زمانبندی حرکت قطارهای مسافری
با رویکرد بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی گسسته-پیشامد

عرفان حسن‌نایبی*، استادیار، دانشکده فنی‌مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، ایران
آرمان ساجدی نژاد، استادیار، پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران (ایرانداک)، تهران، ایران
سهیل مردانی، دانشجوی دکتری برنامه ریزی شهری، دانشکده ارتباطات، معماری، هنر و فناوری اطلاعات، دانشگاه لوسوفونا، لیسبون – پرتغال
سید رسول حسینی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد قزوین، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: erfanhnayebi@gmail.com
دریافت: ۱۳۹٦/۰٤/۱۹ – پذیرش: ۱۳۹٦/۰۹/۱۵
صفحه ۹۵-۱۱۷

چکیده
در این مقاله از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه‌های ریلی تک خطه و دوخطه، استفاده شده است. در رویکرد پیشنهادی، مدل شبیه‌سازی برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی شدنی بکار گرفته شده است. مدل شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار شیءگرای ED طراحی شده است. اطلاعات ورودی مسئله شامل نوع بلاک‌ها، ترتیب و موقعیت مکانی ایستگاه‌ها، تعداد خطوط و سکوی ایستگاه‌ها، امکانات ایستگاه (آبگیری، سوخت‌گیری، نمازخانه)، زمان‌های مسدودی بلاک‌ها و اوقات شرعی است. متغیر تصمیم مسئله، زمان اعزام قطارها از مبدأ بوده و هدف مسئله حداقل کردن مجموع وزنی زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای قطارها است. برای یافتن برنامه زمان‌بندی نزدیک به بهینه، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی بر پایه الگوریتم فراابتکاری اتصال مسیر تکاملی، طراحی شده است. برای بررسی کارایی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی، زمان‌بندی قطارهای مسافری در مسیر تهران-رازی انجام شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که پیاده‌سازی مدل پیشنهادی نسبت به برنامه زمان‌بندی فعلی راه‌آهن ج.ا.ا. منجر به بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در زمان‌های توقف غیربرنامه ای قطارها شده است. همچنین الگوریتم پیشنهادی قادر است در یک مدت زمان منطقی، برنامه حرکت قطارهای مسافری را با توجه به بازه‌های زمانی مجاز جهت اقامه نماز تولید کند.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی حرکت قطارها، بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، مدل‌سازی شیءگرا، الگوریتم اتصال مسیر تکاملی

۱- مقدمه

شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی، شامل ناوگان عظیمی از قطارها و لوکوموتیوها برای انتقال حجم زیادی مسافرین و بار هستند. بهبود عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی که شامل افزایش میزان بهره‌وری در شبکه ریلی و ارتقاء سطح خدمت‌رسانی است، همواره جزء دغدغه‌های اصلی شرکت‌های راه‌آهن است. تاخیرات قطارها در شبکه‌های ریلی باعث کاهش ظرفیت بالقوه، کاهش قابلیت اطمینان، ایمنی و استواری سیستم شده و می‌بایست در حداقل مقدار ممکن خود باشد. مسئله برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی از یک دیدگاه کلی شامل مسائل طراحی شبکه ریلی، برنامه‌ریزی خطوط، زمان‌بندی و مسیریابی قطارها، برنامه‌ریزی تخصیص و گردش لوکوموتیوها و برنامه‌ریزی خدمه راه‌آهن است. در این بین، مسئله زمان‌بندی

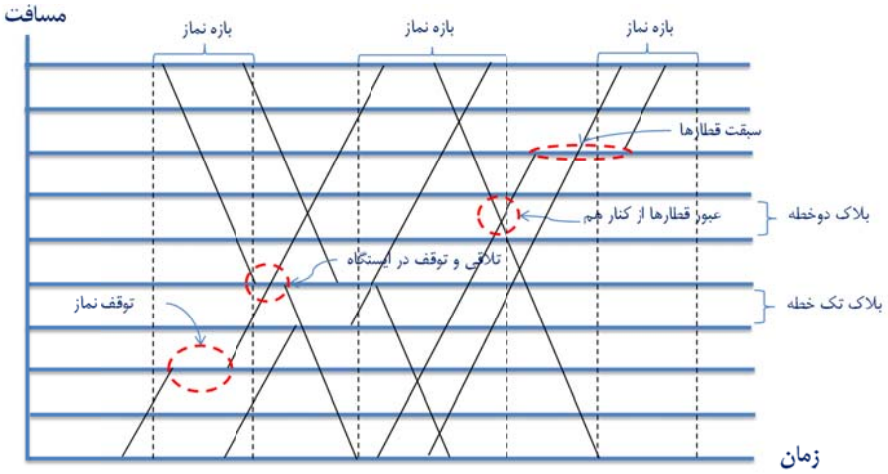
حرکت قطارها به دلیل پیچیدگی‌های حل آن از نظر ابعاد مسائل واقعی و وابستگی بین قطارها از اهمیت بالایی برخوردار است. امروزه اهمیت این مسئله با افزایش تقاضای سفر و توسعه خطوط ریلی نیز بیشتر شده است. شرکت‌های راه‌آهن می‌بایست علاوه بر بهره‌برداری هرچه بهتر از ظرفیت ریلی موجود، قادر به تولید خودکار و سریع برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها با حداقل تاخیرات باشند. تهیه برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه‌های ریلی، از دشوارترین فعالیت‌های شرکت راه‌آهن است. در یک برنامه زمان‌بندی در راه‌آهن ایران، باید زمان اعزام دقیق قطارها از مبدأ و ایستگاه‌های بین راهی و همچنین برنامه توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی جهت اقامه نماز، تعیین شود. حداقل شدن زمان‌های تأخیر و توقف غیر برنامه‌ای قطارها از معیارهای رضایت مسافران قطار است. عمده زمان‌های توقف غیربرنامه ای قطارها به دلیل محدودیت ظرفیت ایستگاه‌ها، مسدودی بلاک‌ها و اشغال بودن خطوط ریلی توسط سایر قطارها است. شرکت راه‌آهن جهت بهره‌برداری بهینه از ظرفیت زیرساخت‌های ریلی موجود، بایستی برنامه‌ریزی حرکت قطارها را در فشرده‌ترین حالت و با لحاظ شدن محدودیت عملیاتی انجام دهد. محدودیت‌های عمده مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها شامل محدودیت‌های ظرفیت خطوط ریلی، خطوط و سکوهای ایستگاه، بازه زمانی مجاز اعزام از مبدأ، فاصله بین زمان اعزام قطارها و حداکثر زمان سفر قطارها است. به دلیل ابعاد بسیار بزرگ شبکه‌های ریلی (شامل تعداد قطارها و ایستگاه‌ها) و همچنین وجود انواع مختلفی از قوانین و شرایط عملیاتی، تولید برنامه‌های زمان‌بندی مطلوب، به کمک روش‌های دستی، بسیار زمان‌بر است. همچنین وجود خطاها و اشکالات در برنامه‌های زمان‌بندی دستی نیز اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به این موضوع، استفاده از ابزارهایی که قادر به تولید برنامه‌های زمان‌بندی به شکل مکانیزه باشند، ضروری به نظر می‌رسد.

تعریف مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها

یک شبکه ریلی متشکل از خطوط ریلی مفروض است. برای کنترل حرکت قطارها در شبکه‌های راه‌آهن، از سیستم بلوک‌بندی و علائم استفاده می‌شود. در سیستم بلوک‌بندی، خطوط ریلی را به چندین قطعه تقسیم‌بندی می‌کنند. یک بلاک، بخشی از شبکه ریلی است که ورود و خروج قطارها روی آن، توسط سیگنال‌هایی که در ابتدا و انتهای آن قرار داده شده‌اند، کنترل می‌شود. در هر بلاک فقط یک قطار می‌تواند بطور همزمان حرکت کند. در شبکه ریلی ایران، خط ریلی، بین هر دو ایستگاه متوالی تنها یک بلاک در نظر گرفته شده است. شبکه ریلی ایران شامل بلاک‌های تک خطه و دوخطه است. در بلاک‌های تک خطه، قطارها در دو جهت روی بلاک حرکت کرده و لذا برای رفع تلاقی قطارها باید، ترتیب ورود آن‌ها به بلاک‌ها تعیین شود. در بلاک‌های دوخطه، حرکت قطارها رفت و برگشت روی دو مسیر مجزا است و لذا تلاقی بین قطارها وجود ندارد. تنها درصورتی‌که یکی از بلاک‌های دوخطه، به دلیل تعمیرات خط و یا سایر علل مسدود باشد، این بلاک دوخطه در بازه زمانی مسدودی، تبدیل به یک بلاک تک خطه خواهد شد و جریان قطارهای رفت و برگشتی روی آن انجام می‌شود. جهت اعزام یک قطار از یک ایستگاه باید بلاک مقابل و یکی از خطوط ایستگاه بعدی آزاد باشد. در زمان اعزام یک قطار از یک ایستگاه، درصورتی‌که قطار در ایستگاه بعدی توقف برنامه‌ای (مانند مسافرگیری یا اقامه نماز) داشته باشد، باید حداقل یک خط متصل به سکو در ایستگاه بعد آزاد باشد، در غیر اینصورت کافی است تنها یک خط (متصل به سکو یا بدون سکو) از ایستگاه بعدی آزاد باشد. یک قطار هنگام ورود به یک بلاک (اعزام از ایستگاه)، یکی از خطوط آزاد در ایستگاه بعدی را جهت ورود انتخاب می‌کند و قطار دیگری اجازه وارد شدن به آن را ندارد.

اعزام یک قطار نباید منجر به بن‌بست ترافیکی و قفل شدن حرکت قطارها شود. وضعیت بن‌بست ترافیکی در شبکه‌های ریلی بطور کامل در بخش (٦) توضیح داده خواهد شد. سرعت حرکت قطارها ثابت فرض شده است. کلیه زمان‌های سیر و توقف برنامه‌ای قطارها نیز قطعی می‌باشند. برای نمایش حرکت قطارها از نمودار ایستگاه–زمان استفاده می‌شود (شکل ١). در این نمودار، محور افقی، محور زمان و محور قائم، فاصله بین دو ایستگاه است. حرکت قطارها روی بلاک‌ها توسط خطوط مورب و زمان‌های توقف قطارها روی خطوط ایستگاه نیز توسط خطوط افقی نشان داده می‌شود. کلیه اطلاعات لازم در یک برنامه زمان‌بندی شامل زمان‌های ورود و خروج قطارها در ایستگاه‌ها و بلاک‌ها، ایستگاه توقف قطارها برای اقامه نماز، افق شرعی ایستگاه‌ها و سایر موارد، قابل نمایش در این نمودار است.

اعزام هر قطار باید در یک بازه زمانی مشخص انجام شود. مسیر حرکت هر قطار نیز مشخص بوده و قطارها به دلایل متفاوتی مانند مسافرگیری، آبگیری، اقامه نماز و غیره، در ایستگاه‌های بین راه توقف دارند. برنامه توقف قطارها برای مواردی مانند مسافرگیری، بارگیری و سوخت‌گیری، از قبل مشخص و ثابت بوده و به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته می‌شود. اما برنامه توقف قطارها جهت اقامه نماز، شامل مکان و زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها، از قبل نامشخص بوده و بایستی با توجه به اوقات شرعی و زمان‌های حرکت قطارها تعیین شود. هدف مسئله، تعیین زمان دقیق اعزام قطارها از ایستگاه‌های مبدأ و برنامه توقف آن‌ها در بازه‌های افق شرعی در جهت کمینه کردن مجموع وزنی زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای است. در این تحقیق، زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای به دو دسته زمان‌های توقف غیر برنامه‌ای نوع اول و دوم تقسیم می‌شود. در دسته اول که توقف غیربرنامه‌ای به دلیل تلاقی یک قطار با قطارهای غیرهم جهت رخ می‌دهد، زمان‌های توقف به دلیل تلاقی نام‌گذاری می‌گردد. دسته دوم نیز که توقف اضافی ناشی از پر بودن بلاک یا ظرفیت ایستگاه بعدی به واسطه قطارهای هم‌جهت است، زمان‌های نرسیدن (قطارهای) مسافری نامیده می‌شود. با توجه به قوانین ریلی در ایران، زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای نوع دوم به مراتب بحرانی‌تر از زمان‌های توقف غیربرنامه ای نوع اول بوده و باید در حداقل مقدار خود قرار داشته باشد. در نتیجه زمان توقف نوع دوم از ضریب وزنی بیشتری در تابع هدف برخوردار است.



شکل ۱. نمودار ایستگاه- زمان برای نمایش یک برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها

۲-پیشینه تحقیق

رویکردهای مدل‌سازی و روش‌های حل متنوعی برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در پیشینه تحقیق ارائه شده است. یک مرور ادبیات از مدل‌ها و روش‌های حل مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها و همچنین رویکردهای استوارسازی توسط چاچیانی و تات [Cacchiani and Toth, 2012] انجام شده است. در مسیرهای تک خطه، قطارها در دو جهت رفت و برگشت بین ایستگاه‌های مبدأ و مقصد حرکت می‌کنند. با افزایش تعداد قطارها، تعداد تلاقی بین قطارهای رفت‌وبرگشت، بصورت نمایی افزایش می‌یابد. هیگینز و همکاران [Higgins (et al.), 1997]، الگوریتم‌های فراابتکاری شامل الگوریتم جستجوی همسایگی، الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوع و دو الگوریتم ابتکاری ترکیبی برای حل مسائل زمان‌بندی قطارها در خطوط ریلی تک‌خطه، ارائه نموده‌اند. مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی نیز برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها توسط کاپرارا و همکاران [Caprara (et al.), 2002]، ژو و ژانگ [Zhou and Zhong, 2007] و کاستیلو و همکاران [Castillo (et al.), 2011] ارایه شده است. یکی از معایب مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی، دشواری حل مسائل با ابعاد واقعی است. از این رو، روش‌های ابتکاری، فراابتکاری، شبیه‌سازی و سیستم‌های خبره کاربرد بیشتری در حل مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها دارند. در این بین، مدل‌های شبیه‌سازی کاربرد وسیع‌تری در مقایسه با سایر ابزارها

در مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها ارائه می‌کنند. از مدل‌های شبیه‌سازی در تولید برنامه‌های زمان‌بندی موجه و ارزیابی برنامه زمان‌بندی موجود، استفاده می‌شود. اولین تحقیق در زمینه کاربرد شبیه‌سازی در زمان‌بندی قطارها، توسط پترسن و تیلور [Petersen and Taylor, 1982] انجام شده است. دسوکی و لچمن [Dessouky and Leachman, 1995]، نیز یک مدل شبیه‌سازی با زبان شبیه‌سازی SLAM II و رویکرد فرآیند محور برای زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه‌های تک خطه و دوخطه با فرض سرعت ثابت حرکت قطارها ارائه کرده‌اند. آن‌ها از مدل شبیه‌سازی، برای مطالعه ظرفیت خطوط ریلی و تاخیرات قطارها استفاده نموده‌اند. برای زمان‌بندی مجدد قطارها در شبکه ریلی، یک مدل شبیه‌سازی گسسته- پیشامد برای رفع تلاقی قطارها در شبکه ریلی توسط چنگ [Cheng, 1998] ارائه شده است. هافمن و همکاران [Hofman (et al.), 2006] یک مدل شبیه‌سازی رویداد- گسسته برای ارزیابی یک برنامه زمان‌بندی توسعه داده‌اند. لی و همکاران [Li (et al.), 2008] نیز یک مدل شبیه‌سازی پیشرفته، در یک شبکه ریلی تک خطه برای حداقل کردن مجموع زمان سفر قطارها ارائه کرده‌اند. مارینو و ویگاس [Marinov and Viegas, 2010] نیز با نرم‌افزار شبیه‌سازی SIMUL8 یک مدل شبیه‌سازی برای تحلیل عملیات حمل‌ونقل قطارهای باری توسعه داده‌اند. در تحقیقی از یالچینکایا و بایان [Yalçınkaya and Bayhan, 2012] یک مدل شبیه‌سازی احتمالی در محیط نرم‌افزار Arena برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی موجه در یک مسیر ریلی ارائه شده اما جهت بهبود برنامه زمان‌بندی و ارائه یک جواب نزدیک به بهینه، تلاشی صورت نگرفته است. راه‌آهن‌های مختلف در سراسر دنیا برای مقاصد مختلفی از سیستم‌های شبیه‌سازی به عنوان نرم‌افزارهای برنامه‌ریزی قطارها استفاده می‌کنند. از جمله سیستم‌های شبیه‌سازی شناخته شده، نرم‌افزار RailSys از شرکت Rmcon آلمان، نرم‌افزار RAILSIM از شرکت سیسترا آمریکا و نرم‌افزار OpenTrack در کشور سوئیس است. یکی از شاخص‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی حرکت قطارها، مدل SIMONE است. این مدل توسط میدلکوپ و بومن [Middelkoop and Bouwman, 2001] بصورت یک نرم‌افزار تحلیل شبکه ریلی ارائه شده و اولین کاربرد آن در ارزیابی پروژه‌های در شرکت ProRail بوده است. نرم‌افزار SIMONE که در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی ED (Enterprise dynamics) طراحی شده است، قادر به تحلیل ظرفیت شبکه ریلی و نقاط گلوگاهی است. این نرم‌افزار می‌تواند در تعیین میزان استواری یک برنامه زمان‌بندی و کمّی نمودن گلوگاه‌ها در شبکه ریلی و همچنین در تجزیه‌وتحلیل علی و معلولی به هنگام وقوع تأخیرات نقش یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری باشد.

ترکیب رویکرد شبیه‌سازی با الگوریتم‌های فراابتکاری در تعداد محدودی از مقالات مشاهده شده است. به عنوان نمونه، ولش و گاسو [Welch and Gussow, 1986] ترکیب روش شبیه‌سازی با روش‌های ابتکاری را جهت بررسی عوامل مؤثر بر ظرفیت یک خط ریلی استفاده نموده‌اند. گیلی و همکاران [Gély (et al.), 2009] یک رویکرد ترکیبی شامل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را برای مسئله زمان‌بندی مجدد و غیردوره‌ای قطارها توسعه داده‌اند. کویی [Cui, 2010] نیز یک مدل ترکیبی برای سیستم نیمه مکانیزه اعزام قطارها با ترکیب روش شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ممنوع ارائه کرده است. تحقیقات داخلی در مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها در ایران بیشتر در زمینه ارائه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی و روش‌های فراابتکاری انجام شده است. مدل‌های برنامه‌ریزی برای حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها در تحقیقات سپهری و پورسید آقایی (۱۳۷۸)، یقینی و محمدزاده (۱۳۹۰)، جمیلی (۱۳۹۰) و یقینی و نیکو (۱۳۹۰) ارائه شده است. یک دسته‌بندی از مقالاتی که از روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها استفاده کرده‌اند، در جدول ۱ ارایه شده است. تعداد مقالات اندکی موضوع زمانبندی حرکت قطارها را در شبکه های ریلی بررسی کرده اند و لذا با توجه به اینکه زیرساخت ریلی در راه آهن کشورهای مختلف مانند ایران به شکل شبکه است، کاربرد مدل‌های شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است. مقاله حاضر با لحاظ نمودن محدودیت‌های مهم راه آهن ایران مانند توقف قطارها برای اقامه نماز، فرض مسدودی بلاک‌ها، محدودیت خط و سکو و همچنین شرایط بن‌بست ترافیکی از کامل‌ترین مدل‌های زمانبندی حرکت قطارها در ادبیات موضوع محسوب می‌شود (جدول ۱). رویکرد شبیه‌سازی در تعدادی از مقالات داخلی در حوزه حمل و نقل ریلی نیز بکار گرفته شده است. شفاهی و صادقی (۱۳۸۳) یک مدل شبیه‌سازی برای زمانبندی حرکت

قطارها با هدف افزایش قابلیت اطمینان برنامه زمانبندی ارایه کرده اند. در تحقیق فوق، پارامترهای مدل نظیر زمان طی بلاک توسط یک قطار و زمان توقف در ایستگاه به صورت متغیرهای تصادفی فرض شده‌اند. آنها به بررسی تأثیر سیاستهای مختلف برنامه‌ریزی در قابلیت اطمینان برنامه‌های حرکت قطارها پرداخته‌اند. قاسم پور و رادفر (۱۳۸۸) نیز به شبیه‌سازی حرکت قطار با استفاده از شبکه های پتری و مدلهای بهینه‌سازی پرداخته‌اند. سیستم توسعه داده شده قادر به شبیه‌سازی بخشی از یک مسیر ریلی و ارایه گراف حرکت قطارها قبل و بعد از بهینه‌سازی است. با توجه به مرور انجام شده در پیشینه تحقیق، عمده مقالات تنها به شبیه‌سازی حرکت قطارها پرداخته و ارایه یک برنامه زمان‌بندی موجه و نزدیک به بهینه مدنظر نبوده است. تاکنون تحقیقی که بطور مستقیم از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای حل مسائل زمان‌بندی حرکت قطارها استفاده کند، مشاهده نشده است. با توجه به وجود ابعاد بزرگ مسائل واقعی و محدودیت‌ها و فرضیات متنوع مانند توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی، استفاده از مدل‌های ریاضی و روش‌های حل دقیق جهت زمان‌بندی قطارهای شبکه‌های راه‌آهن از کارائی لازم برخوردار نمی‌باشد. از این رو، در تحقیق حاضر، از رویکرد بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی برای حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها استفاده شده و مدل شبیه‌سازی قادر به تولید برنامه زمانبندی موجه با لحاظ نمودن برنامه توقف قطارها در اوقات شرعی است.

۳-رویکرد بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی

ترکیب رویکرد شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی با ابعاد واقعی کارایی بیشتری نسبت به مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی دارد. در رویکرد بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی با جستجوی فضای جواب، سعی در یافتن جواب‌های با کیفیت خوب نموده که ارزیابی و یا تولید این جواب‌ها در مدل شبیه‌سازی انجام می‌شود. تشریح کاملی از این رویکرد و ترکیب روش‌های بهینه‌سازی با شبیه‌سازی گسسته-پیشامد توسط آندرادوتیر [Andradottir, 1998] و فو [Fu, 2002] انجام شده است. سیستم‌های بهینه‌یابی شناخته شده‌ای مانند ®OptQuest، ®Extend Optimizer و ®Witness Optimizer بر اساس این رویکرد طراحی شده‌اند که در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی قابل استفاده هستند. در این نرم‌افزارها، رویکرد "جعبه سیاه" برای ترکیب روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بکارگرفته شده است. از جمله مزایای رویکرد "جعبه سیاه" این است که ماژول بهینه‌سازی بطور مستقل از نوع مسئله قابل بکارگیری می‌باشد. اما نکته ضعف آن در این است که به دلیل ساختار کلی آن، از اطلاعات خاص هر مسئله برای تطبیق یا تغییر روش جستجو استفاده نمی‌کند. برای مسائل بزرگ، طراحی ماژول‌های بهینه‌سازی اختصاصی کارایی بیشتری دارد. در تحقیق حاضر یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها توسعه داده شده است. در هر گام از اجرای بهینه‌سازی، یک برنامه اعزام قطارها تعیین شده و قطارها در مدل شبیه‌سازی حرکت می‌کنند تا یک برنامه زمان‌بندی حاصل شود. در انتهای شبیه‌سازی، مقدار تابع هدف جواب فعلی تعیین شده و الگوریتم فراابتکاری، برنامه اعزام دیگری را جهت شبیه‌سازی، تولید می‌کنند. این فرآیند تا رسیدن به مقدار مشخصی از زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای قطارها ادامه می‌یابد.

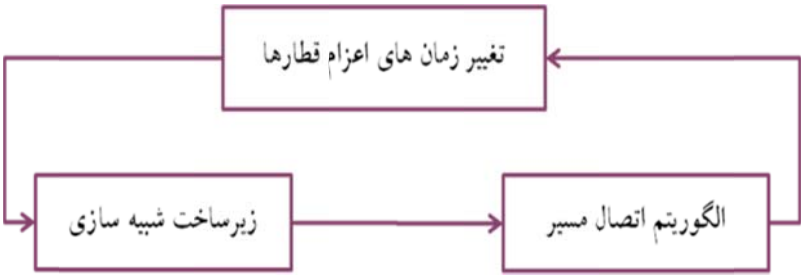
٤-تشریح مدل شبیه‌سازی

داده‌های ورودی در مدل شبیه‌سازی شامل اطلاعات قطارها، اوقات شرعی و زیرساخت شبکه ریلی است. اطلاعات قطارها و ناوگان حمل‌ونقل شامل کد قطارها و ایستگاه‌های مبدأ و مقصد، زمان اعزام پیشنهادی از مبدأ، تلرانس مجاز حرکت از مبدأ، زمان‌های توقف برنامه‌ای، کلاس‌های سرعت و زمان سیر کلاس‌های سرعت در هر بلاک است. برنامه توقف قطارها نیز شامل زمان‌های توقف برنامه‌ای (مسافرگیری، آبگیری، سوخت‌گیری و تجدید جواز) است. اطلاعات زیرساخت شبکه ریلی در مدل شبیه‌سازی شامل تعداد ایستگاه ها، بلاک‌ها، محورهای ریلی، تعداد خطوط و سکوهای ایستگاه، سمت نمازخانه در ایستگاه (سمت خط زوج یا فرد)، داشتن یا نداشتن زیرگذر و نمازخانه، اوقات شرعی برای ایستگاه‌ها و برنامه زمانی مسدودی بلاک‌ها است. تمام محدودیت‌ها و قوانین عملیاتی مربوط به حرکت قطارها در بلاک‌ها و ایستگاه‌ها در مدل شبیه‌سازی پیاده‌سازی شده است. مدل شبیه‌سازی وظیفه تولید برنامه‌های زمان‌بندی موجه را ایفا می‌کند. بعد از هر تکرار شبیه‌سازی، مجموع وزنی زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای قطارها به عنوان تابع هدف جواب

فعلی محاسبه می‌شود. با اجراهای مکرر شبیه‌سازی، سعی در یافتن یک برنامه زمان‌بندی با حداقل توقف غیربرنامه‌ای می‌شود. ارتباط ماژول‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در شکل ۲، مشخص شده است.

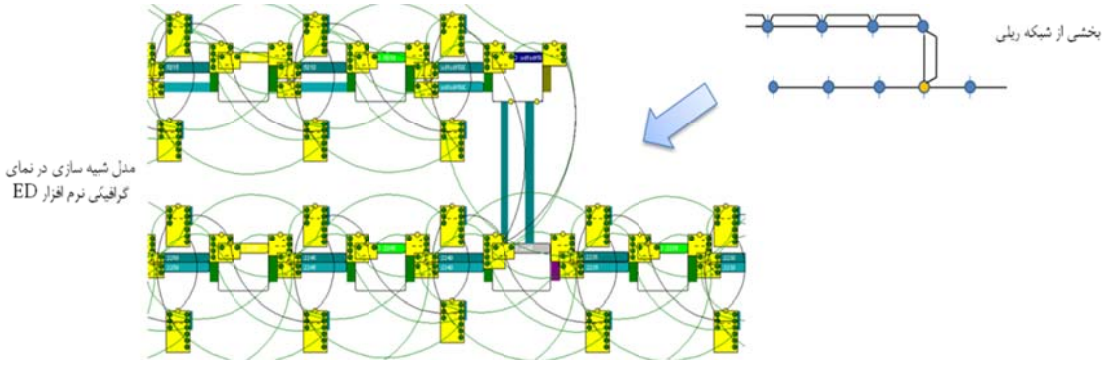
جدول ۱. دسته‌بندی مقالات مرتبط با مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها با روش‌های حل فراابتکاری

نویسندگان	نوع زیرساخت ریلی	فرض مسدودی بلاک‌ها	محدودیت خط و سکو در ایستگاه‌ها	محدودیت بن‌بست ترافیکی	توقف قطارها برای اقامه نماز	روش حل	تابع هدف
شفاهی و عابدینی (۱۳۸۳)	مسیر تک خطه و دوخطه	×	×	×	×	الگوریتم جستجوی ممنوع (TS)	مجموع زمان توقف غیربرنامه ای
شفاهی و عزیزخانی (۱۳۸۳)	مسیر تک خطه و دوخطه	×	×	×	×	الگوریتم ژنتیک (GA)	مجموع زمان توقف غیربرنامه ای
قصیری و مرشد سلوک (۱۳۸٤)	مسیر تک خطه	×	×	×	×	الگوریتم سیستم اجتماع مورچه‌ها (ACO)	مجموع زمان توقف غیربرنامه ای
خادم ثامنی (۱۳۸٦)	مسیر دوخطه	×	×	×	√	الگوریتم ژنتیک (GA)	مجموع وزنی زمان سفر قطارها
جمیلی و کیانفر (۱۳۸۸)	مسیر تک خطه	×	×	×	×	الگوریتم عملیات حرارتی شبیه‌سازی شده (SA)	مجموع زمان سفر قطارها
جمیلی (۱۳۹۰)	شبکه‌های ریلی تک خطه، دوخطه و چندخطه	×	√	×	√	الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (PSO)، شبه مغناطیس (EM) و عملیات حرارتی شبیه‌سازی شده (SA)	مجموع وزنی زمان سفر قطارها
حسن‌نایبی (۱۳۹۰)	مسیر دو خطه	×	×	×	√	ترکیب روش جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه (GRASP) و جستجوی همسایگی متغیر (VNS)	طول افق زمانبندی
مقاله حاضر	شبکه‌های ریلی تک خطه و دوخطه	√	√	√	√	ترکیب مدل شبیه‌سازی و الگوریتم تکاملی اتصال مسیر (EPR)	مجموع وزنی زمان‌های توقف غیربرنامه ای

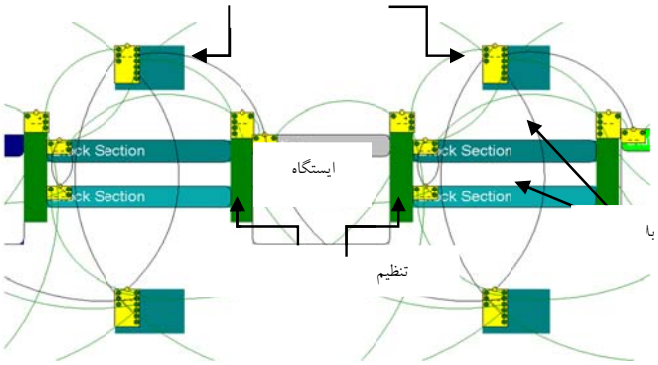


شکل ۲. ارتباط ماژول شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در تحقیق حاضر

در این تحقیق، از نرم‌افزار Enterprise Dynamics (ED) به دلیل سهولت مدل‌سازی در آن، قدرت هسته شبیه‌سازی و انعطاف‌پذیری بالا در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، به عنوان بستر مدل شبیه‌سازی استفاده شده است. نرم‌افزار شبیه‌سازی ED یک برنامه نرم‌افزاری شیءگرا به منظور ساخت مدل‌های شبیه‌سازی گسسته-پیشامد، ایجاد نمایش گرافیکی و پویانمایی، شبیه‌سازی لحظه‌ای و کنترل فرآیندهای پویا است. این نرم‌افزار شبیه‌سازی تجاری توسط شرکت هلندی Incontrol عرضه شده و تاکنون سازمان‌ها و مراکز مختلفی از جمله راه‌آهن هلند، صنایع فولاد و شرکت‌های خودروسازی از آن برای شبیه‌سازی فرآیندهای خود استفاده کرده‌اند. در این نرم‌افزار، کاربر قادر خواهد بود با انتخاب موجودیت‌ها (با نام اتم در نرم‌افزار ED) از کتابخانه استاندارد و انتقال آن‌ها به محیط گرافیکی دوبعدی، مدل موردنظر را خود را طراحی نماید (شکل ۳). کاربر می‌تواند اتم‌هایی با جزئیات موردنظر (مانند یک بلاک و ایستگاه) را در مدل شبیه‌سازی طراحی کرده و از آن برای ساخت مدل شبکه ریلی استفاده کند. کاربران پیشرفته قادر خواهند بود که اتم‌های جدیدی متناسب با مسئله و نیاز خود، طراحی و استفاده نمایند. این نرم‌افزار دارای زبان برنامه‌نویسی مختص به خود با نام 4Dscript است که به کاربر در مدل‌سازی پیشرفته محدودیت‌های سیستم، کمک می‌کند. برای هر یک از اجزای شبکه ریلی در مدل شبیه‌سازی، یک اتم در نظر گرفته می‌شود. برای برقراری ارتباط بین اجزای مدل از کانال‌های ارتباطی و اطلاعاتی استفاده می‌شود. یک شبکه ریلی در نرم‌افزار ED با طراحی اتم‌های بلاک، ایستگاه، صف انتظار و اتم کنترل‌کننده سرفاصله زمانی مدل‌سازی شده است (شکل ٤). اتم‌ها در مدل شبیه‌سازی از طریق کانال‌های ارتباطی قادر به تبادل اطلاعات و ردیابی هستند. در نرم‌افزار ED سه دسته کانال ارتباطی شامل کانال‌های ورودی، خروجی و اطلاعاتی برای هر اتم قابل تعریف است. کانال‌های ورودی و خروجی جهت انتقال و جریان اتم‌ها (مانند جریان محصولات روی ماشین‌آلات) و همچنین ارجاع کردن به سایر اتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. کانال اطلاعاتی نیز برای انتقال داده‌ها و ارجاع کردن به سایر اتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان حرکت قطارها و مسیریابی آن‌ها در مدل شبکه ریلی به کمک کانال‌های ورودی و خروجی اتم‌ها قابل‌تعریف است. همچنین امکان تعریف چندین کانال ورودی و خروجی برای هر اتم وجود داشته و یک شبکه ریلی کلی چندخطه نیز قابل مدل‌سازی است. مزیت اصلی مدل شبیه‌سازی ارائه شده در این تحقیق در این است که وابسته به نوع زیرساخت ریلی نبوده و برای یک شبکه ریلی با بلاک‌های تک خطه و دوخطه قابل استفاده است. نهاده‌های اصلی در مدل شبیه‌سازی به همراه تعریف خصیصه‌های مربوطه و دامنه مقادیر برای هر یک در جدول خلاصه شده است.



شکل ۳. نمونه مدل شبیه‌سازی توسعه داده شده برای بخشی از یک شبکه ریلی در نمای دو بعدی در نرم‌افزار ED



شکل ٤. اجزای اصلی مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار ED

جدول ۲. تعریف ویژگی‌ها و دامنه تغییرات آن برای نهاده‌های اصلی در مدل شبیه‌سازی

نهاده مدل	تعریف خصیصه	دامنه تغییرات و مقدار خصیصه
اتم ایستگاه	تعداد خطوط آزاد متصل به سکو	عدد طبیعی
	تعداد خطوط آزاد بدون سکو	عدد طبیعی
	وجود یا عدم نمازخانه	{0,1}
	سمت قرارگیری نمازخانه (خط زوج یا فرد)	{0,1}
	تعداد قطارهای حاضر در ایستگاه جهت اقامه نماز	عددصحیح غیرمنفی
	اوقات شرعی ایستگاه	بازه اعداد صحیح [L,U] برای هر یک از اوقات شرعی
اتم بلاک	نوع بلاک (تکخطه، دوخطه)	{0,1}
	آزاد بودن یا بسته بودن بلاک (اشغال بودن)	{0,1}
	در دسترس بودن با توجه به بازه مسدودی بلاک	{0,1}
اتم قطار	ایستگاه مبدأ	کد ایستگاه
	ایستگاه مقصد	کد ایستگاه
	کلاس سرعت	عددصحیح>۱ (تعداد کل کلاس‌های سرعت را با نماد Q نشان می‌دهیم)>Q
	تعداد ایستگاه‌های عبوری	عددصحیح>۱ (تعداد ایستگاه های عبوری برای قطار jام را با نماد m_j نشان می‌دهیم)>m_j
	وضعیت توقف برای اقامه نماز	{0,1,2,3}

لیست رویدادهای هر اتم، تعیین‌کننده رفتار اتم در شرایط مختلف (ورود به اتم دیگر، خروج از اتم، ورود به مدل و ...) است. یک رویداد می‌تواند برای اتم e_1 به فاصله زمانی e_2 ثانیه از لحظه اجرا و با کد رویداد e_3 اجرا شود. در هنگام اجرا شدن دستورات بخش کنترل رویدادها، با توجه به مقدار متغیر کد رویداد، یکی از رویدادهای اتم اجرا می‌شود. به عنوان مثال، برای مدل‌سازی برنامه مسدودی بلاک‌ها، در ابتدای هر اجرای شبیه‌سازی، دو رویداد شامل باز و بستن کانال ورودی بلاک تولید می‌شود. اگر زمان شروع و طول دوره مسدودی بلاک iام را به ترتیب با نمادهای bs_i و bd_i نمایش دهیم، آنگاه رویداد بستن ورودی اتم بلاک در زمان bs_i و رویداد بازکردن ورودی اتم بلاک در زمان $bd_i + bs_i$ اجرا می‌شود. مشابه همین رویه می‌توان اوقات شرعی ایستگاه‌ها را به قطارها اعلام نمود. در ابتدای هر اجرای شبیه‌سازی برای هر ایستگاه، دو رویداد شامل اعلام زمان اذان و اعلام پایان بازه افق شرعی تولید می‌شود. برای این منظور، از سه خصیصه برای نمازهای صبح، ظهر–عصر و مغرب– عشاء استفاده شده است. مقدار هر این خصیصه‌ها در شروع افق شرعی مربوطه، برابر ۱ و در انتهای افق شرعی برابر ۰ می‌شود. بدین ترتیب بررسی می‌گردد که آیا امکان توقف قطارها در بازه افق شرعی ایستگاه‌ها بر اساس این ویژگی‌ها وجود دارد یا خیر. در مدل شبیه‌سازی زمان‌های ورود و خروج قطارها به اتم‌های ایستگاه و بلاک ثبت شده و

در نتیجه، برنامه زمان‌بندی بدست می‌آید. در هنگام اعزام یک قطار از یک ایستگاه، یکی از خطوط ایستگاه بعدی انتخاب می‌شود و قطار دیگری حق انتخاب یا ورود به آن را ندارد. قطارها در زمان اعزام تعیین شده از ایستگاه مبدأ، وارد صف انتظار خروج از ایستگاه می‌شوند. در هنگام ورود یک قطار به صف انتظار، وضعیت بلاک مقابل و خطوط ایستگاه بعدی و همچنین شرایط بن‌بست ترافیکی بررسی می‌شود. تا زمانی که تمام شرایط فوق برقرار نباشد، قطار در صف انتظار می‌ماند. در لحظه ورود به صف انتظار، در صورت عدم امکان اعزام یک قطار، بررسی شرایط اعزام قطارها، هر یک دقیقه یک‌بار مجدداً تکرار می‌شود. بعد از اعزام قطار از ایستگاه، قطار وارد اتم بلاک می‌شود و ورودی بلاک بسته می‌شود. با توجه به اینکه زمان اشغال شدن بلاک‌ها نباید بیشتر از زمان سیر قطارها باشد، در لحظه ورود قطار، یک رویداد برای خروج قطار از بلاک به فاصله زمان سیر بلاک، ساخته می‌شود. به دلیل رعایت شرایط ایمنی در حرکت قطارها، کانال ورودی بلاک یک دقیقه بعد از خروج قطار باز می‌شود. قطار بعد از خروج از بلاک وارد اتم تنظیم کننده سرفاصله زمانی می‌شود. با توجه به عدم امکان ورود همزمان قطارها به ایستگاه‌ها، اتم تنظیم‌کننده سرفاصله زمانی، وظیفه کنترل ورود (یا خروج) هم‌زمان قطارها به (از) ایستگاه‌ها را بر عهده دارد. در صورت ورود هم‌زمان چندین قطار به ایستگاه‌ها، یکی از قطارها بر حسب اولویت انتخاب شده و به اندازه ۱ دقیقه زمان سیر در بلاک افزایش خواهد یافت. بعد از خروج قطار از اتم تنظیم کننده سرفاصله زمانی، وارد اتم ایستگاه می‌شود. در هنگام ورود قطار به ایستگاه، در صورتی که این قطار ملزم به توقف در بازه افق شرعی بوده و هنوز در بازه افق شرعی فعلی توقفی نکرده باشد، شرایط توقف برای اقامه نماز در این ایستگاه بررسی می‌شود. برای توقف یک قطار در یک ایستگاه جهت اقامه نماز باید ایستگاه فوق دارای نمازخانه و حداقل یک سکوی آزاد بوده و زمان رسیدن قطار به ایستگاه فعلی نیز در بازه افق شرعی قرار بگیرد. در صورتی که شرایط لازم برای توقف قطار برقرار باشد، قطار در ایستگاه به اندازه زمان اقامه نماز توقف کرده و سپس وارد اتم تنظیم‌کننده سرفاصله زمانی می‌شود. در مدل شبیه‌سازی، ایستگاه توقف هر قطار برای اقامه نماز در بازه‌های افق شرعی، ترجیحاً در زودترین زمان ممکن (اولین ایستگاه) تعیین می‌شود. درصورتی‌که ایستگاه‌های بعدی نیز در بازه افق شرعی قرار بگیرد، مطابق شرایط ترافیک شبکه، برنامه توقف قطار و رعایت محدودیت سکو، سایر ایستگاه‌های مسیر نیز بررسی می‌شوند. در هنگام خروج قطار از اتم تنظیم‌کننده سرفاصله زمانی، خروج هم‌زمان قطارها بررسی شده و در صورت اعزام هم‌زمان چندین قطار، یکی از قطارها به اندازه ۱ دقیقه بیشتر در ایستگاه می‌ماند. قطارها بعد از خروج از اتم تنظیم کننده سرفاصله زمانی، وارد اتم صف انتظار می‌شوند. این فرآیند مجدداً تکرار می‌شود تا قطار به ایستگاه مقصد برسد. برای هر اتم در نرم‌افزار شبیه‌سازی ED یک لیست رویداد و مجموعه‌ای از ویژگی‌ها قابل‌تعریف است. رویدادهای اصلی در مدل شبیه‌سازی در جدول ۲، خلاصه شده است.

جدول ۲. رویدادها و نهاده‌های مدل شبیه‌سازی

نهاده (اتم)	رویداد ورود	رویداد خروج
قطار	• محاسبه کل زمان توقف غیربرنامه ای	• بروز رسانی شمارنده تعداد ایستگاه‌های عبوری
ایستگاه	• محاسبه زمان توقف در ایستگاه	• اعزام قطار به بلاک مقابل بر اساس مسیر قطار
بلاک	• بستن ورودی بلاک • تولید رویداد خروج از بلاک	• تولید رویداد بازکردن ورودی بلاک • اعزام قطار به اتم تنظیم کننده سرفاصله زمانی
صف انتظار	• ثبت زمان ورود قطار ورودی • بررسی شرایط اعزام قطار از ایستگاه	• رزرو خطوط ایستگاه بعدی جهت ورود
تنظیم‌کننده	• ایجاد تأخیر ۱ دقیقه‌ای در صورت هم‌زمانی ورود یا خروج	• تعیین شرایط توقف برای اقامه نماز در ایستگاه مقابل

سرفاصله زمانی	قطارها به ایستگاه • اعزام قطار به ایستگاه بعدی	

جدول ۳. تشریح وضعیت توقف یک قطار برای اقامه نماز در مدل شبیه‌سازی

مقدار att_j	تشریح وضعیت
۰	در این حالت، قطار فوق تاکنون توقفی برای اقامه نماز در بازه افق شرعی فعلی نداشته است ولی به محض رسیدن به اولین ایستگاه نمازخانه دار می‌بایست در صورت وجود شرایط مربوطه توقف کند.
۱	درصورتی‌که زمان اعزام قطار یک ساعت بعد از ابتدای زمان افق شرعی باشد، قطار فوق نیازی به توقف در بازه افق شرعی فعلی ندارد و مقدار att_j برابر ۱ خواهد شد. همچنین بعد از توقف جهت اقامه نماز در زمان خروج از ایستگاه، مقدار att_j برابر ۱ می‌شود.
۲	درصورتی‌که یک قطار به دلیل اشغال بودن سکوهای یک ایستگاه، نتواند جهت اقامه نماز توقف کند، مقدار att_j برابر ۲ می‌شود.
۳	این وضعیت زمانی رخ می دهد که شرایط توقف قطار برای اقامه نماز در ایستگاه پیش رو فراهم باشد و قطار بعد از خروج از اتم تنظیم کننده سرفاصله زمانی، در ایستگاه پیش رو برای اقامه نماز توقف کند.

مدل‌سازی محدودیت توقف قطارها برای اقامه نماز بر اساس مقدار یک خصیصه از اتم قطار انجام می‌شود. وضعیت توقف داشتن یا نداشتن برای هر قطار بر اساس مقدار یک خصیصه بنام att_j تعیین می‌شود. مقادیر این خصیصه در مجموعه $\{0,1,2,3\}$ تعریف می‌شود که بعد از عبور قطار از ایستگاه، مقدار این خصیصه به‌روزرسانی می‌شود (

جدول ۳). خروجی‌های مدل طراحی شده شامل برنامه حرکت قطارها و همچنین گراف ایستگاه–زمان است. ریز برنامه قطارها شامل زمان‌های ورود و خروج از هر ایستگاه و علت توقف قطارها (سبقت، تلاقی، نماز و سایر موارد) است. در مدل شبیه‌سازی امکان تغییر زمان اعزام قطارها و تولید برنامه زمان‌بندی جدید، توسعه شبکه ریلی و اضافه کردن خطوط ریلی، مسیر یا تعریف ایستگاه جدید توسط کاربر وجود دارد. به کمک ابزار نمایش دوبعدی نرم‌افزار می‌توان جزئیات حرکت قطارها در مدل شبیه‌سازی را در طی اجرا مشاهده و نقاط گلوگاهی شبکه را شناسایی نمود. مهم‌ترین ویژگی سیستم پیشنهادی این است که از آن می‌توان برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی یکپارچه قطارهای شبکه ریلی کشور استفاده نمود.

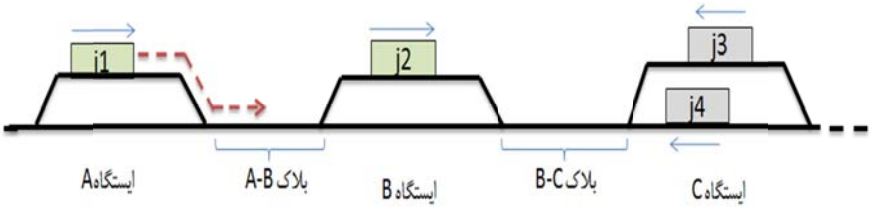
با توجه به اینکه یکی از مشکلات اصلی شرکت راه‌آهن در تهیه یک گراف یکپارچه در کل شبکه ریلی است، مدل پیشنهادی قابلیت تهیه برنامه‌ریزی قطارها در کل شبکه ریلی تعریف شده را داراست. مدل شبیه‌سازی در این تحقیق دارای شباهت‌ها و تفاوت‌هایی نیز با نرم‌افزار SIMONE است. هر دو مدل شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار ED و به صورت یک مدل شیءگرا طراحی شده‌اند. مدل شبیه‌سازی در این تحقیق با بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی، قابلیت تولید برنامه‌های زمان‌بندی نزدیک به بهینه را داراست. درحالی که نرم‌افزار SIMONE برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی موجه در یک شبکه ریلی، طراحی نشده است و ورودی آن یک برنامه زمان‌بندی است. نرم‌افزار SIMONE برای تجزیه‌وتحلیل یک برنامه زمان‌بندی و تعیین درجه استواری آن نسبت به تغییرات احتمالی و اغتشاشات تصادفی، طراحی شده است. اما مدل شبیه‌سازی در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی قطعی است و از آن برای تولید برنامه زمان‌بندی نزدیک به بهینه استفاده می‌شود.

۵–بن‌بست ترافیکی

وضعیت بن‌بست و قطع جریان ترافیکی قطارها به دلیل محدودیت ظرفیت خطوط ریلی رخ می‌دهد. در حالت بن‌بست ترافیکی، قطارهای یک جهت به واسطه وجود قطارهای دیگری که در مسیر مقابل حرکت می‌کنند، امکان خروج از ایستگاه را ندارند. قفل شدن جریان حرکت قطارها، به دلیل اشغال شدن ظرفیت ایستگاه‌های مقابل توسط قطارهای غیر هم جهت رخ می‌دهد. بدین ترتیب، یک سلسله از درخواست های تناوبی انتظار برای اعزام قطارها تشکیل شده و قطارهای یک

جهت به واسطه قطارهای جهت دیگر و بالعکس، قادر به حرکت نیستند. حالت بن‌بست پردازش عملیات در علوم کامپیوتر نیز کاملاً شناخت شده و حالت بن‌بست جریان تولید در سیستم‌های کارگاهی در حالت وجود محدودیت ظرفیت بین مراحل نیز در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [Valkenaers and Brussel, 2003]. شرایط بن‌بست ترافیکی در زمان‌بندی لحظه‌ای قطارها و شرایط عملیاتی رخ داده و اداره کنترل هر ناحیه از شبکه ریلی، ملزم به جلوگیری از آن است. وضعیت بن‌بست ترافیکی در مدل‌های شبیه‌سازی نیز رخ می‌دهند چراکه این مدل‌ها نیز نمونه‌ای از حرکت قطارها را در شبکه‌های ریلی، شبیه‌سازی می‌کنند. در نتیجه، سیستم‌های شبیه‌سازی حرکت قطارها باید روشی برای جلوگیری از وقوع بن‌بست ترافیکی داشته باشند. در سیستم‌های شبیه‌سازی باید تعداد رخدادهای بن‌بست ترافیکی در حداقل مقدار خود قرار داشته باشد. احتمال رخداد یک وضعیت بن‌بست ترافیکی، بستگی به نوع خطوط ریلی و ظرفیت ایستگاه‌ها دارد. در نقاط گلوگاهی شبکه و یا بخشی‌هایی که حجم ترافیک بالایی از قطارها در آن وجود دارد، احتمال رخداد بن‌بست ترافیکی بیشتر است. در این تحقیق، دو وضعیت برای بن‌بست ترافیکی در نظر گرفته می‌شود. در وضعیت اول که به آن بن‌بست ترافیکی بالقوه گفته می‌شود، حرکت قطارها تا لحظه فعلی منجر به قطع جریان حرکت قطارها نشده است اما این امکان وجود دارد که با اعزام یک قطار، بن‌بست ترافیکی از حالت بالقوه به حالت بالفعل تبدیل شود. حالت بن‌بست ترافیکی بالفعل نیز زمانی رخ می‌دهد که جریان حرکت قطارها واقعاً مختل شده است. برای جلوگیری از وقوع بن‌بست ترافیکی باید ابتدا آن را شناسایی نموده و روشی برای رفع آن پیشنهاد داد که با کمترین زمان تأخیر قطارها و بیشترین استفاده از ظرفیت شبکه همراه باشد. در این تحقیق، هدف شناسایی حالت بن‌بست ترافیکی بالقوه است. برای تشخیص حالت بن‌بست ترافیکی بالقوه، نیازی به کنترل وضعیت حرکت قطارها بطور پیوسته نیست و کافی است در زمان اعزام قطارها از ایستگاه‌ها، شرایط رخداد بن‌بست ترافیکی بررسی شود. رفع بن‌بست ترافیکی می‌تواند با تغییر توالی ورود قطارها به بلاک‌ها، افزایش زمان‌های توقف در ایستگاه‌ها و یا تغییر برنامه اعزام و توقف قطارها انجام شود. به عنوان مثال در

شکل ، یک وضعیت بن‌بست ترافیکی بالقوه نشان داده شده است. در این مثال، اگر قطار j_1 وارد بلاک A-B شود، حالت بن‌بست ترافیکی بالقوه به حالت بالفعل تبدیل می‌شود. چرا که ظرفیت دو ایستگاه A و B بطور کامل پر شده و امکان حرکت قطارها وجود ندارد. در این مثال، برای رفع حالت بن‌بست ترافیکی، می‌بایست قطارهای j_3 یا j_4 زودتر از قطار j_1 اعزام شده و زودتر از قطار j_1 ، خط آزاد ایستگاه B را جهت ورود انتخاب کند.



شکل ۵. یک وضعیت ساده برای رخداد بن‌بست ترافیکی در مسیر تک خطه ریلی

تاکنون روش‌های مختلفی برای رفع حالت بن‌بست ترافیکی برای سیستم‌های شبیه‌سازی حرکت قطارها ارائه شده است. پترسون و تیلور [Petersen and Taylor, 1983] یک مدل شبیه‌سازی و روشی برای رفع حالت بن‌بست ترافیکی توسعه داده‌اند. میلز و پادنی نیز [Mills and Pudney, 2003] مسئله رفع بن‌بست ترافیکی را در مدل شبیه‌سازی برای خطوط ریلی

تک خطه مطالعه نموده‌اند. آن‌ها الگوریتم پترسون و تیلور را توسعه داده و روشی به نام برچسب‌گذاری را ارائه نموده‌اند. روش‌های دیگری مانند روش تحلیل آثار حرکت (MCA) و روش انتخاب پویای مسیر (DRR) نیز برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها ارائه شده است [Cui, 2010]. بکارگیری روش‌های موجود در پیشینه تحقیق، مطابق قوانین حرکت قطارها در راه‌آهن ایران نیست و لذا در این تحقیق، روشی جدید و مطابق با قوانین راه‌آهن ایران جهت رفع بن‌بست ترافیکی ارائه شده است. در ادامه به تشریح این روش برای رفع بن‌بست ترافیکی پرداخته می‌شود.

رویکرد پیشنهادی برای رفع بن‌بست ترافیکی در مدل شبیه‌سازی

در این بخش ایده روش پیشنهادی برای رفع بن‌بست ترافیکی بیان می‌شود. این روش بر اساس قوانین شبکه ریلی ایران و نیازمندی‌های مربوطه توسعه داده شده و در شرایط عملیاتی برای زمان‌بندی لحظه‌ای قطارها در دنیای واقعی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. ایده روش پیشنهادی در این است که در هنگام ورود یک قطار به یک بلاک، جریان برای حرکت قطارهای مسیر مخالف بسته نشود. گام اول شناسایی وضعیت بن‌بست ترافیکی بالقوه در مدل شبیه‌سازی است. اگر با اعزام قطاری به بلاک و انتخاب یکی از خطوط ایستگاه بعدی، تعداد خطوط آزاد دارای سکو در ایستگاه بعدی حداقل برابر با یک باشد، آنگاه مشکلی برای جریان قطارهای خلاف جهت پیش نخواهد آمد و لذا شرایط بن‌بست ترافیکی بالقوه برقرار نیست. همچنین اگر با اعزام قطاری به بلاک و انتخاب یکی از خطوط ایستگاه بعدی، کل خطوط ایستگاه بعدی اشغال شود و حداقل یک قطار غیرهم جهت در ایستگاه بعدی قرار داشته باشد، باز هم شرایط بن‌بست ترافیکی بالقوه برقرار نیست، چراکه تمام ظرفیت ایستگاه توسط قطارهای هم‌جهت اشغال نشده است. در نتیجه اگر با اعزام قطاری به بلاک و انتخاب یکی از خطوط ایستگاه بعدی، کل خطوط آن ایستگاه (ظرفیت ایستگاه) بطور کامل توسط قطارهای هم‌جهت اشغال شده باشد، آنگاه وضعیت بن‌بست ترافیکی بالقوه وجود دارد. در این حالت، تا زمانی که وضعیت بن‌بست ترافیکی بالقوه برقرار است، اجازه ورود قطار به بلاک مقابل صادر نمی‌شود. بررسی تمام شرایط فوق در روش پیشنهادی برای رفع بن‌بست ترافیکی در داخل اتم صف انتظار ایستگاه کدنویسی شده است. زمان اضافی ناشی از توقف بدلیل شرایط بن‌بست ترافیکی، به عنوان توقف غیربرنامه‌ای نوع دوم در تابع هدف جواب‌ها در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، رویکرد پیشنهادی بعد از شناسایی حالت بن‌بست ترافیکی بالقوه، از طریق افزایش زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها قادر به جلوگیری از تبدیل شدن آن به حالت بن‌بست ترافیکی است.

٦-شیوه نمایش جواب

متغیر تصمیم مسئله در مدل بهینه‌سازی، زمان اعزام هر قطار از ایستگاه مبدأ است. زمان اعزام قطارها در یک بازه مشخص (معمولاً یک ساعت) در فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای ($step=5$) صورت می‌گیرد. برای نمایش جواب، از یک رشته nتایی شامل زمان اعزام قطارها استفاده شده که n تعداد کل قطارها است. یک جواب از مسئله با یک رشته از اعداد صحیح $S_i=[d_1, d_2, d_3,\ldots,d_n]$ قابل نمایش است. زمان اعزام اولیه قطار jام (d_j^I) و بازه زمانی مجاز برای اعزام نیز در محدوده $[d_j^{\min}, d_j^{\max}]$ تعریف می‌شود. در هر بار اجرای شبیه‌سازی، یک برنامه از اعزام قطارها در مدل شبیه‌سازی، آزمایش می‌شود. در پایان شبیه‌سازی، مقدار تابع برازش جواب فعلی، محاسبه شده و در تکرار بعدی از شبیه‌سازی، یک برنامه زمان‌بندی دیگر که زمان اعزام قطارها در آن بر اساس الگوریتم اتصال مسیر تکاملی تغییر یافته است، در مدل شبیه‌سازی اجرا می‌شود. مقدار تابع برازش (F) از رابطه (۱) بدست می‌آید که در آن مقادیر C_{ij} و T_{ij} به ترتیب زمان توقف غیربرنامه ای نوع اول و دوم قطار jام در ایستگاه iام است.

(۱)

$$F = \lambda.\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m_j} T_{ij} + (1-\lambda).\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m_j} C_{ij} + \sigma.\sum_{p=1}^{K}\sum_{j=1}^{n} pen_{pj}$$

ضریب $0 \le \lambda \le 1$ نیز تعیین کننده مقدار اهمیت هر یک زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای نوع اول و دوم است. مطابق قوانین ریلی راه‌آهن ایران، اهمیت زمان‌های توقف غیربرنامه ای نوع دوم به مراتب بیشتر از زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای نوع اول است. ضریب σ مقدار جریمه به ازای غیرموجه شدن برنامه توقف یک قطار در یک بازه افق شرعی است. برای این منظور، متغیر $pen_{pj} \in \{0,1\}$ تعیین می‌کند که آیا قطار jام در

بازه افق شرعی pام، برنامه توقف غیرموجهی داشته است یا خیر. غیرموجه بودن برنامه توقف یک قطار در بازه افق شرعی به این معنا است که با توجه به اوقات شرعی ایستگاه‌ها، هیچ ایستگاهی در مسیر وجود نداشته باشد که کل زمان توقف قطار بطور کامل در بازه افق شرعی قرار بگیرد.

الگوریتم فراابتکاری اتصال مسیر تکاملی (EPR)

الگوریتم فراابتکاری اتصال مسیر، توسط گلاور [Glover, 1999] به عنوان یک استراتژی تقویت‌سازی جستجوی فضای جواب بین دو جواب خوب، معرفی شده است. این الگوریتم از دو جواب x و y به عنوان ورودی استفاده می‌کند. به x جواب اصلی (پایه) و به y جواب هدف، گفته می‌شود. در این روش، دنباله‌ای از جواب‌ها بین دو جواب x و y ایجاد می‌شود. در هر گام با تغییر کوچکی در ساختار جواب x، جوابی که خصوصیات مشترک بیشتری یا بعبارتی فاصله کمتری با جواب y دارد، تولید می‌شود. در حین تبدیل جواب x به y، جواب‌های میانی دیگری بدست می‌آیند که ممکن است بهتر از جواب‌های x و y باشند. بعد از مشخص شدن جواب‌های x و y، مجموعه $\Delta(x,y)$ که شامل عناصر غیرمشترک این دو جواب است، تشکیل می‌شود. این مجموعه شامل گام‌های لازم برای رسیدن از جواب x به جواب y است. در حرکت از جواب x به سمت y، خصوصیات مشترک آن‌ها بدون تغییر باقی می‌مانند. الگوریتم از جواب اولیه x شروع می‌شود و در هر تکرار، بهترین حرکت در مجموعه $\Delta(x,y)$ که تاکنون مورداستفاده قرار نگرفته است، انجام می‌شود. این مراحل تا زمانی که به جواب y برسیم ادامه می‌یابد. در نهایت بهترین جواب بدست آمده، خروجی الگوریتم اتصال مسیر است. انواع استراتژی حرکت بین جواب اولیه و جواب هدف شامل اتصال مسیر روبه جلو، رو به عقب، ترکیبی، منقطع و حریصانه– تصادفی هستند [Ribeiro and Resende, 2012]. تفاوت این روش‌ها در تغییر نقش جواب اولیه و جواب هدف و همچنین جهت حرکت بین این دو جواب است. در الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق از استراتژی حرکت روبه‌جلو استفاده می‌شود. در این روش، حرکت از سمت جواب اولیه x شروع شده و به تدریج خصوصیات مشترک این جواب با جواب هدف y بیشتر می‌شود. روش اتصال مسیر تکاملی توسط آندارد و رزند [Andrade and Resende, 2007] به عنوان گام تقویت‌سازی جستجو، استفاده شده است. رزند و همکاران [Resende (et al.), 2010] نیز از این روش برای حل مسئله بیشترین پراکندگی استفاده کرده‌اند. ویژگی الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و جستجوی پراکنده، شامل جستجوی فضای مسئله و تکامل و بهبود جمعیت جواب‌ها می‌باشد. جمعیت دوره بعدی از طریق تولید جواب‌هایی که از ترکیب جواب‌های جمعیت قبلی بدست می‌آیند، بهبود و تکامل می‌یابد. در طی فرآیند تکامل، یک سری از جمعیت جواب P_0، P_1، P_2 و ... با اندازه ثابت تشکیل می‌شوند. مجموعه بهترین جواب‌های که تاکنون بدست آمده اند، جمعیت جواب‌های مرجع یا منتخب (ES) را تشکیل می‌دهند. در گام kام از روش اتصال مسیر تکاملی، الگوریتم اتصال مسیر برای یک جفت از جواب‌های مجموعه ES انجام شده و جواب حاصل برای ورود به جمعیت k+1ام ارزیابی می‌شود. تکامل جمعیت جواب بر اساس معیارهای کیفیت و متفاوت بودن جواب‌ها انجام می‌شود. به عبارتی همواره سعی می‌شود در مجموعه ES جواب‌های با کیفیت خوب که از یکدیگر متفاوت هستند، نگهداری شوند. در ادامه، گام‌های الگوریتم اتصال مسیر تکاملی برای حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها تشریح می‌شود (

شکل). الگوریتم پیشنهادی با تولید K جواب اولیه تصادفی آغاز می‌شود. این جواب‌ها در داخل مدل شبیه‌سازی اجرا شده تا مقدار تابع برازش هر یک تعیین شود. تولید تصادفی زمان اعزام قطارها در تلرانس زمانی حرکت از مبدا صورت می‌گیرد. پس از تولید جواب‌های اولیه، به تعداد pop-size جواب که دارای کمترین مقدار تابع هدف باشند، انتخاب شده و به عنوان جمعیت اولیه (P_0) وارد مجموعه ES می شوند. در گام‌های بعدی، دو جواب x_1 و x_2 به شکل تصادفی از مجموعه ES انتخاب شده و الگوریتم اتصال مسیر برای آن انجام می‌شود.

جواب حاصل از الگوریتم اتصال مسیر برای ورود به مجموعه ES ارزیابی شده و جمعیت ES بروز رسانی می‌شود.
یک جواب کاندید، در صورتی که یکی از شرایط زیر برقرار باشد، وارد مجموعه مرجع می‌شود:

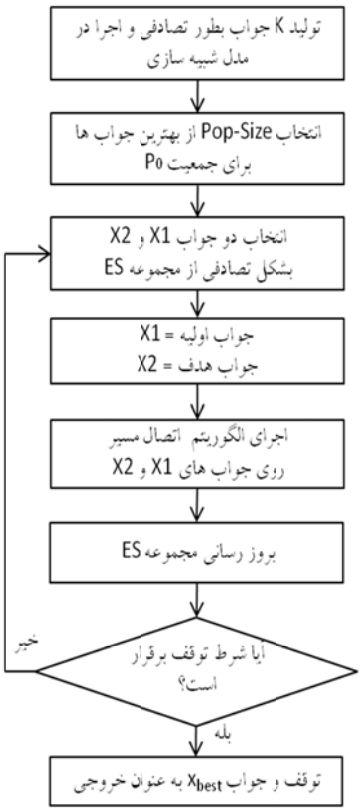
۱. این جواب بهتر از تمام جواب‌های موجود در مجموعه مرجع باشد.
۲. مقدار تابع هدف این جواب بین مقدار تابع هدف بهترین و بدترین جواب در مجموعه مرجع باشد و همچنین فاصله بین این جواب و هر جواب دیگری در مجموعه مرجع بزرگ‌تر از یک مقدار مشخص باشد.

جواب کاندید برای ورود به مجموعه مرجع، باید جایگزین یکی از جواب‌های مجموعه مرجع مانند w شود. جواب w نباید بهتر از جواب کاندید باشد و همچنین باید کمترین فاصله (بیشترین شباهت) را نسبت به این جواب در مقایسه با دیگر جواب‌های مجموعه مرجع داشته باشد. برای تعیین متفاوت بودن دو جواب، باید معیاری از فاصله بین دو جواب تعریف شود. فاصله بین دو جواب x_1 و x_2 با نماد $d(x_1,x_2)$ نشان می‌دهیم که از رابطه (۲) به دست می‌آید. همواره سعی می‌شود در مجموعه مرجع، جواب‌های خوب که به اندازه کافی متفاوت از هم هستند، جمع‌آوری شوند. در این رابطه، منظور از t_j^x زمان اعزام قطار jام در جواب x است.
در رابطه ۲ مشاهده می‌شود.

$$d(x_1, x_2) = \sum_{j=1}^{n} |t_j^{x_1} - t_j^{x_2}| \quad (۲)$$

استراتژی حرکت روبه‌جلو و تولید جواب‌های میانی در الگوریتم اتصال مسیر بین دو جواب x_1 و x_2، با یک مثال تشریح می‌شود. به عنوان مثال، مسئله‌ای با ۷ قطار و دو جواب x_1=[160,210,140,235,340,430,450] و x_2=[150,210,140,240,330,435,455] برای الگوریتم اتصال مسیر در نظر گرفته شده است.

جواب x_1، جواب اولیه و جواب x_2 ، جواب هدف می‌باشد. باتوجه به اینکه زمان اعزام قطارها در فواصل ۵ دقیقه‌ای (مانند ۴:۲۰، ۴:۲۵، ۴:۳۰ و ...) می‌باشد، لذا فضای جواب بین دو جواب x_1 و x_2 محدود به این حالات می‌شود. در مرحله اول، ۹ جواب میانی (S_1 الی S_9) تولید می‌شوند (شکل). هر یک از این جواب‌ها با تغییر زمان اعزام یکی از قطارها در جهت کمتر شدن فاصله بین جواب‌های x_1 و x_2 تولید شده‌اند. اگر فرض شود که بهترین جواب در بین جواب‌های S_1 الی S_9، جواب S_4 باشد، آنگاه در تکرار بعدی از الگوریتم، از این جواب برای رسیدن به جواب هدف استفاده می‌شود. این مراحل تا رسیدن کامل به جواب x_2 ادامه می‌یابد. در نهایت بهترین جواب بدست آمده به عنوان خروجی الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.



شکل ٦. گام‌های الگوریتم اتصال مسیر تکاملی برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها

شکل ۷. مراحل الگوریتم اتصال مسیر برای جواب‌های x_1 و x_2

جدول ٤. اطلاعات ورودی مثال عددی

شماره قطار	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰
کلاس سرعت (km)	۱۵۰	۱۵۰	۱۱۵	۱۱۵	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۱۰
زمان اعزام اولیه	۱۲:۰۰	۱۳:۰۰	۱۲:۰۰	۱۳:۰۰	۱۳:۰۰	۱٤:۰۰	۱٤:۰۰	۱۵:۰۰	۱۵:۵۰	۱٦:۱۵
شماره قطار	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤	۱۵	۱٦	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
کلاس سرعت (km)	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
زمان اعزام اولیه	۱۱:۰۰	۱۱:۲۰	۱۷:۰۰	۱٤:۳۰	۱٤:۲۵	۱۲:۱۵	۱٤:٤۵	۱٦:۲۰	۱۷:۱۰	۱۳:۳۰

۷-حل مثال عددی

برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی، از یک مثال عددی استفاده می‌شود. در این مثال تعداد ۱۰ قطار رفت و ۱۰ قطار برگشت در مسیری ترکیبی تک خطه-دوخطه با ۲۱ ایستگاه زمان‌بندی می‌شوند. بلاک‌های بین ایستگاه‌های ۳ و ۵ دوخطه و سایر بلاک‌ها تک خطه می‌باشند. قطارهای با شماره فرد در یک‌جهت و قطارهای با کد زوج در جهت دیگر حرکت می‌کنند (

جدول ۴). زمان‌های سیر قطارها بر اساس کلاس‌های سرعت تعیین می‌شود. زمان توقف برنامه‌ای قطارهای ۱ الی ٤ در ایستگاه‌های مسیر در جدول ۵ خلاصه شده است. برای سایر قطارها زمان‌های توقف برنامه‌ای در تمامی ایستگاه‌ها برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. مجموعه ایستگاه‌های دارای نمازخانه علاوه بر ایستگاه‌های مبدأ و مقصد (۱و ۲۱) شامل ایستگاه‌های ۵، ۷، ۸، ۱۱، ۱۳ و ۱٦ است. اطلاعات افق شرعی و خطوط ایستگاه‌ها در جدول ۵، آمده است. زمان اعزام پیشنهادی قطارها با تلرانس های زمانی ۳۰± ، ٦۰± و ۱۲۰± دقیقه در مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. قطارها با توجه به زمان اعزام، در بازه‌های افق شرعی توقف کرده و زمان توقف برای اقامه نماز ۲۰ دقیقه منظور شده است. در تمامی مسائل حل شده، مقدار ضریب جریمه $\sigma = 50min$ در نظر گرفته می‌شود. با توجه قوانین رفع بن‌بست ترافیکی که در مدل شبیه‌سازی پیاده شده است، تمام اجراهای مدل شبیه‌سازی معتبر می باشند.

برای آزمایش نتایج الگوریتم فراابتکاری به ازای پارامترهای مختلف، ۹ سناریو مطابق جدول طراحی شده است. در هر سناریو، الگوریتم فراابتکاری برای زمان ۳۰ دقیقه اجرا شده و بهترین جواب بدست آمده ثبت شده است. سناریوها به ترتیب افزایش تلرانس زمانی اعزام قطارها از مبدأ، مرتب شده‌اند. همچنین متناسب با افزایش تلرانس زمانی اعزام قطارها در هر سناریو، جمعیت اولیه و جمعیت مجموعه مرجع انتخاب شده است. در مسئله مورد بررسی، تعداد حالت‌های ممکن برای اعزام قطار jام برابر با $a_j = \left\lfloor \frac{d_j^{\max} - d_j^{\min}}{step} \right\rfloor$ است. در نتیجه تعداد کل حالات اعزام قطارها برابر $\prod_{i=1}^{n} a_i$ است. اگر تعداد کل ایستگاه‌های دارای نمازخانه در شبکه را با نماد L نشان دهیم، آنگاه با توجه به اینکه هر قطار در H بازه افق شرعی، باید برای اقامه نماز مسافرین توقف کند، حداکثر تعداد حالات توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی، برابر $L^{H.n}$ خواهد بود. در نتیجه حداکثر تعداد برنامه‌های زمان‌بندی شدنی بر حسب پارامترهای مسئله برابر $L^{H.n}.\prod_{i=1}^{n} a_i$ است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد قطارها پیچیدگی محاسباتی مسئله بصورت نمایی رشد یافته و مسئله در حالت NP-Hard قرار می گیرد. مطابق نتایج بدست آمده در

جدول ، با افزایش تلرانس زمانی اعزام قطارها، الگوریتم فراابتکاری جواب‌های بهتری تولید نموده است. همچنین انتخاب مقدار $\lambda = 0.7$ در همگرایی الگوریتم به سمت جواب مطلوب، تاثیر بهتری داشته است. مطابق نتایج بدست آمده و بر اساس اهمیت هر یک از توقف‌های غیربرنامه‌ای، سناریوهای ۵،۱ و ۸ (در هر دسته از تلرانس‌های زمانی) از مطلوبیت بیشتری برخوردار هستند. گراف حرکت بهترین جواب بدست آمده در این سه سناریو به ترتیب در شکل های ۸ الی ۱۰ رسم شده است. در سناریو ۱، بدلیل فشرده بودن برنامه زمانبندی، همانطور که پیش بینی می شد، یک سبقت بین قطارهای ۲ و ۱٦ رخ داده است. اما در سناریوهای ۵ و ۸ بدلیل افزایش بازه تلرانس حرکت قطارها، سبقت دیده نمی‌شود.

مطالعه موردی

مسیر تهران- رازی جهت ارزیابی الگوریتم فراابتکاری به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این محور شامل ٥٦ ایستگاه، ٥٥ بلاک و ٤٦ قطار رفت و برگشت است. اطلاعات ایستگاه‌های دارای نمازخانه و اوقات شرعی بر اساس اطلاعات بازه مسافرتی نوروز (۱۵ اسفند ۱۳۹۰ الی ۱۵ فروردین ۱۳۹۱)، در داخل نرم‌افزار قرار داده شده است. اطلاعات زمان‌های سیر قطارها در بلاک‌ها، زمان‌های توقف برنامه‌ای قطارها در ایستگاه‌ها و تعداد خطوط و سکوهای ایستگاه‌های مسیر با توجه به اطلاعات گرفته شده از راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، در داخل مدل شبیه‌سازی وارد شده است. زمان اعزام پیشنهادی قطارها با تلرانس زمانی ±٦۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. در تمامی مسائل حل شده، مقدار ضریب جریمه $\sigma = 50min$ در نظر گرفته می‌شود. برای برنامه‌نویسی الگوریتم فراابتکاری از زبان 4DScript در محیط نرم‌افزار ED، و برای اجرای مدل شبیه‌سازی از رایانه‌ای با سیستم عامل ویندوز ۷، حافظه ٤ گیگابایت و پردازشگر۳/۳ گیگاهرتز استفاده شده است. نتایج حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در مسیر تهران- رازی به ازای پارامترهای مختلف در جدول ، خلاصه شده است.

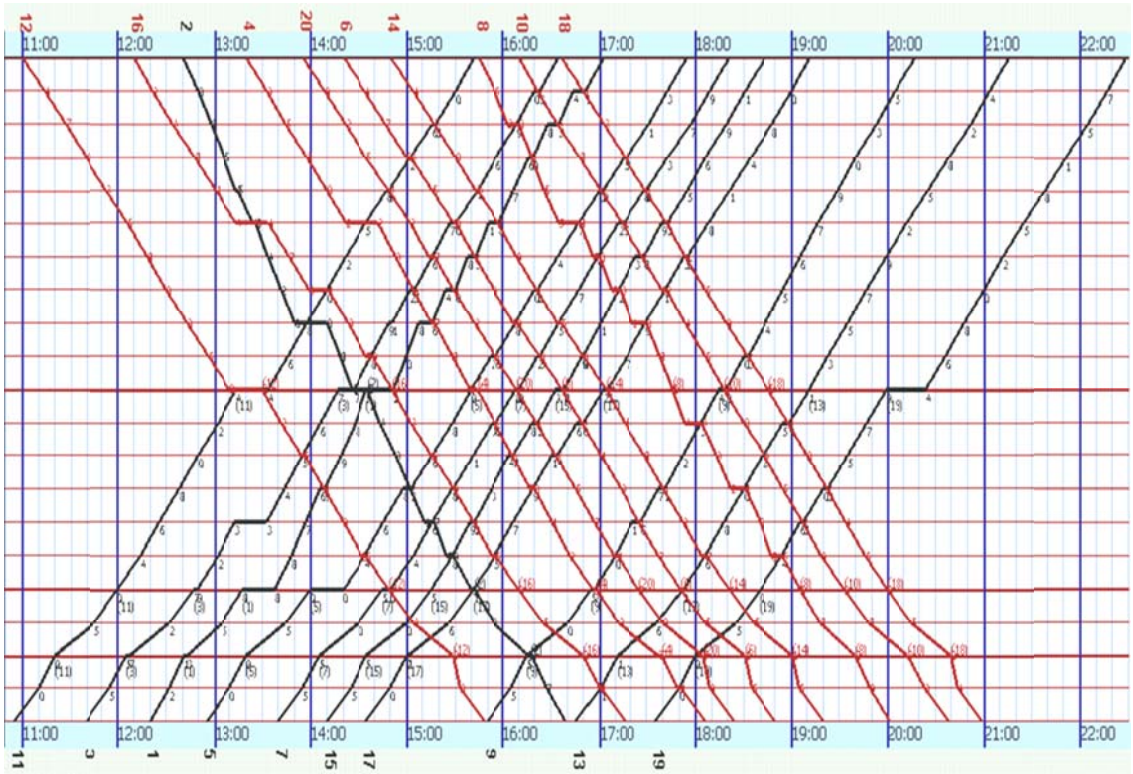
جدول ۵. زمان‌های توقف برنامه‌ای و اطلاعات زیرساخت ایستگاه‌ها

شماره ایستگاه	زمان توقف برنامه‌ای (دقیقه)	تعداد کل خطوط	تعداد سکوها	زمان اذان ظهر	انتهای بازه مجاز توقف قطارها	زمان اذان مغرب	انتهای بازه مجاز توقف قطارها
۱	۰	۲	۲	۱۳:۰۰	۱٤:۳۰	۱۹:۵۰	۲۱:۲۰
۲	۰	۲	۱	–	–	–	–
۳	۲	۲	۲	–	–	–	–
٤	۰	۲	۲	–	–	–	–
۵	۲	۲	۲	۱۳:۰۰	۱٤:۳۰	۱۹:۵۰	۲۱:۲۰
٦	۰	۲	۱	–	–	–	–
۷	۰	۲	۱	۱۳:۰۰	۱٤:۳۰	۱۹:۵۰	۲۱:۲۰
۸	۰	۲	۱	۱۳:۰۰	۱٤:۳۰	۱۹:۵۰	۲۱:۲۰
۹	۰	۲	۱	–	–	–	–
۱۰	۰	۳	۱	–	–	–	–
۱۱	۵	۳	۲	۱۳:۰۵	۱٤:۳۰	۱۹:۵۵	۲۱:۲۰
۱۲	۰	۳	۱	–	–	–	–
۱۳	۲	۳	۱	۱۳:۰۵	۱٤:۳۰	۱۹:۵۵	۲۱:۲۰
۱٤	۰	۳	۱	–	–	–	–
۱۵	۰	۳	۱	–	–	–	–
۱٦	۲	۳	۱	۱۳:۰۵	۱٤:۳۰	۱۹:۵۵	۲۱:۲۰
۱۷	۰	۳	۱	–	–	–	–
۱۸	۰	۳	۱	–	–	–	–
۱۹	۰	۳	۱	–	–	–	–

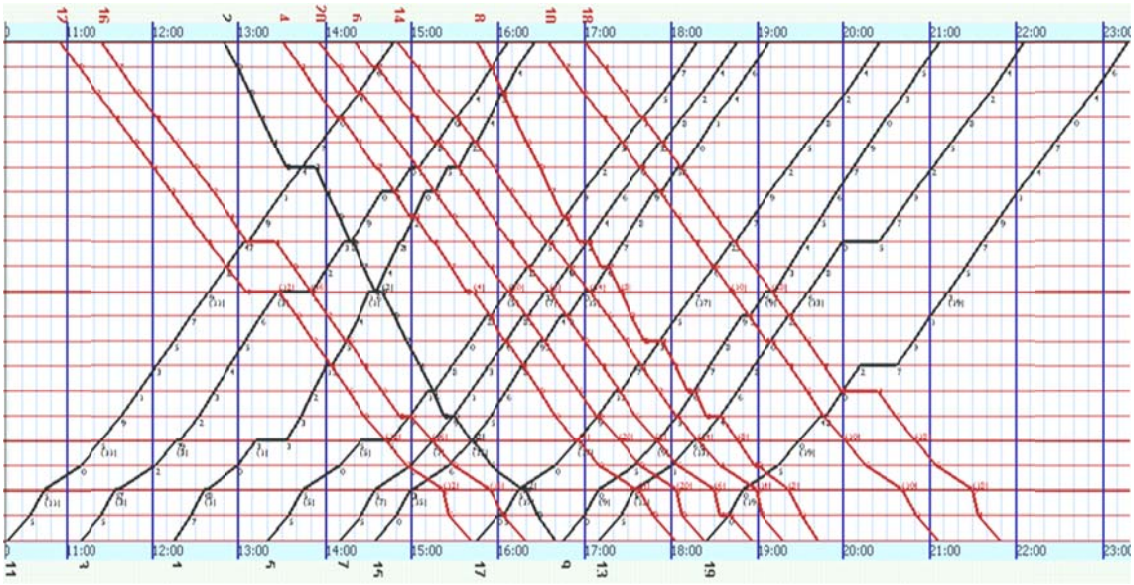
۲۰	۰	۳	۱	–	–	–	–
۲۱	۰	۳	۱	۱۳:۱۰	۱٤:۳۰	۲۰:۰۰	۲۱:۲۰

جدول ۷. تحلیل حساسیت مدل بهینه‌سازی

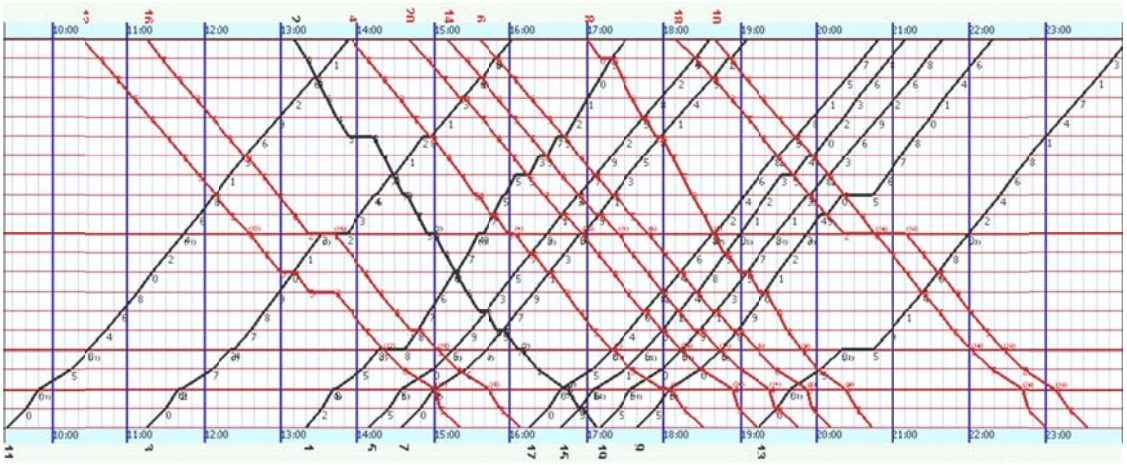
سناریو	تلرانس اعزام	λ	K	Pop-Size	$F(x_{best})$ (دقیقه)	جمع زمان های توقف غیربرنامه ای نوع اول (ساعت)	جمع زمان های توقف غیربرنامه ای نوع دوم (دقیقه)
۱	**±۳۰**	**۰۹**	**۳۰۰**	**۱۰**	**٦۲**	**۱۰.۰۳**	**۲**
۲	±۳۰	۰.۷	۳۰۰	۲۰	۱۹۰	۱۰.۰۱	۱٤
۳	±۳۰	۰.۵	۳۰۰	۳۰	۲۹۱	۹.۱۱	۳۵
٤	±٦۰	۰۹	۵۰۰	۱۰	٦۰	۹.۷	۲
۵	**±٦۰**	**۰.۷**	**۵۰۰**	**۲۰**	**۱٤٤**	**۷.۸٤**	**٤**
٦	±٦۰	۰.۵	۵۰۰	۳۰	۲۷٦	۸.٦۸	۳۱
۷	±۱۲۰	۰۹	۱۰۰۰	۱۰	۵۱	۸.۵	۰
۸	**±۱۲۰**	**۰.۷**	**۱۰۰۰**	**۲۰**	**۱۲٤**	**٦.۷۷**	**۳**
۹	±۱۲۰	۰.۵	۱۰۰۰	۳۰	۲۱٦	۷.۱	٦



شکل ۵. گراف حرکت قطارها در سناریوی ۱



شکل ٦. گراف حرکت قطارها در سناریوی ٥

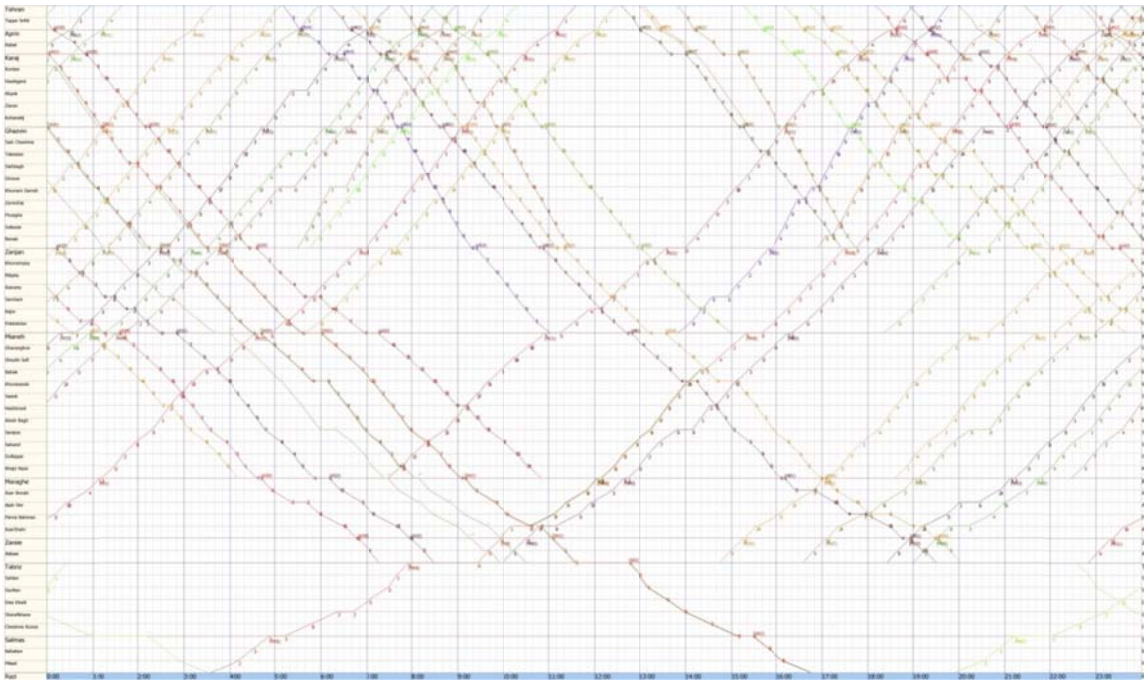


شکل ۷. گراف حرکت قطارها در سناریوی ۸

جدول ۸. نتایج حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها در مسیر تهران- رازی

سناریو	λ	K	Pop-Size	$F(x_{best})$ (دقیقه)	جمع زمان های توقف غیربرنامه ای نوع اول (دقیقه)	جمع زمان های توقف غیربرنامه ای نوع دوم (دقیقه)	درصد بهبود زمان های توقف غیربرنامه‌ای نوع اول	درصد بهبود زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای نوع دوم
۱	۰.۹	۲۰۰۰	۳۰	۱۰۷	۱۰۵۲	۲	-٪۲.۱٤	٪۹۳.۳۳
۲	۰.۹	۲۰۰۰	۲۰	۱۱۹	۱۱۰۰	۱۰	-٪٦.۸۰	٪٦٦.٦۷
۳	**۰.۹**	**۲۰۰۰**	**۱۰**	**۹۷**	**۹۷۰**	**۰**	**٪۵.۸۳**	**٪۱۰۰.۰۰**
٤	۰.۸	۱۰۰۰	۱۰	۱۹٤	۹۵۰	۵	٪۷.۷۷	٪۸۳.۳۳
۵	۰.۸	۳۰۰۰	۳۰	۲۲۵	۱۰۸۹	۹	-٪۵.۷۳	٪۷۰.۰۰
٦	**۰.۷**	**۲۰۰۰**	**۲۰**	**۲۸۸**	**۹۱۱**	**۲۱**	**٪۱۱.۵۵**	**٪۳۰.۰۰**
۷	۰.۷	۱۰۰	۱۰	۳۷۸	۱۱٤۸	٤۸	-٪۱۱.٤٦	-٪٦۰.۰۰
۸	۰.۵	۲۰۰۰	۲۰	٤۷۱	۹۰۰	٤۲	٪۱۲.٦۲	-٪٤۰.۰۰
۹	۰.٦	۱۰۰۰	۳۰	٤۷۵	۱۱۲۳	٤۳	-٪۹.۰۳	-٪٤۳.۳۳

زمان حل برای تمامی سناریوها برابر با ۲ ساعت در نظر گرفته شده است. در بهترین گراف تهیه شده بصورت دستی در شرکت راه‌آهن ۱۰۳۰ دقیقه توقف غیربرنامه ای نوع اول و ۳۰ دقیقه توقف غیربرنامه ای نوع دوم حاصل شده است. میزان بهبود در کاهش زمان‌های توقف غیربرنامه ای نوع اول و دوم در سناریوهای مختلف در جدول ، خلاصه شده است. در سناریوهای ۳، ٤ و ٦ در هر دو نوع زمان توقف غیربرنامه ای بهبود ایجاد شده است. با مقایسه جواب حاصل از سیستم پیشنهادی در سناریوهای ۳، ٤ و ٦ با گراف حرکت قطارها که در شرکت راه‌آهن تهیه می‌شود، بطور متوسط ۸.۳۸٪ درصد بهبود در زمان‌های غیربرنامه ای نوع اول و ۷۱.۱۱٪ درصد بهبود در زمان‌های غیربرنامه ای نوع دوم حاصل شده است. در شرکت راه‌آهن برای تولید برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها در مسیر تهران- رازی زمانی حدود ۲ روز توسط کارشناسان خبره صرف می‌شود. اما سیستم پیشنهادی قادر به تهیه گراف حرکت قطارها با توقف غیربرنامه ای کمتر و در زمانی بسیار کمتر از زمان صرف شده نسبت به آنچه در شرکت راه‌آهن وجود دارد، است. گراف حرکت قطارها در جواب حاصل از الگوریتم اتصال مسیر تکاملی در سناریوی (۳) در مسیر تهران- رازی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ گراف حرکت قطارها در جواب حاصل از الگوریتم اتصال مسیر تکاملی در مسیر تهران- رازی

۸-نتیجه گیری

در این تحقیق، مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در شبکه‌های ریلی با رویکرد بهینه‌سازی بر پایه یک مدل شبیه‌سازی گسسته- پیشامد برای تولید برنامه زمان‌بندی نزدیک به بهینه موردبررسی قرار گرفت. نوآوری‌های این تحقیق شامل توسعه یک مدل شبیه‌سازی بر اساس شرایط و قوانین راه‌آهن ایران خصوصاً موضوع توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی و استفاده از الگوریتم فراابتکاری اتصال مسیر تکاملی برای یافتن برنامه زمان‌بندی مطلوب است. سیستم طراحی شده قادر به مدل‌سازی یک زیرساخت شبکه ریلی دلخواه و انجام تنظیمات آن بوده و می‌تواند برای برنامه‌ریزی یکپارچه قطارهای شبکه راه‌آهن ایران از آن استفاده نمود. در مدل شبیه‌سازی، همچنین یک روش جدید برای رفع حالت بن‌بست ترافیک قطارها مطابق با شرایط راه‌آهن ایران ارائه شد. مدل شبیه‌سازی به کاربر این امکان را می‌دهد که برنامه زمان‌بندی را متناسب با نیاز خود تغییر داده و یک برنامه زمان‌بندی موجه دیگر تولید کند. سیستم پیشنهادی برای زمان‌بندی قطارهای مسافری مسیر تهران- رازی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج به دست آمده، بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در کاهش زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای را

نشان می‌دهد. نتایج حل این مسئله همچنین نشان داد که در مسائل با ابعاد بزرگ، سیستم قادر به تولید برنامه زمان‌بندی مطلوب و در زمان معقول است. از زمینه‌های تحقیقاتی آتی می‌توان به ارائه یک مدل شبیه‌سازی برای زمان‌بندی مجدد قطارها در شرایط رخداد اختلال در برنامه زمان‌بندی اشاره نمود. برای این مسئله می‌بایست الگوریتم‌های بسیار سریع توسعه داده شود تا بتواند با انتخاب سیاست‌ها و سناریوهای مختلف، برنامه زمان‌بندی را ترمیم کند. از دیگر زمینه‌های آتی می‌توان به توسعه فرضیات و لحاظ نمودن زمان‌ها و برنامه توقف قطارها به عنوان متغیر تصمیم در بخش بهینه‌سازی اشاره نمود. در بخش بهینه‌سازی تعریف شاخص‌هایی مانند توزیع متعادل و یکنواخت زمان های توقف غیربرنامه ای بین قطارها نیز می‌تواند مد نظر قرار بگیرد.

۹-مراجع

- جمیلی، الف. و کیانفر، ف. (۱۳۸۸)، "زمانبندی حرکت قطارها به کمک روش فوق ابتکاری عملیات حرارتی شبیه‌سازی شده". نشریه پژوهشنامه حمل ونقل، سال ششم، شماره یک، ص. ۱۳-۲۷.

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

- حسن نایبی، ع. (۱۳۹۰)، "تعیین توالی اعزام و برنامه توقف قطارها در مسیرهای ریلی دوخطه به کمک الگوریتم‌های جستجوی تصادفیِ تطابقیِ حریصانه و جستجوی همسایگی متغیر". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

- خادم ثامنی، م. (۱۳۸٦)، "زمانبندی حرکت قطارها در مسیرهای دوخطه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

- سپهری، م. م. و پورسید آقایی، م. (۱۳۷۸)، "برنامه‌ریزی حرکت قطارها در خطوط یک خطه"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۳، شماره ۲، ص. ۸۷-۹۷.

- شفاهی، ی. و عابدینی، ای. (۱۳۸۳)، "زمانبندی حرکت قطارها با استفاده از یک روش ابتکاری جستجوی مبتنی بر منع"، هفتمین همایش حمل و نقل ریلی، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

- شفاهی، ی. و عزیزخانی، ع.ر. (۱۳۸۳)، "زمانبندی حرکت قطارها با روشی ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک"، هفتمین همایش حمل و نقل ریلی، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

- شفاهی، ی. و صادقی، ن. (۱۳۸۳)،"یک مدل شبیه‌سازی برای زمانبندی حرکت قطارها با هدف افزایش قابلیت اطمینان برنامه زمانبندی"، هفتمین همایش حمل و نقل ریلی، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

- قاسم پور، ش. و رادفر، الف. (۱۳۸۸)، "شبیه‌سازی حرکت قطار با استفاده از شبکه‌های پیشرفته‌تری و مدلهای بهینه‌سازی"، دومین کنفرانس بین المللی پیشرفتهای اخیر در مهندسی راه آهن، تهران.

- قصیری، ک. و مرشد سلوک، ف. (۱۳۸٤)، "ارایه یک مدل ابتکاری مبتنی بر سیستم اجتماع مورچه‌ها برای حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها"، پژوهشنامه حمل ونقل، سال دوم، شماره چهار، ص. ۲۵۷ تا ۲۷۰.

- یقینی، م. و محمدزاده، ع. (۱۳۹۰)، "یک مدل زمانبندی حرکت قطارها با در نظر گرفتن زمانهای توقف برای نماز". نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ٤٥ ، شماره ۱، ص. ۱۰۳ تا ۱۱٦.

- یقینی، م. و نیکو، ن. (۱۳۹۰)، "ارایه مدل بهینه‌سازی برای تولید جدول زمانبندی فشرده حرکت قطارها و محاسبه ظرفیت برای راه آهن‌های شهری و برون‌شهری". یازدهمین کنفرانس بین المللی حمل ونقل و ترافیک.

- Higgins, A. and Kozan, E. (1997), "Heuristic techniques for single line train scheduling", Journal of Heuristics, Vol. 3, pp. 43-62.

- Hofman, M., Madsen, L. F., Groth, J. J., Clausen, J. and Larsen, J. (2006), "Robustness and recovery in train scheduling a simulation study from dsb s–tog a/s. In ATMOS Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, DTU, IMM–Technical Report.

- Li, F., Gao, Z. Li, K. and Yang, L. (2008), "Efficient Scheduling of Railway Traffic Based on Global Information of Train", Transportation Research Part B 42: pp.1008–1030.

- Marinov, M. and Viegas, J. A. (2010), "mesoscopic simulation modeling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network", International journal of simulation modeling practice and theory.

- Mills, G. and Pudney, P. (2003), "The Effects of Deadlock Avoidance on Rail Network Capacity and Performance", Proceedings of the Mathematics-in-Industry Study Group.

- Middelkoop, D. and Bouwman, M. (2001), "Simone: Large scale train network simulations", In Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference, volume 2, pp. 1042–1047.

- Petersen, E. R. and Taylor, A. J. (1982), "A Structured Model for Rail Line Simulation and Optimization," Transportation Science, Vol. 16, pp. 192-206.

- Petersen, E. R. and Taylor, A. J. (1983), "Line Block Prevention in Rail Line Dispatch", In: INFOR Journal 2, No. 1, pp. 46-51.

- Resende, M. G. C., Martí, R., Gallego, M., Duarte, A. (2010), "GRASP and path re-linking for the max-min diversity problem", Computers & OR 37(3): pp.498-508.

- Ribeiro, C. C. and Resende, M. G. C. (2012), "Path re-linking intensification methods for stochastic local search algorithms", Journal of Heuristics 18(2): pp.193-214.

- Valkenaers, P.; Van Brussel, H. (2003), "Deadlock avoidance in flexible flow shops with loops", Journal of Intelligent

- Andrade, D.V. and Resende, M.G.C. (2007), "GRASP with evolutionary path re-linking", Proc. of Seventh Meta-heuristics International Conference (MIC).

- Andradottir, S. (1998), "Simulation optimization, Handbooks of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice", chapter 9. John Wiley & Sons, New York.

- Cacchiani, V. and Toth, P. (2012), " Nominal and robust train timetabling problems", European Journal of Operational Research 219, pp.727–737.

- Caprara, A., Fischetti, M. and Toth, P. (2002), "Modeling and solving the timetabling problem", Operations Research, Vol. 50, No. 5. pp. 851-861.

- Castilloa, E., Gallegob, I., Ureñab, J.M. and Coronadob, J.M. (2011), "Timetabling optimization of a mixed double- and single-tracked railway network", Applied Mathematical Modeling, Vol. 35 (2), pp. 859-878.

- Cui, Y. (2010), "Simulation-Based Hybrid Model for a Partially-Automatic Dispatching of Railway Operation", Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart.

- Cheng, Y. (1998), "Hybrid Simulation for Resolving Resource Conflicts in Train Traffic Rescheduling", Computers in Industry 35(3): pp.233–246.

- Dessouky, M. M., and Leachman, R. (1995), "A Simulation Modeling Methodology for Analyzing Large Complex Rail Networks", Simulation 65(2): pp.131–142.

- Fu, M. (2002), "Optimization for simulation: Theory vs. practice", INFORMS Journal on Computing, 14(3): pp.192–215.

- Glover, F. (1999), "Scatter Search and Path Re-linking", New ideas in optimization, McGraw-Hill Ltd., UK Maidenhead, UK, England.

- Gély, L., Feillée, D. and Dessagne, G. (2009), "A cooperative framework between optimization and simulation to address on-line re-scheduling problems", SNCF - Innovation and Research Department.

problem", Simulation Modeling Practice and Theory 20(1), pp.124-141.

- Zhou, X. and Zhong, M. (2007), "Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds", Transportation Research Part B, Vol. 41, pp. 320–341.

- Welch, N. and Gussow, J. (1986), "Expansion of Canadian National Railway's line capacity". Interfaces 16(1) pp.51–64.

- Yalçinkaya, Ö, and Bayhan, G. M. (2012), "A feasible timetable generator simulation modeling framework for train scheduling