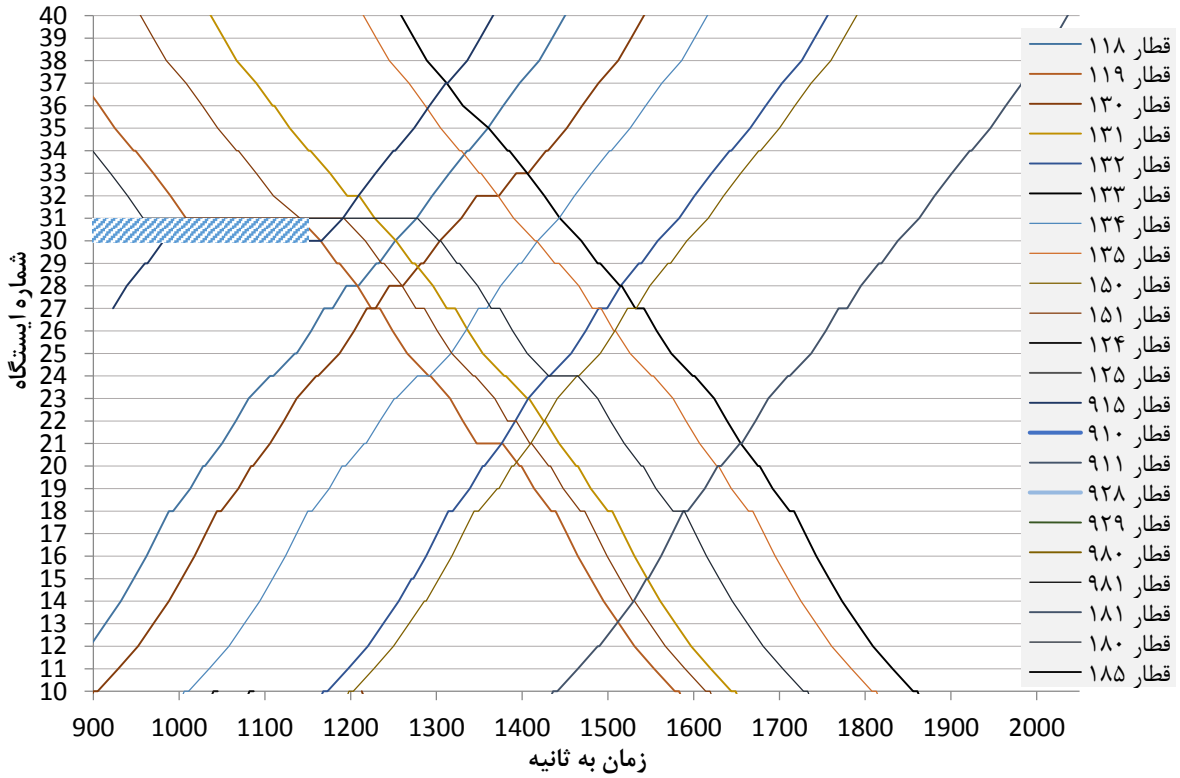
شکل ۸. گراف زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در مسیر تهران–اهواز–خرمشهر بعد از رویداد سانحه (سناریوی ۳)



شکل ۹. گراف زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در مسیر تهران–اهواز–خرمشهر بعد از رویداد سانحه (سناریوی ٤)



شکل ۱۰. گراف زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در مسیر تهران–اهواز–خرمشهر بعد از رویداد سانحه (سناریوی ۵)



شکل ۱۱. گراف زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در مسیر تهران–اهواز–خرمشهر بعد از رویداد سانحه (سناریوی ٦)

۸. نتایج حل

برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی از نرم‌افزار GAMS 24.1.2 و از الگوریتم‌های حل مسائل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح در برنامه CPLEX 12.5 استفاده شده است. این برنامه شامل مجموعه‌ای از الگوریتم‌های دقیق و ابتکاری مبتنی بر استراتژی‌های انشعاب و تحدید و همچنین انشعاب و برش برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عددصحیح است. برای حل مسائل نمونه نیز، از رایانه‌ای با سیستم‌عامل ویندوز ۸ حافظه ٤ گیگابایت و پردازشگر۳٫۳ گیگاهرتز استفاده شده است. نتایج حل مدل زمان‌بندی اولیه و زمان‌بندی مجدد در سناریوهای مختلف در جدول ٤ خلاصه شده است. در سطر اول جدول، مدل زمان‌بندی اولیه توسط نرم‌افزار حل شده و جواب بهینه در مدت زمان حدود ۵۲ دقیقه حاصل شده است. در جدول ۵ نیز نتایج حل مدل زمان‌بندی مجدد با روش ابتکاری ترکیبی آمده است.

در شکل ۱۲ مقایسه زمان حل مسئله در رویکرد بهینه و روش ابتکاری به ازای سناریوهای مختلف مدت زمان رفع اختلال آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان حل مسئله با رویکرد حل دقیق با افزایش مدت زمان رفع اختلال، افزایش یافته و عملاً استفاده از این رویکرد بهینه در زمان معقول فراهم نیست. از طرفی، روش ابتکاری قادر به یافتن جواب مناسب در زمان معقول است. نتایج حل مسائل زمان‌بندی مجدد در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که مدت رفع اختلال بر عملکرد و کیفیت زمان‌بندی حاصل از مدل زمان‌بندی مجدد بسیار تأثیرگذار است. متوسط زمان حل مدل زمان‌بندی مجدد در سه سناریوی اول برابر با ۲۸ دقیقه است و در این مدت یک برنامه بهینه جدید برای حرکت قطارها و نیز برنامه توقف قطارها در اوقات شرعی بدست آمده است. مدل برنامه‌ریزی مجدد برای سناریوهای اختلال با مدت زمان بیش از ۱٫۵ ساعت در مدت طولانی به جواب رسیده است و از این‌رو بهبود الگوریتم و کاهش زمان حل مسئله با استفاده از روش‌های ابتکاری مدنظر قرار گرفته است. با افزایش مدت رفع اختلال، زمان لازم برای اجرای مدل زمان‌بندی مجدد و یافتن جواب بهینه، به تناسب افزایش یافته است.

جدول ٤. نتایج حل بهینه مدل زمان‌بندی اولیه و مدل برنامه‌ریزی مجدد در سناریوهای مختلف

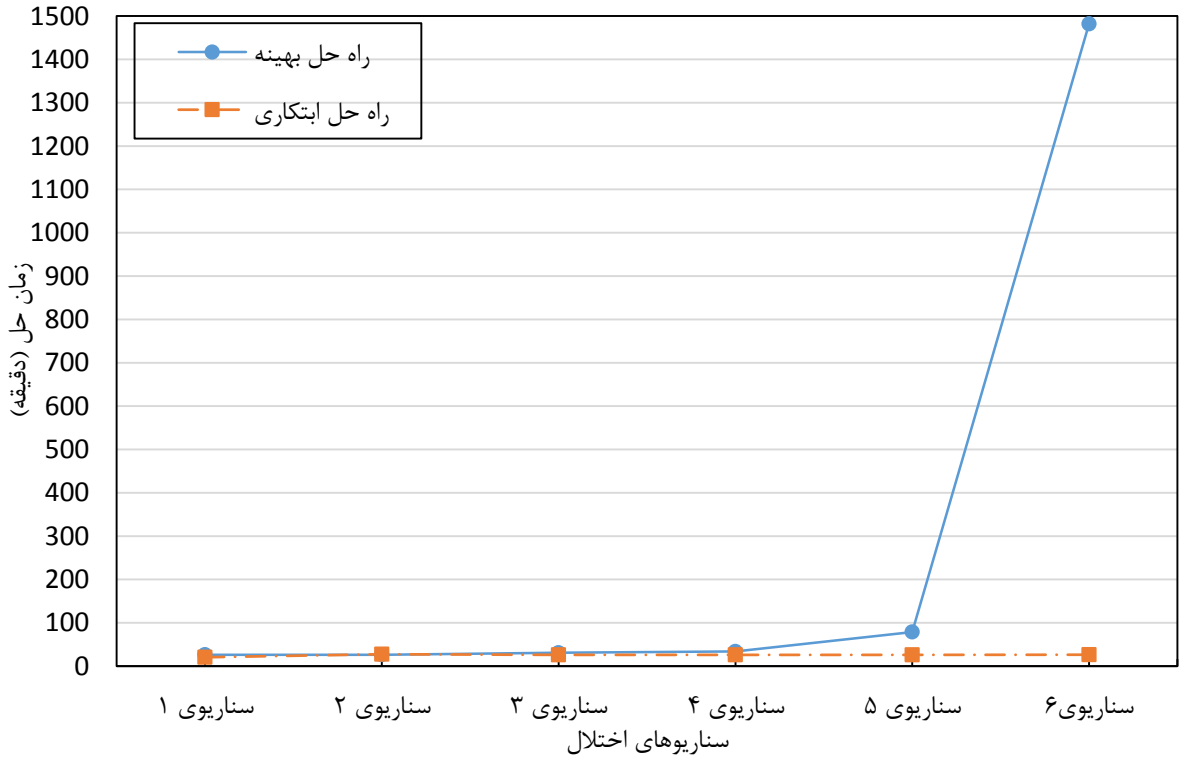
سناریو	مدت مسدودی خط (ساعت)	مجموع زمان سفر قطارها (ساعت)	متوسط زمان سفر هر قطار (ساعت)	درصد افزایش مجموع زمان سفر قطارها (نسبت به سناریوی عادی)	مقدار تابع هدف دوم (مجموع وزنی تاخیرات و انحرافات از برنامه اولیه)	زمان حل مسئله (دقیقه)
بدون اختلال	–	۲۲۰٫۷۳	۸٫٤۹	–	–	۵۱٫۲٦
سناریوی ۱	۰٫۵	۲۳۱٫۷۰	۱۰٫۰۷٤	٪۱۸٫٦٦	۰	۲٦٫۲٦
سناریوی ۲	۱	۲۳۲٫۰۳	۱۰٫۰۸۸	٪۱۸٫۸۳	۱۲۰٤	۲٦٫۲۸
سناریوی ۳	۱٫۵	۲۷۰٫٦۳	۱۱٫۷٦۷	٪۳۸٫۵۹	۸۹٦۱	۳۰٫۹۸
سناریوی ٤	۲	۲۷۲٫٦۳	۱۱٫۸۵۳	٪۳۹٫٦۲	۱۳۳۳۹	۳۳٫۸۲
سناریوی ۵	۲٫۵	۲۷٤٫٤۰	۱۱٫۹۳۰	٪٤۰٫۵۲	۱۸۳۱۰	۷۸٫۷۰
سناریوی٦	٤	۲۸۰٫۹	۱۲٫۲۱	٪٤۳٫۸۵	٤۱۳۰۲	۱٤۸۱٫۹۸

جدول ۵. نتایج حل مدل زمان‌بندی مجدد با روش ابتکاری ترکیبی

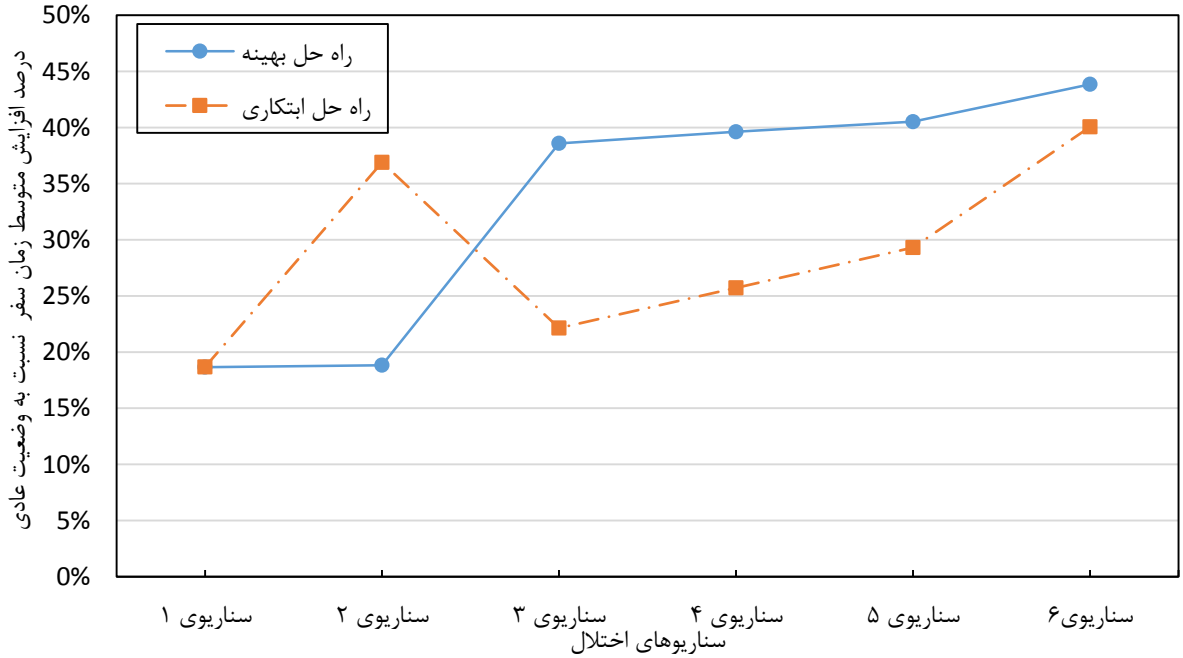
سناریو	مدت مسدودی خط (ساعت)	مجموع زمان سفر قطارها (ساعت)	متوسط زمان سفر هر قطار (ساعت)	درصد افزایش مجموع زمان سفر قطارها (نسبت به سناریوی عادی)	مقدار تابع هدف دوم (مجموع وزنی تاخیرات و انحرافات از برنامه اولیه)	زمان حل مسئله (دقیقه)
سناریوی ۱	۰,۵	۲۳۱,۷۳	۱۰,۰۸	٪۱۸,٦۷	۰	۲۰,۳۱
سناریوی ۲	۱	۲٦۷,۳۳	۱۱,٦۲۳	٪۳٦,۹۰	۲۸	۲۷,٦۳
سناریوی ۳	۱,۵	۲۳۸,۵۰	۱۰,۳۷۰	٪۲۲,۱٤	۲۵٦۲۲	۲٦,۰٤
سناریوی ٤	۲	۲٤۵,۵۰	۱۰,٦۷٤	٪۲۵,۷۲	۵۰۷۷۵	۲٦,۱۰
سناریوی ۵	۲,۵	۲۵۲,۵۰	۱۰,۹۷۸	٪۲۹,۳۱	۷۵۹٤۵	۲٦,۱۸
سناریوی٦	٤	۲۷۳,۵۰	۱۱,۸۹۱	٪٤۰,۰٦	۱۵۱٤۵۵	۲٦,٤۱

شکل ۱۳ مقایسه درصد افزایش زمان سفر قطارها (نسبت به سناریوی بدون اختلال) در رویکرد حل بهینه و روش ابتکاری به ازای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش زمان مسدودی، درصد افزایش زمان سفر قطارها در سناریوهای مختلف اختلال با شیب ملایمی افزایش یافته و جواب حاصل از روش ابتکاری در بدترین سناریوی اختلال (مسدودی به مدت ٤ ساعت) حداکثر تا ٤۰٪ از جواب اولیه فاصله گرفته است. در این حالت زمان سفر هر قطار بطور متوسط برابر با ۱,۵۳٪ نسبت به بهترین حالت (سناریوی بدود اختلال) افزایش یافته است که نشان دهنده کارآیی نسبی مدل برنامه‌ریزی مجدد است. به عبارتی، این درصد افزایش ناچیز، نشان دهنده کارآیی مدل یکپارچه مدیریت اختلال در کاهش زمان سفر قطارها بعد از رخداد اختلال است. افزایش میزان انحراف از برنامه اولیه در سناریوهای مختلف اختلال برای رویکردهای حل بهینه و روش ابتکاری نیز در شکل ۱٤ نمایش داده شده است. به دلیل محدودیت زمانی، رویکرد بهینه در عمل قابل بکارگیری نیست و مزیت استفاده از رویکرد ابتکاری پیشنهادی، یافتن یک جواب خوب از طریق حفظ ساختار برنامه زمان‌بندی اولیه تا حد امکان و کاهش متوسط زمان سفر قطارها است.

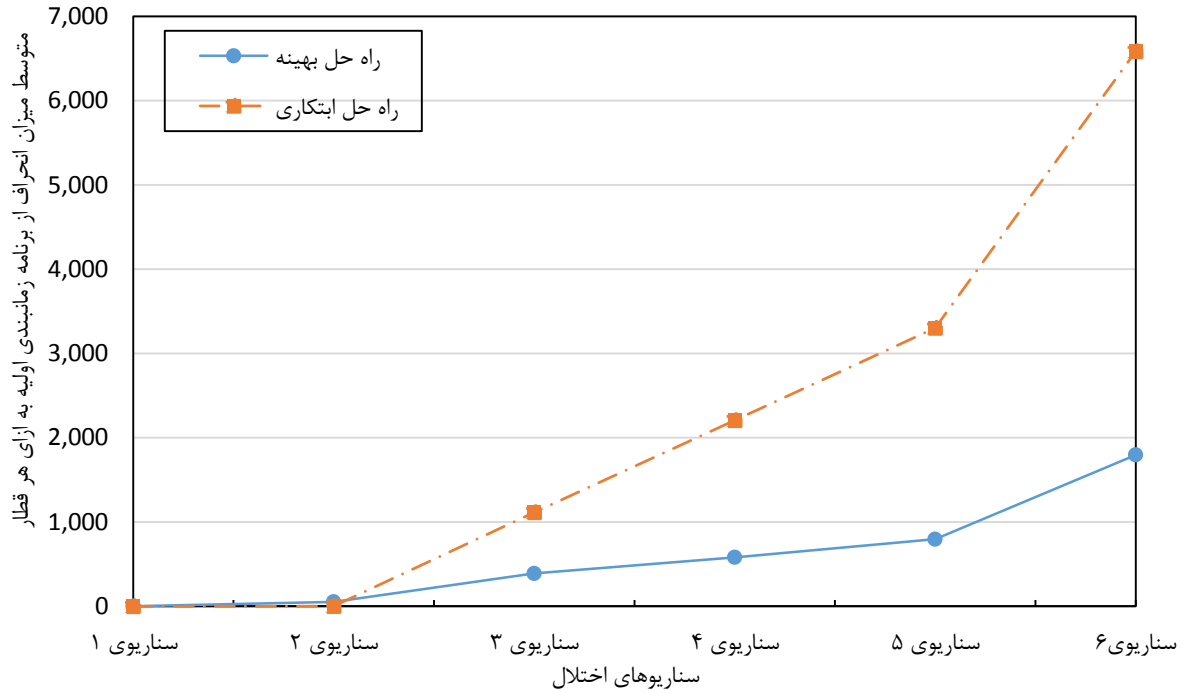
به عنوان جمع‌بندی این بخش، به بیان دستاوردها و جنبه‌های مدیریتی لحاظ شده در این پژوهش جهت حل مسئله مدیریت اختلال در شبکه‌های ریلی می‌پردازیم. بطورکلی مسئله برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطارها یک مسئله بهینه‌سازی در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و در سطح برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و عملیاتی است که در آن محدودیت زمان، نقش بسیار کلیدی ایفا می‌کند. تصمیم‌گیری در خصوص برنامه‌ریزی مجدد تعداد زیادی از قطارها می‌بایست با نظارت و کنترل بهره‌برداری در زمان واقعی انجام شود و همواره یکی از اهداف اولیه باید کاهش میزان انحراف از برنامه اولیه باشد. در شبکه ریلی کشور که با مشکلات ظرفیتی و محدودیت‌های گلوگاهی مواجه است، اثرات رخداد اختلالات و تاخیرات کوچک می‌توانند به‌سرعت در کل شبکه گسترش‌یافته و برنامه حرکت سایر قطارها را نیز تحت تأثیر قرار دهند. لحاظ نمودن کلیه عوامل اختلال در طی فرآیند برنامه‌ریزی اولیه حرکت قطارها عملاً امکان‌پذیر نیست و در نتیجه لازم است مدل هوشمندی برای ایجاد برنامه‌های زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها طراحی شود. به کمک مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر، مدیریت سیستم و به خصوص مأمورین اعزام می‌توانند در زمان کوتاه، واکنش مناسبی در مواجه با سوانح ریلی و کمینه کردن تأثیرات آن‌ها در سیستم اتخاذ نمایند. در مدل پیشنهادی، راهکارهای مختلفی برای کاهش تاخیرات قطارها بصورت یکپارچه در نظر گرفته شد و این رویکرد باعث افزایش کارآیی حل مسئله مدیریت اختلال شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی روی نمونه مسائل واقعی از راه‌آهن ایران، کارآیی این روش را در مقایسه با روش‌های حل دقیق نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. مقایسه زمان رویکرد حل بهینه و روش ابتکاری در سناریوهای مختلف



شکل ۱۳. مقایسه درصد افزایش زمان سفر قطارها در رویکرد حل بهینه و روش ابتکاری به ازای سناریوهای مختلف



شکل ۱۴. میزان انحراف از برنامه اولیه در سناریوهای مختلف اختلال

۹. نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح برای مسئله زمان‌بندی مجدد قطارها در شرایط اختلال از نوع مسدودی بلاک ارائه شد. زمان رخداد مسدودی و مدت آن به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شده است. مدل ارائه شده در این تحقیق قادر به ارائه برنامه حرکت جدید قطارها از ایستگاه‌ها و نیز توقفات برای اقامه فریضه نماز است به‌طوری که اهداف مدیریت اختلال در شبکه ریلی برآورده شود. برای ارزیابی مدل پیشنهادی، مسیر تهران–اهواز–خرمشهر به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید. به منظور حل مدل پیشنهادی از داده‌های موجود و شرایط یک اختلال واقعی در شبکه استفاده شد. در حل مسئله، مسدودی یک بلاک به عنوان عامل اختلال در نظر گرفته شد و زمان‌بندی مجدد بعد از رویداد اختلال با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی به کمک مدل مذکور ارائه شد. نتایج حل مسئله نشان داد که استفاده از مدل پیشنهادی مزایایی نظیر بهبود در سرعت و دقت تصمیم‌گیری و ارائه زمان‌بندی مجدد و نیز کاهش تاخیرات حرکت قطارها و زمان انتظار مسافرین را به همراه دارد. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدل‌های زمان‌بندی مجدد، زمان حل مسئله است و با توجه به محدودیت‌های زمانی در تصمیم‌گیری، در این تحقیق از روش‌های ابتکاری برای تولید برنامه زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در زمان معقول استفاده شد. در این تحقیق یک روش ابتکاری برای کاهش زمان حل مسئله ارائه شد و نتایج آن با رویکرد حل بهینه در نرم‌افزارهای بهینه‌سازی مقایسه شد. نتایج حل مسئله با روش ابتکاری نشان دهنده کارآیی آن برای حل مسئله مدیریت اختلال است.

از مقایسه زمان حل مسئله در رویکرد بهینه و روش ابتکاری پیشنهادی به ازای سناریوهای مختلف مدت زمان رفع اختلال می‌توان نتیجه گرفت که زمان حل مسئله با رویکرد حل دقیق با افزایش مدت زمان رفع اختلال، بصورت نمایی افزایش یافته و عملاً استفاده از رویکرد حل دقیق برای مسئله زمان‌بندی مجدد قطارها در زمان معقول ممکن نیست. روش ابتکاری پیشنهادی با حفظ بخشی از ساختارهای مناسب جواب در برنامه زمان‌بندی اولیه، قادر به یافتن برنامه زمان‌بندی مجدد در زمان معقول بوده است. نتایج حل مسائل زمان‌بندی مجدد در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش مدت رفع اختلال، تعداد تلاقی‌های بالقوه بین قطارها افزایش یافته و این موضوع بر عملکرد و کیفیت روش حل مسئله بسیار تأثیرگذار است. نتایج نشان داده است که استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی موجود برای حل

مدل برنامه‌ریزی مجدد برای سناریوهایی که در آن‌ها مسدودی خط بیش از ۱٫۵ ساعت به طول می‌انجامد، یک راهکار عملی برای حل مسئله مدیریت اختلال نیست و از طرفی الگوریتم پیشنهادی در تحقیق حاضر توانسته است با حفظ کیفیت جواب نهایی، زمان حل مسئله را بصورت میانگین به اندازه ۳۶٫۸٪ کاهش دهد.

به عنوان تحقیقات آتی، مدل پیشنهاد شده می‌تواند در زمینه‌هایی نظیر بروز سوانح برای قطارها، زمان‌بندی دوره‌ای حرکت قطارها و لحاظ نمودن شرایط لغو اعزام برخی از قطارها یا تغییر مسیر حرکت قطارها در شبکه به منظور مدیریت هرچه بهتر اختلالات، توسعه یابد. مدل زمان‌بندی مجدد تحقیق حاضر قابلیت توسعه برای برنامه‌ریزی مجدد قطارهای راه‌آهن باری و نیز در خطوط ترکیبی باری و مسافری را دارا است. برای این منظور باید امکان لغو اعزام کامل یا جزئی حرکت قطارهای باری نیز در مدل ریاضی لحاظ شود. همچنین رخداد اختلال در مسیر تهران–خرمشهر به دلیل تک‌خطه بودن مسیر و کمبود ایستگاه‌های نمازخانه‌دار و پراکندگی آن‌ها، تولید زمان‌بندی جدید و شدنی در شرایط اختلالات بزرگ را با مشکل مواجه ساخته است. در این حالت ممکن است ناچار به لغو اعزام برخی از قطارها باشیم. تصمیم‌گیری در خصوص لغو اعزام قطارها در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته است و در تحقیقات آتی می‌تواند مدنظر باشد.

۱۰. پیوست‌ها

لم : یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی به شرح زیر را در نظر بگیرید:

$$\text{Minimize } Z = |f(X) - g|$$

subject to:

$$X \in F$$

می‌توان نشان داد که تابع هدف بصورت زیر قابل خطی سازی است:

$$\text{Minimize } Z' = f(X) - g + 2\delta$$

subject to:

$$g - f(X) + \delta \leq 0$$

$$\delta \geq 0, X \in F$$

اثبات : برای اثبات لم فوق دو حالت در نظر گرفته می‌شود.

حالت ۱ : $f(X) - g \geq 0$

در این حالت و در شرایط بهینگی، مقدار $\delta = 0$ خواهد شد که در نتیجه $Z' = Z$

حالت ۲ : $f(X) - g < 0$

در این حالت و در شرایط بهینگی، مقدار $\delta = g - f(X)$ خواهد شد که در نتیجه $Z' = f(X) - g + 2\delta = g - f(X) = Z$

جدول ۱. اطلاعات ناوگان ریلی و زمان‌های اعزام پیشنهادی در مثال عددی

کد قطار	کد ایستگاه مبدأ	کد ایستگاه مقصد	زودترین زمان اعزام از مبدأ (دقیقه)	دیرترین زمان اعزام از مقصد (دقیقه)
۱	۱	۷	۰	۱۲۰
۲	۷	۱	٦۰	۱۲۰
۳	۱	۱۰	۰	۱۲۰
٤	۱۰	۱	٦۰	۱۲۰
٥	۱	۱۲	۰	۱۲۰
٦	۱۲	۱	٦۰	۱۲۰
۷	۱	۷	٦۰	۱۲۰
۸	۷	۱	۰	۱۲۰
۹	۱	۱۰	۰	۱۲۰
۱۰	۱۰	۳	۰	۱۲۰

کد قطار	کد ایستگاه مبدأ	کد ایستگاه مقصد	زودترین زمان اعزام از مبدأ (دقیقه)	دیرترین زمان اعزام از مقصد (دقیقه)
۱۱	۱	۱۲	٦۰	۱۲۰
۱۲	۱۲	۱	۰	۱۲۰
۱۳	۱	۷	٦۰	۱۲۰
۱٤	۷	۱	۰	۱۲۰

جدول ۲. اطلاعات ناوگان ریلی و زمان‌های اعزام پیشنهادی

ردی ف	شماره قطار	مبدأ	مقصد	زمان اعزام پیشنهادی (دقیقه)	زودترین زمان اعزام (دقیقه)	دیرترین زمان اعزام (دقیقه)
۱	۱۱۸	تهران	اهواز	٦۸۵	٦۵۵	۷۱۵
۲	۱۱۹	اهواز	تهران	٦۷۵	٦٤۵	۷۰۵
۳	۱۳۰	تهران	خرمشهر	۷۵۰	۷۲۰	۷۸۰
٤	۱۳۱	خرمشهر	تهران	۷۳۰	۷۰۰	۷٦۰
۵	۱۳۲	تهران	اهواز	۱۰٤۰	۱۰۱۰	۱۰۷۰
٦	۱۳۳	اهواز	تهران	۱۱۰۰	۱۰۷۰	۱۱۳۰
۷	۱۳٤	تهران	خرمشهر	۹۰۰	۸۷۰	۹۳۰
۸	۱۳۵	خرمشهر	تهران	۸۷۰	۸٤۰	۹۰۰
۹	۱۵۰	تهران	اندیمشک	۱۰۸۰	۱۰۵۰	۱۱۱۰
۱۰	۱۵۱	اندیمشک	تهران	۹٦۰	۹۳۰	۹۹۰
۱۱	۱۲٤	تهران	قم	۹۲۵	۸۹۵	۹۵۵
۱۲	۱۲۵	قم	تهران	۹۸۵	۹۵۵	۱۰۱۵
۱۳	۹۰۰	دورود	چمسنگر	۳۹۰	۳٦۰	٤۲۰
۱٤	۹۰۱	چمسنگر	دورود	٤۸۰	٤۵۰	۵۱۰
۱۵	۹۱٤	اندیمشک	دورود	۲۸۵	۲۵۵	۳۱۵
۱٦	۹۱۵	دورود	اندیمشک	۸۹۰	۸٦۰	۹۲۰
۱۷	۹۱۰	خرمشهر	اهواز	۳٦۰	۳۳۰	۳۹۰
۱۸	۹۱۱	اهواز	خرمشهر	۱۱۲۰	۱۰۹۰	۱۱۵۰
۱۹	۹۲۸	اندیمشک	اهواز	۳٤۵	۳۱۵	۳۷۵
۲۰	۹۲۹	اهواز	اندیمشک	۷۲۰	٦۹۰	۷۵۰

ردی ف	شماره قطار	مبدأ	مقصد	زمان اعزام پیشنهادی (دقیقه)	زودترین زمان اعزام (دقیقه)	دیرترین زمان اعزام (دقیقه)
۲۱	۹۸۰	اندیمشک	اهواز	۹۱۵	۸۸۵	۹٤٥
۲۲	۹۸۱	اهواز	اندیمشک	۱۱٤۰	۱۱۱۰	۱۱۷۰
۲۳	۱۸۱	تهران	اهواز	۱۳۳۰	۱۳۰۰	۱۳٦۰
۲٤	۱۸۰	اهواز	تهران	٦۲۰	٥۹۰	٦٥۰
۲٥	۱۸٥	تهران	قم	۹۳۰	۹۰۰	۹٦۰
۲٦	۱۸٤	قم	تهران	۱۲۱٥	۱۱۸٥	۱۲٤٥

جدول ۳. اطلاعات افق شرعی ایستگاه‌های دارای نمازخانه

نام ایستگاه	کد ایستگاه	نماز صبح		نماز ظهر و عصر		نماز مغرب-عشاء	
		ابتدای بازه مجاز	انتهای بازه مجاز	ابتدای بازه مجاز	انتهای بازه مجاز	ابتدای بازه مجاز	انتهای بازه مجاز
تهران	۱	٥:۱۸:۰۰	٦:۱۸:۰۰	۱۱:٥۰:۰۰	۱۳:٥۰:۰۰	۱۷:۱٤:۰۰	۱۹:۱٤:۰۰
اسلامشهر	۳	٥:۱۸:۰۰	٦:۱۸:۰۰	۱۱:٥۰:۰۰	۱۳:٥۰:۰۰	۱۷:۱٤:۰۰	۱۹:۱٤:۰۰
فرودگاه	٤	٥:۱۸:۰۰	٦:۱۸:۰۰	۱۱:٥۰:۰۰	۱۳:٥۰:۰۰	۱۷:۱٤:۰۰	۱۹:۱٤:۰۰
قم	۱۰	٥:۱۹:۰۰	٦:۱۹:۰۰	۱۱:٥۲:۰۰	۱۳:٥۲:۰۰	۱۷:۱۸:۰۰	۱۹:۱۸:۰۰
باغیک	۱۲	٥:۱۹:۰۰	٦:۱۹:۰۰	۱۱:٥۲:۰۰	۱۳:٥۲:۰۰	۱۷:۱۸:۰۰	۱۹:۱۸:۰۰
اراک	۱۸	٥:۲۳:۰۰	٦:۲۳:۰۰	۱۱:٥۷:۰۰	۱۳:٥۷:۰۰	۱۷:۲۳:۰۰	۱۹:۲۳:۰۰
سمیه	۲۲	٥:۲۳:۰۰	٦:۲۳:۰۰	۱۱:٥۷:۰۰	۱۳:٥۷:۰۰	۱۷:۲۳:۰۰	۱۹:۲۳:۰۰
ازنا	۲٤	٥:۲۳:۰۰	٦:۲۳:۰۰	۱۱:٥۷:۰۰	۱۳:٥۷:۰۰	۱۷:۲٥:۰۰	۱۹:۲٥:۰۰
دورود	۲۷	٥:۲٥:۰۰	٦:۲٥:۰۰	۱۱:٥۹:۰۰	۱۳:٥۹:۰۰	۱۷:۲۷:۰۰	۱۹:۲۷:۰۰
چمسنگر	۳۱	٥:۲٥:۰۰	٦:۲٥:۰۰	۱۱:٥۹:۰۰	۱۳:٥۹:۰۰	۱۷:۲۷:۰۰	۱۹:۲۷:۰۰
مازو	۳۷	٥:۲٥:۰۰	٦:۲٥:۰۰	۱۱:٥۹:۰۰	۱۳:٥۹:۰۰	۱۷:۲۷:۰۰	۱۹:۲۷:۰۰
گل محک	۳۹	٥:۲٥:۰۰	٦:۲٥:۰۰	۱۱:٥۹:۰۰	۱۳:٥۹:۰۰	۱۷:۲۷:۰۰	۱۹:۲۷:۰۰
اندیمشک	٤۱	٥:۲۷:۰۰	٦:۲۷:۰۰	۱۲:۰۲:۰۰	۱٤:۰۲:۰۰	۱۷:۳۲:۰۰	۱۹:۳۲:۰۰
بامدژ	٤۷	٥:۲۷:۰۰	٦:۲۷:۰۰	۱۲:۰۲:۰۰	۱٤:۰۲:۰۰	۱۷:۳۲:۰۰	۱۹:۳۲:۰۰
اهواز	٥۰	٥:۲٤:۰۰	٦:۲٤:۰۰	۱۲:۰۱:۰۰	۱٤:۰۱:۰۰	۱۷:۳۲:۰۰	۱۹:۳۲:۰۰
حمید	٥۲	٥:۲٤:۰۰	٦:۲٤:۰۰	۱۲:۰۱:۰۰	۱٤:۰۱:۰۰	۱۷:۳۲:۰۰	۱۹:۳۲:۰۰
خرمشهر	٥٤	٥:۲٥:۰۰	٦:۲٥:۰۰	۱۲:۰۳:۰۰	۱٤:۰۳:۰۰	۱۷:۳٦:۰۰	۱۹:۳٦:۰۰

جدول ٤. اطلاعات کمینه و حداکثر زمان سیر قطارها در بلاک‌ها

بلاک	کمینه زمان سیر (دقیقه)	حداکثر زمان سیر (دقیقه)	بلاک	کمینه زمان سیر (دقیقه)	حداکثر زمان سیر (دقیقه)
تهران-تپه سفید	۱۳	۱۵	قارون-بیشه	۲۱	۲۳
تپه سفید-اسلامشهر	۱۲	۱٤	بیشه-سپید دشت	۱۹	۲۱
اسلامشهر-فرودگاه	۱۵	۱۷	سپید دشت - چمسنگر	۲۵	۲۷
فرودگاه-علی آباد	۱۲	۱٤	چمسنگر - کشور	۱۸	۲۰
علی آباد-نمکزار	۲۰	۲۲	کشور-تنگ هفت	۲۰	۲۲
نمکزار-سپررستم	۱۲	۱٤	تنگ هفت - تنگ پنج	۲۱	۲۳
سپررستم-قمرود	۱۰	۱۲	تنگ پنج-تله زنگ	۲۲	۲٤
قمرود-گار	۲۰	۲۲	تله زنگ- شهبازان	۱۸	۲۰
گار-قم	۱۰	۱۲	شهبازان-مازو	۱۹	۲۱
قم-ساقه	۲٤	۲٦	مازو-بالارود	۲۳	۲۵
ساقه-باغیک	۲۳	۲۵	بالارود-گل محک	۱۵	۱۷
باغیک-سواریان	۱۸	۲۰	گل محک- دوکوهه	۱۵	۱۷
سواریان-راهگرد	۱۸	۲۰	دوکوهه- اندیمشک	۱۵	۱۷
راهگرد-نانگرد	۱۵	۱۷	اندیمشک- سبزآب	۱۷	۱۹
نانگرد-مشک آباد	۱۵	۱۷	سبزآب-شوش	۱٤	۱٦
مشک آباد-ملک آباد	۱۳	۱۵	شوش-هفت تپه	۱۵	۱۷
ملک آباد-اراک	۱۳	۱۵	هفت تپه-میان آب	۱۵	۱۷
اراک-سمنگان	۲۰	۲۲	میان آب-آهو دشت	۱۳	۱۵
سمنگان-شازند	۱۵	۱۷	آهو دشت-بامدژ	۱۹	۲۱
شازند-نورآباد	۲۰	۲۲	بامدژ-خاور	۸	۱۰
نورآباد-سمیه	۱٦	۱۸	خاور-نظامیه	۱۳	۱۵

بلاک	کمینه زمان سیر (دقیقه)	حداکثر زمان سیر (دقیقه)	بلاک	کمینه زمان سیر (دقیقه)	حداکثر زمان سیر (دقیقه)
سمیه–مومن آباد	۱۵	۱۷	نظامیه–اهواز	۱۵	۱۷
مومن آباد –ازنا	۲۳	۲۵	اهواز–قدس	۱۵	۱۷
ازنا–دربند	۲۵	۲۷	قدس–حمید	۳۰	۳۲
دربند–رودک	۱۷	۱۹	حمید –حسینیه	٤٠	٤٢
رودک–دورود	۱۵	۱۷	حسینیه–خرمشهر	٤٠	٤٢
دورود –قارون	١٦	١٨			

جدول ۵. اطلاعات کمینه و حداکثر زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها

ایستگاه	نمازخانه	کمینه زمان توقف (دقیقه)	حداکثر زمان توقف (دقیقه)	ایستگاه	نمازخانه	کمینه زمان توقف (دقیقه)	حداکثر زمان توقف (دقیقه)
تهران	۱	۲	۲۰	قارون	۰	۲	۵
تپه سفید	۰	۲	۵	بیشه	۰	۳	۵
اسلامشهر	۱	۲	۲۰	سپیددشت	۰	۲	۵
فرودگاه	۱	۲	۲۰	چمسنگر	۱	۲	۲۰
علی‌آباد	۰	۲	۵	کشور	۰	۲	۵
نمکزار	۰	۲	۵	تنگ هفت	۰	۲	۵
سپررستم	۰	۲	۵	تنگ پنج	۰	۲	۵
قمرود	۰	۲	۵	تله زنگ	۰	۲	۵
گار	۰	۲	۵	شهبازان	۰	۲	۵
قم	۱	۵	۲۰	مازو	۱	۲	۲۰
ساقه	۰	۲	۵	بالارود	۰	۲	۵
باغیک	۱	۲	۲۰	گل محک	۱	۲	۲۰
سواریان	۰	۲	۵	دوکوهه	۰	۲	۵
راهگرد	۰	۲	۵	اندیمشک	۱	۱۰	۲۰
نانگرد	۰	۲	۵	سبزآب	۰	۲	۵
مشک آباد	۰	۲	۵	شوش	۰	۲	۵
ملک آباد	۰	۲	۵	هفت تپه	۰	۲	۵
اراک	۱	۵	۲۰	میان آب	۰	۲	۵
سمنگان	۰	۲	۵	آهو دشت	۰	۲	۵
شازند	۰	۲	۵	بامدژ	۱	۲	۲۰
نورآباد	۰	۲	۵	خاور	۰	۲	۵
سمیه	۱	۲	۲۰	نظامیه	۰	۲	۵

ایستگاه	نمازخانه	کمینه زمان توقف (دقیقه)	حداکثر زمان توقف (دقیقه)	ایستگاه	نمازخانه	کمینه زمان توقف (دقیقه)	حداکثر زمان توقف (دقیقه)
تهران	۱	۲	۲۰	قارون	۰	۲	۵
مومن آباد	۰	۲	۵	اهواز	۱	۲	۲۰
ازنا	۱	۲	۲۰	قدس	۰	۲	۵
دربند	۰	۲	۵	حمید	۱	۲	۲۰
رودک	۰	۲	۵	حسینیه	۰	۷	۱۰
دورود	۱	۱۰	۲۰	خرمشهر	۱	۲	۲۰

۱۱. پی نوشت‌ها

1. Statistical Analysis of Propagation of Incidents
2. First in First Out
3. Simulated Annealing
4. Genetic Algorithm
5. Ant Colony Optimization

۱۲. مراجع

جمیلی، امین (۱۳۹۰) "زمان‌بندی دوره‌ای استوار در برابر اغتشاش حرکت قطارها و تعیین ظرفیت زیرساخت های خطوط ریلی"، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت.

حسن‌نایبی، عرفان، سیدرسول حسینی، سهیل مردانی، و آرمان ساجدی نژاد (۱۳۹۱) " نرم افزار زمان‌بندی حرکت قطارها SIMARail مبتنی بر رویکرد بهینه سازی بر پایه شبیه سازی"، یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران.

روشنی، کوثر (۱۳۸۹) " زمانبندی مجدد حرکت قطار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

صفارزاده، محمود، یقینی، مسعود و تمنایی، محمد (۱۳۹۱) "ارایه مدل برنامه ریزی زمان‌بندی حرکت قطارها با درنظر گرفتن محدودیتهای ویژه مسیرهای تک خطه در شبکه ریلی ایران"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال چهارم، شماره دوم، زمستان، ص ۱۵۱-۱۶۶.

یقینی، مسعود و محمدزاده، علی (۱۳۹۰) "یک مدل زمانبندی حرکت قطارها با در نظر گرفتن زمانهای توقف برای نماز"، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۴۵ ، شماره ۱ ، ص ۱۰۳ -۱۱۶.

یقینی، مسعود و نیکو، نریمان (۱۳۹۰) "ارائه مدل بهینه‌سازی برای تولید جدول زمانبندی فشرده حرکت قطارها و محاسبه ظرفیت برای راه‌آهن های شهری و برون شهری" ، یازدهمین کنفرانس بین المللی حمل ونقل و ترافیک.

Acuna-Agost, R., Michelon, P., Feillet, D. and Gueye, S. (2009) "Constraint programming and mixed integer linear programming for rescheduling trains under disrupted operations", 6th. International Conference on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems. Springer, pp. 312-313.

Acuna-Agost, R., Michelon, P., Feillet, D. and Gueye, S. (2011) "A MIP-based local search method for the railway rescheduling problem", Networks, Vol 57, pp. 69-86.

Albrecht, Amie R., D. M. Panton, and D. H. Lee. (2013) "Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using problem space search", Computers and Operations Research 40, No. 3, pp. 703-712

Almodóvar, M., García-Ródenas, R. (2013) "On-line reschedule optimization for passenger railways in case of emergencies", Computers and Operations Research, Vol. 40, No. 3, pp.725-736.

Alwadood, Z., Shuib, A. and Hamid, N.A. (2012) "Mathematical programming models for train rescheduling", International Journal of

for railway traffic management in large-scale networks", Public Transport, pp.1-29.

Kuster, J., Jannach, D. and Friedrich, G. (2009) "Extending the RCPSP for modeling and solving disruption management problems", Applied Intelligence Vol. 31, pp.234-253.

Louwerse, I. and Huisman, D. (2012) "Adjusting a railway timetable in case of partial or complete blockades", Erasmus School of Economics (ESE).

Mladenovic, S., Veskovic, S., Branovic, I., Jankovic, S. and Acimovic, S. (2015) Heuristic Based Real-Time Train Rescheduling System. Networks. doi: 10.1002/net.21625

Norio, T., Yoshiaki, T., Noriyuki, T., Chikara, H. and Kunimitsu, M. (2005) "Train rescheduling algorithm which minimizes passengers' dissatisfaction", Innovations in Applied Artificial Intelligence. Springer, pp. 829-838.

Pinedo, M. (2012) "Scheduling: theory, algorithms, and systems", Germany: Springer.

Şahin, I. (1999) "Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management", Transportation Research Part B: Methodological Vol. 33, pp.511-534.

Samà, M., Corman, F. and Pacciarelli, D. (2016) "A variable neighbourhood search for fast train scheduling and routing during disturbed railway traffic situations", Computers and Operations Research.

Szpigel, B. (1973) "Optimal train scheduling on a single track railway", Operational Research Vol.72, pp.343-351.

Tamannaei, M., Saffarzadeh, M., Jamili, A. and Seyedabrishami, S. (2016) "A double-track train rescheduling for incident conditions: optimization model and decomposition method", International Journal of Operational Research, Vol. 26, No.1, pp. 62-87.

Törnquist, J. (2007) "Railway traffic disturbance management—An experimental analysis of disturbance complexity, management objectives and limitations in planning horizon", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 41, pp.249-266.

Scientific and Engineering Research, Vol. 3, No. 6, pp.1-7

Araya, S., Abe, K. and Fukumori, K. (1983) "An optimal rescheduling for online train traffic control in disturbed situations", Decision and Control, 1983. The 22nd IEEE Conference on. IEEE, pp. 489-494.

Azad, N., Hassini, E. and Verma, M. (2016) "Disruption risk management in railroad networks: An optimization-based methodology and a case study", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 85, pp.70-88.

Caprara, A., Fischetti, M. and Toth, P. (2002) "Modeling and solving the train timetabling problem", Operations Research Vol.50, pp. 851-861.

Corman, F., D'Ariano, A., Pacciarelli, D. and Pranzo, M. (2010) "A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations", Transportation Research Part B: Methodological 44, pp.175-192.

Corman, F., Goverde, R. M. and D'Ariano, A. (2009) "Rescheduling dense train traffic over complex station interlocking areas", Robust and Online Large-Scale Optimization. Springer, pp. 369-386.

D'Ariano, A., Corman, F., Pacciarelli, D. and Pranzo, M. (2008). "Reordering and local rerouting strategies to manage train traffic in real time", Transportation Science Vol. 42, pp.405-419.

Fan, B., Roberts, C. and Weston, P. (2012) "A comparison of algorithms for minimising delay costs in disturbed railway traffic scenarios", Journal of Rail Transportol. Vol. 2, No. 1-2,

Huo, J., Wu, J., Kang, L., and Wang, B. (2016) "Railway timetable rescheduling based on priority and train order entropy", Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 30, No. 5, pp.04016006.

Jespersen-Groth, J., Potthoff, D., Clausen, J., Huisman, D., Kroon, L., Maróti, G. and Nielsen, M.N. (2009). "Disruption management in passenger railway transportation", Germany: Springer.

Kecman, P., Corman, F., D'Ariano, A. and Goverde, R. M. (2013) "Rescheduling models

Törnquist, J. and Persson, J. A. (2007) " N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 41, pp.342-362.

Visentini, M.S., Borenstein, D., Li, J.-Q. and Mirchandani, P.B. (2013) "Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services", Journal of Scheduling, Vol. 17, No. 6, pp.1-27.

Wang, L., Mo, W., Qin, Y., Dou, F. and Jia, L. (2014) "Optimization based high-speed railway train rescheduling with speed restriction", Discrete Dynamics in Nature and Society, Article ID 934369, 14 pages

Xu, X., Li, K., Yang, L. (2015) "Scheduling heterogeneous train traffic on double tracks with efficient dispatching rules". Transportation Research Part B: Methodological Vol.78, pp.364-384.

Yang, L., Zhou, X. and Gao, Z. (2013) "Rescheduling trains with scenario-based fuzzy recovery time representation on two-way double-track railways", Soft Computing, Volo. 17. Issue 4, pp.1-12.

Yang, L., Zhou, X. and Gao, Z. (2014) "Credibility-based rescheduling model in a double-track railway network: a fuzzy reliable optimization approach", Omega, Vol. 48, pp.75-93.

Zhan, S., Kroon, L.G., Veelenturf, L.P. and Wagenaar, J.C. (2015) "Real-time high-speed train rescheduling in case of a complete blockage", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 78, pp.182-201.

عرفان حسن‌نایبی دانش آموخته دکتری مهندسی صنایع از دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه تربیت مدرس تهران است. ایشان درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی صنایع از دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه شریف به ترتیب در سال های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ اخذ نموده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه وی مسایل برنامه ریزی حمل و نقل، زمان بندی، شبیه سازی و مدیریت پروژه است.

سیدحسام الدین ذگردی استاد دانشگاه تربیت مدرس است. وی مدرک دکتری خود را از دانشگاه توکیوی ژاپن در سال ۱۹۹٤ دریافت رد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت اختلال، مدیریت زنجیره تامین، برنامه ریزی و زمانبندی تولید، ارزیابی عملکرد و برنامه ریزی پروژه است.

محمدرضا امین ناصری دانشیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس تهران، مدرک دکتری خود را از دانشگاه ویرجینیای آمریکا در سال ۱۹۹۲ دریافت کرده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان هوش مصنوعی، سیستم های خبره، برنامه ریزی انرژی، الگوریتم های فراابتکاری و بهینه سازی است.

مسعود یقینی، دانشیار دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت تهران است. مدرک دکتری مهندسی و برنامه ریزی حمل و نقل ریلی خود را از کشور چین در سال ۲۰۰۲ اخذ کرد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه وی مسائل برنامه ریزی حمل و نقل ریلی، مسایل بهینه سازی شبکه، شبکه های چند کالایی، طراحی شبکه، تخصیص- جانمایی، پوشش مجموعه ای، و فروشنده دوره گرد؛ روشهای دقیق بهینه سازی مسائل با ابعاد بزرگ نظیر تولید ستون، دانتزیک-ولف، شاخه و قیمت، و شاخه و برش، روشهای فراابتکاری بهینه سازی نظیر الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی کلونی مورچگان است.

هاشـم کلانتری، درجه کارشناسی در رشته ریاضی محض را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه رازی و درجه کارشناسی ارشد در رشته MBA در سال ۱۳۹٤ را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات البرز اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مطالعات بهره برداری در حمل ونقل ریلی بوده و در حال حاضر مدیر گروه مطالعات بهره برداری مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن است.