

بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در خطوط راه‌آهن شهری با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

عرفان حسن‌ناییبی، دانش‌آموخته دوره دکتری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سیدحسام الدین ذگردی (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمدرضا امین‌ناصری، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مسعود یقینی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

E-mail: zegordi@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۷

دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۳

چکیده

رخداد اختلالات در راه‌آهن شهری باعث بروز تاخیرات قطارها، افزایش زمان انتظار مسافری، افت سطح خدمت و استواری برنامه زمانبندی می‌شود. مدیریت اختلال در راه‌آهن، مجموعه روش‌هایی جهت مدیریت رخدادها، پیش‌بینی نشده و کنترل عملکرد سیستم است. در این تحقیق، مسدودی موقتی بخشی از مسیر به عنوان عامل اختلال در برنامه حرکت قطارها در نظر گرفته شده است. جهت حل مساله از رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای کمینه کردن متوسط مجموع زمان‌های انتظار و سفر مسافری استفاده شده است. استراتژی‌های مدیریت اختلال بصورت ترکیبی و شامل سیاست توقف-عبور و گردش مسیر است. مدل شبیه‌سازی به منظور مدل‌سازی متغیرهای تصادفی در مساله شامل زمان سیر احتمالی، نرخ ورود تصادفی مسافری به ایستگاه‌ها توسعه داده شده است. بخش بهینه‌سازی رویکرد پیشنهادی نیز شامل الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر است. جهت اعتبارسنجی رویکرد مدیریت اختلال، از چند سناریوی اختلال در خط ۱ متروی تهران استفاده شده است. نتایج حل مساله روی مسایل واقعی، کارایی و کاربرد مناسب روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را در تصمیم‌گیری در شرایط بروز اختلال و مسدودی مسیر نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داده است که استراتژی ترکیبی مدیریت اختلال نسبت به استراتژی‌های مستقل، بهبود بیشتری در کاهش زمان‌های سفر مسافری ایجاد می‌کند. پیاده‌سازی روش جستجوی همسایگی روی نمونه مسایل واقعی و استفاده از استراتژی ترکیبی مدیریت اختلال باعث کاهش حدود ۱۴ درصدی متوسط زمان سفر مسافری شده است.

واژه‌های کلیدی: راه‌آهن شهری، توقف-عبور، گردش مسیر، متوسط زمان سفر، جستجوی همسایگی متغیر

۱. مقدمه

مدیریت اختلال به مجموعه فرآیندهای مربوط به انتخاب و پیاده سازی اقدامات کنترلی و استراتژی‌های اصلاحی بعد از رخداد یک اختلال اطلاق می‌شود. منظور از مدیریت اختلالات در شبکه‌های ریلی، مجموعه روش‌هایی جهت مدیریت و کنترل حرکت قطارها با هدف حفظ سطح خدمت ارائه شده به مسافری است که عمدتاً با تغییر برنامه حرکت قطارها و یا پیاده سازی استراتژی‌های عملیاتی همراه است [Kuster, Jannach and Friedrich, 2009]. مساله مدیریت اختلالات از مهم‌ترین چالش‌های برنامه ریزی در سطح عملیاتی برای سیستم‌های حمل و نقل ریلی است. برنامه‌ریزی نامناسب در هنگام بروز اختلال باعث بوجود آمدن شرایط بحرانی و افزایش تاخیرات خواهد شد. انتخاب راهکارهای بهینه از بین راهکارهای موجود جهت مدیریت اختلال نیز از ضرورت بکارگیری روش‌های علمی جهت مدل سازی و تاثیرسنجی رخداد اختلالات است. در راه آهن شهری ایران که متاثر از مشکلاتی نظیر فرسودگی ناوگان، مشکلات زیرساخت خطوط ریلی و ضعف سیستم‌های کنترلی حرکت قطار است، استفاده از رویکردهای بهینه سازی در مدیریت اختلال از اهمیت بالایی برخوردار است. تاکنون هیچ سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی عملیاتی حرکت قطارها تحت شرایط اختلال در راه آهن شهری ایران پیاده سازی نشده است. بکارگیری سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در مدیریت اختلال مزایای مهمی مانند افزایش سرعت تصمیم‌سازی و قابلیت ارائه راهکارهای کارا برای ترمیم وضعیت مختل شده را به همراه دارد. توسعه مدل‌های مدیریت اختلال در شرایط عدم قطعیت از ضرورت‌های تحقیق حاضر محسوب می‌شود.

در یک سیستم حمل و نقل ریلی درون شهری، بسته به شرایط عملیاتی از استراتژی‌های مختلفی برای مدیریت اختلال استفاده می‌شود. چالش اصلی مساله در انتخاب استراتژی‌های مدیریت اختلال و نیز بهینه سازی متغیرهای کنترلی مربوطه است. استراتژی‌های موثر برای مدیریت تقاضای سفر و منظم نمودن سرفاصله زمانی اعزام قطارها در شبکه‌های مترو می‌تواند شامل اضافه کردن قطارهای فوق العاده (جدید) به شبکه مترو، استراتژی گردش مسیر و استراتژی توقف-عبور در ایستگاه‌های بین راهی باشد [Canca et al. 2012]. در حالتی که افزایش

تقاضای سفر تنها در بخش مشخصی از مسیر رخ داده باشد، از استراتژی گردش مسیر حرکت قطارها برای مدیریت جریان مسافر استفاده می‌شود. در این حالت، قطارهای برگشتی مسیر کوتاه‌تری را طی می‌کنند. بدین ترتیب می‌توان با افزایش تواتر اعزام در ایستگاه‌های با ازدحام مسافر، زمان انتظار مسافری را کاهش داد. در استراتژی دوم، قطار در تعدادی از ایستگاه‌های بین راهی با تقاضای کمتر توقف نداشته و از آنها بدون توقف عبور می‌کند.

در این تحقیق مدل مدیریت اختلال در خطوط مترو با بهینه کردن استراتژی‌های ترکیبی توقف-عبور و گردش مسیر ارائه شده است. مسدودی موقتی بخشی از مسیر به عنوان عامل اختلال در نظر گرفته شده است. مدت زمان رفع اختلال نیز نامعلوم فرض شده است. یک مدل شبیه سازی گسسته-پیشامد برای ارزیابی جواب‌های مساله توسعه داده شده است. به منظور یافتن جواب‌های مناسب برای مساله از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر استفاده شده است. رویکرد بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی قادر به مدل سازی عدم قطعیت‌های مساله از جمله تصادفی بودن تقاضای سفر، احتمالی بودن زمان سیر قطارها و نیز نامعلومی مدت مسدودی مسیر است. سوالات تحقیق شامل این است که کدام یک از استراتژی‌های مدیریت اختلال به تنهایی عملکرد بهتری در کاهش زمان‌های انتظار و زمان سفر مسافری خواهد داشت. همچنین با توجه به محدودیت زمانی حل مساله، آیا ترکیب استراتژی‌های توقف-عبور و گردش مسیر در مقایسه با هر کدام به تنهایی، باعث بهبود شاخص همگرایی الگوریتم به سمت جواب‌های بهتر خواهد شد یا خیر.

۲. مرور ادبیات تحقیق

از جمله تحقیقات اولیه در زمینه مدیریت اختلال در سیستم‌های حمل و نقل راه آهن شهری می‌توان به مقالاتی از اسونا و نیوئل (۱۹۷۲) و همچنین گونیم و ویراسینگه (۱۹۸۶) اشاره نمود [Ghoneim and Wirasinghe, 1986, Osuna and Newell, 1972]. در این تحقیقات با توجه به عدم وجود سیستم‌های جمع آوری خودکار داده‌ها و اطلاعات، برنامه ریزی لحظه‌ای با توجه موقعیت قطارها مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیقات جدیدتر، با توجه به توسعه ابزارهای فناوری اطلاعات و امکان جمع‌آوری سریع و کامل داده‌های مسافری، قطارها و

مدیریت اختلال چند استراتژی ترکیبی متشکل از گردش مسیر، توقف موقت در ایستگاه‌ها و نیز اعزام سریع (بدون توقف) بکار گرفته شده و برای حل مساله نیز از روش شاخه و کران استفاده شده است. نوع اختلال مورد مطالعه، از نوع اختلال جزئی در نظر گرفته شده و مدل پیشنهادی در دو سناریوی اختلال با مدت های ۱۰ و ۲۰ دقیقه، روی داده‌های واقعی ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از دو استراتژی توقف و برگشت کوتاه، قادر به کاهش زمان‌های انتظار مسافرین به میزان ۳۵٪ (در حالت ۱۰ دقیقه بودن مدت اختلال) و ۵۷٪ (در حالت ۲۰ دقیقه بودن مدت اختلال) بوده است. نتایج تحلیل حساسیت روی مدت زمان اختلال نشان داده است که استراتژی‌های توقف قطارها در ایستگاه‌ها و اعزام سریع از استواری مناسبی برخوردار هستند اما کارایی استراتژی برگشت کوتاه، به شدت وابسته به تخمین مدت زمان مسدودی خط است.

در تحقیقی از پانگ و ویلسون (۲۰۰۸) مساله مدیریت اختلال در خطوط ریلی با تاکید بر استراتژی توقف موقت قطارها مورد بررسی قرار گرفته است [Puong and Wilson, 2008]. همچنین دو دسته استراتژی کنترلی برای گردش قطارها شامل گردش زودتر از رسیدن به محل اختلال و یا جلوتر از محل اختلال، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این مساله، یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح غیرخطی و یک روش حل دو مرحله‌ای ارائه شده است. نتایج نشان داده است که مدل سازی ارائه شده از استراتژی‌های کاربردی که در عمل نیز قابل پیاده‌سازی هستند، استفاده می‌کند و در زمان معقولی که برای کاربردهای واقعی و عملیاتی مناسب است، قادر به تولید جواب برای مساله است. مساله برنامه‌ریزی و زمانبندی قطارهای اضافی در خطوط مترو تحت شرایط اختلال با فرض امکان سبقت، جهت برآورده کردن میزان افزایش تقاضای مسافرین مطالعه شده است [Canca et al., 2012]. افزایش غیرمنتظره تقاضای مسافرین در تعدادی از ایستگاه‌ها به عنوان عامل اختلال در نظر گرفته شده است که در صورت نبود ناوگان کافی، می‌تواند منجر به افزایش زمان‌های انتظار و تاخیر شود. عامل اختلال (افزایش تقاضای مسافر) بصورت یک عامل ایستا و الگوی تقاضای مسافر نیز بصورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. از دو استراتژی گردش مسیر قطارها و عدم توقف در برخی از ایستگاه‌ها در طول مسیر، برای مدیریت اختلال استفاده شده است.

زیرساخت شبکه، مطالعات به سمت توسعه استراتژی‌های مختلف مدیریت اختلال و ارائه مدل‌های بهینه‌سازی سوق یافته است. البته در تحقیقات پیشین، بکارگیری چندین استراتژی بطور همزمان، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

در برخی از تحقیقات قبلی تنها استراتژی توقف موقت قطار در شرایط وجود داده‌های لحظه‌ای از موقعیت قطارها مورد مطالعه قرار گرفته است [Eberlein, 1997, Eberlein, Wilson, and Bernstein, 2001]. در تحقیقی از اودل (۱۹۹۷) به بکارگیری استراتژی‌های توقف موقت و گردش مسیر به عنوان برنامه‌های اصلاحی در هنگام رخداد اختلال در شرایط واقعی، پرداخته شده است [O'Dell, 1997]. در تحقیقی از اودل و ویلسون (۱۹۹۹) مدل‌سازی‌هایی از مساله مدیریت اختلال در شبکه‌ای از خطوط ریلی، ارائه کرده اند [O'Dell and Wilson, 1999]. استراتژی‌های توقف موقت و گردش مسیر قطارها در مدل سازی لحاظ و تابع هدف مساله بصورت کمینه کردن زمان انتظار مسافرین در نظر گرفته شده است. در تحقیقی از شن (۲۰۰۰) مدلی جهت بهینه‌سازی استراتژی اعزام قطارهای فوق العاده (بدون توقف در بین مسیر) ارائه نموده است [Shen, 2000]. در تحقیقی از پانگ (۲۰۰۱) بر مبنای تحقیقات قبلی محدودیت‌های ظرفیت پایانه نیز در مدل لحاظ شده است [Puong, 2001]. توابع هدف در نظر گرفته شده شامل کمینه کردن تاخیر و انتظار مسافرین در داخل قطار یا در سکوها با فرض کنترل عملیات بصورت متمرکز است. در تمامی مطالعات بررسی شده، تقاضای مسافر و زمان‌های سیر قطارها بصورت قطعی و همچنین طول مدت اختلال نیز از قبل مشخص و ثابت فرض شده است. در تحقیقی از شن و ویلسون (۲۰۰۱) مساله مدیریت و کنترل اختلالات در شبکه‌های متروی شهری با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی عددصحیح مطالعه شده است [Shen and Wilson, 2001]. تابع هدف مدل‌های ارائه شده بصورت مجموع کل زمان انتظار مسافرین (در روی سکوها و نیز در داخل قطارها) در نظر گرفته شده است. استراتژی‌های مورد بررسی در مدل پیشنهادی شامل توقف موقت قطارها در ایستگاه‌ها، اعزام سریع و برگشت کوتاه قبل از رسیدن به مقصد است. سناریوی اختلال شامل یک مسدودی موقت در نزدیک یک پایانه در مسیر و در زمانی نزدیک به ساعت اوج تقاضا است. مدت اختلال در دو سناریوی ۱۰ و ۲۰ دقیقه‌ای مطالعه شده است. در مدل

ارزیابی برنامه های زمانبندی مورد استفاده قرار می گیرد. در تحقیقی از توکلی مقدم و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل مسیریابی وسایل نقلیه دو هدفه با ناوگان ناهمگن تحت شرایط عدم قطعیت در تقاضا ارائه شده است. اهداف مدل بهینه سازی شامل به حداقل رساندن هزینه های وسایل نقلیه و همچنین کمبود محصولات برای تمام خرده فروشان در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی مساله از رویکرد تئوری فازی و برای تعیین راه حل های پارتو بهینه از روش تبدیل به قید استفاده شده است [Tavakkoli-Moghaddam, Razie and Tabrizian, 2015]

علی رغم تاثیر قابل توجه عدم قطعیت ها در مساله مدیریت اختلال در راه آهن شهر، تحقیقات کمی به این زمینه پرداخته اند. در هنگامی که اختلال مدت زمان زیادی طول بکشد، ظرفیت قطارها به عنوان یک عامل موثر بر زمان انتظار مسافری، از اهمیت قابل توجهی برخوردار خواهد شد. مطابق دسته بندی مقالات و مدل های شاخص مدیریت اختلال در شبکه های ریلی شهری، نقطه ضعف مهم در تحقیقات قبلی، توجه کمتر به مدل سازی و پیاده سازی همزمان استراتژی های کنترلی (علی رغم کاهش قابل ملاحظه در زمان انتظار مسافری از لحاظ تئوری) است)

استراتژی های کنترل لحظه ای حرکت قطارها توسعه داده شده و برای شبکه مترو شهر سانتیاگو شیلی مورد استفاده قرار گرفته است. ماتریس تقاضای مبدا-مقصد، نرخ متغیر با زمان ورود مسافری به ایستگاه ها و خصوصیات قطارها و ایستگاه ها از جمله ورودی های مدل شبیه سازی است. خروجی های مدل شبیه سازی نیز شامل متوسط زمان انتظار مسافری است. نتایج مدل شبیه سازی نشان داده است که استراتژی توقف-عبور قطارها می تواند در بهبود شاخص های عملکردی سیستم مانند زمان های انتظار مسافری و ضریب اشغال ظرفیت قطارها موثر باشد. در تحقیقات پیشین یک ساختار کلی برای ایجاد مدل های شبیه سازی در خطوط ریلی به همراه نحوه کالیبراسیون، اعتبارسنجی و متدولوژی ارزیابی نتایج ارائه شده است [Koutsopoulos and Wang, 2007]. مدل شبیه سازی فوق به منظور ارزیابی استراتژی های کنترلی در شرایط رخداد اختلالات در عملیات بکار گرفته شده و کارایی آن روی یک نمونه واقعی آزمایش شده است.

در تحقیقی از آلریش و همکاران (۲۰۱۲) مساله زمانبندی استوار در شبکه های تراموای شهری به منظور بهبود شاخص سروقت بودن اعزام ها به کمک تکنیک بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است [Ulrich et al. 2012]. شبکه های تراموا، اغلب بصورت ترکیبی در روی زمین و زیرزمینی هستند. از ترکیب روش های دقیق (شاخه و حد) و فراابتکاری (الگوریتم ژنتیک) برای زمانبندی در شبکه های تراموا با هدف بیشینه کردن استواری و پایداری به برنامه اولیه استفاده شده است. مطالعات ذکر شده در بالا را می توان روش های مفیدی برای بهینه سازی جدول زمانی در شرایط قطعی و غیراحتمالی دانست. این در حالی است که عدم اطمینان در مولفه های یک سیستم راه آهن شهری از جمله تقاضای سفر، عامل تعیین کننده ای در سیستم های راه آهن شهری است، اما مطالعات محدودی به آن توجه داشته اند. مدل های شبیه سازی شبکه های ریلی درون شهری، ابزارهای ارزشمندی برای تحلیل عملیات پیچیده حمل و نقل هستند [Koutsopoulos and Wang, 2007]. بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی نیز یک رویکرد جایگزین در مقایسه با روش برنامه ریزی ریاضی و تکنیک انعطاف پذیری برای حل مساله است. در این روش، شبیه سازی گسسته-پیشامد (DES) به عنوان ابزاری برای تولید و یا جدول ۱). از نقاط ضعف دیگر تحقیقات پیشین می توان به نادیده گرفتن فرض تصادفی بودن نرخ ورود مسافری و نیز مدت رفع اختلال اشاره نمود. در مدل ارائه شده در، فرض شده است که در صورتی که اختلال (از نوع مسدود خطوط ریلی) حداکثر به اندازه ۲۰ دقیقه طول بکشد، تنها از استراتژی توقف موقتی قطارها استفاده و در صورت افزایش مدت زمان اختلال، از استراتژی گردش مسیر به همراه استراتژی توقف موقتی بهره گرفته می شود [Puong and Wilson, 2008]. رویکرد شبیه سازی از انعطاف پذیری بالایی برای ارزیابی و مقایسه استراتژی های مختلف جبران تاخیرات و ترمیم برنامه زمانبندی در هنگام بروز اختلال در شبکه های مترو برخوردار است. در تحقیقات قبلی یک مدل شبیه سازی گسسته-پیشامد و پویا برای سیستم های متروی چندخطه و شبکه ای و مطالعه استراتژی های مختلف عملیاتی ارائه شده است [Grube Núñez and Cipriano, 2011]. برنامه شبیه سازی با منطق شیء گرای و با قابلیت ارتباط با سایر نرم افزار برای طراحی و ارزیابی

جدول ۱. دسته‌بندی تحقیقات در حوزه مدیریت اختلال در شبکه‌های ریلی درون‌شهری

نویسندگان	توپولوژی	نوع اختلال	توابع هدف	عدم قطعیت در تقاضا	عدم قطعیت در مدت	ظرفیت قطار	اختلال استراتژی‌های مدیریت	مدل	روش حل	نوعی
[Shen and Wilson, 2001]	N	مسدودی موقتی خطوط	زمان سفر مسافری	-	-	✓	توقف قطارها در ایستگاه‌ها، اعزام سریع و گردش کوتاه	MILP	شاخه و کران B&B ^۲	مدل‌سازی یکپارچه استراتژی‌های مدیریت اختلال
[Puong and Wilson, 2008]	L	مسدودی خطوط	زمان سفر مسافری	-	-	✓	توقف موقتی قطارها و گردش کوتاه	NLIP	نرم‌افزار XPRESS-MP 12.0 و روش (B&C)	ارائه جواب‌های قابل پیاده‌سازی در عمل
[Canca et al., 2012]	L	افزایش تقاضای مسافری	کمینه کردن اثر ازدحام	-	-	✓	اضافه کردن قطارهای ویژه، گردش کوتاه و توقف-عبور	ILP MILP	نرم‌افزار CPLEX	مدل‌سازی یکپارچه استراتژی‌های مدیریت اختلال
[Ullrich, Lückerath, and Speckenmeyer, 2013]	N	تاخیرات	انحراف از برنامه اولیه	-	-	-	استوار سازی برنامه زمان‌بندی	شبیه‌سازی	بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی	ترکیب روش B&B با الگوریتم ژنتیک
[Jin, Teo, and Sun, 2013]	N	مسدودی در تعدادی از خطوط	زمان سفر مسافری	-	-	✓	استفاده از اتوبوس‌های ویژه	MILP	روش تولیدستون	زمان‌بندی ترکیبی قطارها و اتوبوس‌ها
[Jamili and Pourseyed Aghaee, 2015]	L	تغییرات تصادفی تقاضا	کل زمان سفر قطارها	✓	-	✓	استراتژی توقف-عبور	MINLP	رویکرد استوارسازی	تعیین الگوی استوار برای استراتژی توقف-عبور
[Kang et al., 2015]	N	تاخیر قطارها	زمان سفر قطارها و زمان تعویض خط	-	-	✓	تغییر زمان‌های سیر و توقف قطارها	MILP	GA	توسعه مدل زمان‌بندی مجدد قطارها در شبکه
[Yin et al., 2016]	L	تغییرات تصادفی تقاضای سفر	مصرف انرژی و زمان سفر	✓	-	✓	تغییر زمان‌های ورود و خروج	مدل بهینه‌سازی تصادفی	برنامه‌ریزی پویای تقریبی	در نظر گرفتن همزمان عدم قطعیت و پویایی تقاضای سفر
تحقیق حاضر	L	مسدودی موقتی خطوط	متوسط زمان‌های انتظار و سفر مسافری	✓	✓	✓	ترکیب استراتژی‌های توقف-عبور و گردش مسیر	بهینه‌سازی-شبیه‌سازی	الگوریتم VNS	در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدت اختلال

داده‌اند. نصیریان و رنجبر (۱۳۹۲) یک مدل برنامه ریزی عددصحيح برای زمانبندی اتوبوس‌های درون شهری با هدف حداقل کردن زمان انتظار مسافری در ایستگاه‌های تقاطعی و نیز در کل شبکه ارائه کرده‌اند. محدودیت‌های ظرفیت شبکه و زمان‌های استراحت راهبران وسایل نقلیه در مدل پیشنهادی لحاظ شده است.

مساله بهبودسازی و تنظیم سرفاصله زمانی حرکت قطارها در خطوط راه آهن شهری با رویکرد بهبودسازی مبتنی بر شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای حل مساله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و مدل پیشنهادی روی خط ۱ متروی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته است [Hasan Nayebi, 2014]. صالحی (۱۳۹۳) یک سامانه هوشمند مبتنی بر منطق فازی جهت کنترل زمان اعزام قطارها در سامانه کنترل ترافیک قطارهای سریع‌السیر درون شهری و حومه با توجه به ازدحام مسافری در ایستگاه‌های ریلی ارائه کرده است. سامانه فوق بصورت یک مطالعه موردی در نیمه جنوبی خط یک متروی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر یک مدل یکپارچه برای مدیریت اختلال حرکت قطارها در خطوط مترو در حالی که بخشی از مسیر بصورت موقتی و با زمان نامعلوم مسدود شده باشد، ارائه شده است. از جمله نوآوری‌های پژوهش حاضر در ارائه یک مدل زمانبندی مجدد حرکت قطارها در راه آهن شهری با ترکیب استراتژی‌های توقف-عبور و گردش مسیر و نیز ارائه یک رویکرد بهبودسازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای حل مساله است. برای در نظر گرفتن پارامترهای احتمالی مربوط به سیر و حرکت قطارها، یک شبیه‌سازی گسسته-پیشامد طراحی شده و از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر VNS برای کمینه‌سازی مقدار متوسط زمان انتظار و زمان سفر مسافری در شبکه استفاده شده است. در بخش بعدی، مساله تحقیق بیان و فرضیات آن تشریح می‌شود.

۳. تعریف مساله و نماد گذاری

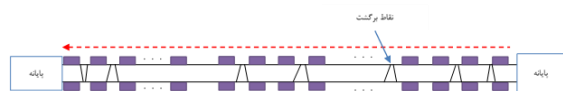
یک شبکه حمل و نقل ریلی تک حلقه مفروض است (شکل ۱). به جز در پایانه‌ها، هر ایستگاه تنها ظرفیت قبول یک قطار در هر زمان را داشته و هیچ سبقتی در شبکه رخ نمی‌دهد. نماد M نشان دهنده تعداد کل ایستگاه‌های شبکه ($k \in K$) و N

در تحقیقات داخلی نیز مساله مدل‌سازی تاخیرات در خطوط حمل و نقل ریلی مورد توجه بوده است. بهبهانی و همکاران (۱۳۸۷a) به ارائه مدلی برای تحلیل زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی پرداخته‌اند. در تحقیق فوق، تاثیر فاصله زمانی اعزام بین قطارها روی زمان انتظار مسافری در ایستگاه‌ها مطالعه شده است. به عنوان مطالعه موردی، مدل شبیه‌سازی پیشنهادی در خطوط ۱ و ۲ متروی شهر تهران بکارگرفته شده است. با توجه به مدل شبیه‌سازی طراحی شده و انجام کالیبراسیون و اعتبارسنجی آن، زمان انتظار مسافران جهت سوار شدن به قطار برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساعت اوج صبحگاهی یک روز عادی میان هفته ای (۶ الی ۱۰ صبح) در مترو تهران برآورد شده است. بر این اساس، یک رابطه رگرسیون بین زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها و متغیر کنترلی سرفاصله زمانی اعزام بین قطارها به دست آمده است.

بهبهانی و همکاران (۱۳۸۷b) یک مدل ریاضی جهت برآورد زمان تأخیر مسافران مترو براساس مدت زمان انتظار آنها در ایستگاه‌ها با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چند شاخصه و با روش رگرسیون غیرخطی چند متغیره ارائه کرده‌اند. درجه وابستگی و میزان اثرگذاری شاخص‌های تأثیرگذار بر مدت زمان تأخیر در ایستگاه‌ها و متوسط زمان انتظار مسافران با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه تعیین شده است. همچنین یک مدل بهبودسازی ریاضی با هدف کاهش زمان انتظار مسافران توسعه داده شده است.

حسن‌ناییبی و همکاران (۱۳۹۱) یک برنامه نرم‌افزاری مبتنی بر شبیه‌سازی برای زمانبندی حرکت قطارهای راه آهن برون شهری ارائه کرده‌اند. نرم‌افزار پیشنهادی بر پایه متدولوژی بهبودسازی بر پایه‌ی شبیه‌سازی گسسته-پیشامد طراحی شده و قادر به کمینه‌سازی زمان‌های سفر قطارها در شبکه ریلی است. خطیابی و همکاران (۱۳۹۱) یک مدل برنامه ریزی ریاضی برای کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های متقاطع خطوط متروی تهران ارائه کرده‌اند. در مدل پیشنهاد شده، فاصله زمانی بین قطارها در هر یک از خطوط مترو ثابت فرض شده و زمان اعزام اولین قطارها در خطوط متغیر تصمیم مساله است. خان‌محمدی و همکاران (۱۳۹۲) یک روش هوشمندسازی ترافیک حرکت قطارها با استفاده از منطق فازی را توسعه و به عنوان نمونه برای خط یک متروی تهران مورد آزمایش قرار

طور تصادفی با توجه به توزیع پواسون با نرخ متغیر با زمان $\lambda_k^{(p)}$ به ایستگاه k می‌رسند. این فرض در مطالعات مختلفی در نظر شده است [Ding and Osuna and Newell, 1972]؛ [Chien, 2001] و [Eberlein et al., 1998]. بطور مشابه، نسبت مسافری که از داخل قطارها در ایستگاه k و در بازه p پیاده می‌شوند با نماد $\rho_k^{(p)}$ نشان داده شده است. بطوری که این پارامتر وابسته به مکان (ایستگاه) و نیز دوره‌های زمانی در طول افق برنامه ریزی است. مسافران منتظر در ایستگاه‌ها نیز با نظم FCFS به قطارها سوار می‌شوند. بیشینه ظرفیت حمل مسافر هر قطار با نماد C مشخص می‌شود. عامل اختلال بصورت مسدودی موقتی بخشی از شبکه ریلی است که مدت زمان رفع آن (ω) از یک توزیع احتمالی معلوم و گسسته پیروی می‌کند.



شکل ۱. نمایی از یک خط مترو با پایانه‌های انتهایی و نقاط برگشت

بطور کلی، استراتژی توقف-عبور جزء پرکاربردترین راهکارهای مدیریت اختلال در تقاضای سفر است که از مزایایی نظیر کاهش زمان سفر قطارها و کاهش زمان انتظار مسافران برخوردار است. بر اساس اطلاعات اخذ شده از راه‌آهن شهری تهران، استراتژی‌های توقف-عبور و نیز گردش مسیر جزء راهکارهای کنترلی مجاز برای مدیریت اختلالاتی که در ساعات اوج تقاضا رخ داده‌اند، محسوب می‌شود. در واقع در این شرایط، با توجه به محدودیت زمانی، امکان اضافه کردن قطارها به شبکه وجود ندارد. همچنین فرض شده است که اختلال در زمان‌های اوج تقاضا رخ داده و عملاً تمامی ناوگان موجود در مسیر در حال تردد است. لذا هیچ قطار اضافی وارد سیستم نمی‌شود و همچنین اعزام هیچ قطاری لغو نمی‌شود. در نتیجه زمان‌بندی مجدد تنها برای قطارهای در حال حرکت و قطارهای موجود در سیستم مترو در طول دوره اختلال انجام می‌شود. جهت مدیریت اختلال از استراتژی‌های توقف-عبور و نیز گردش مسیر استفاده می‌شود. استراتژی توقف-عبور قطارها در ایستگاه‌ها از رایج‌ترین راهکارهای مدیریت اختلالات در شبکه‌های مترو است. این استراتژی در ایستگاه‌هایی که کمترین حجم مسافر را از نظر سوار یا پیاده شدن دارند اجرا شده و معمولاً از بین ایستگاه‌های بین

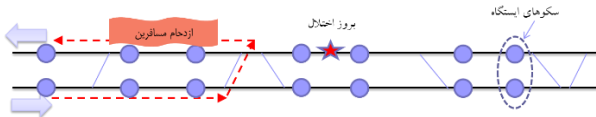
تعداد قطارهای موجود ($i \in I$) است. عملیات روزانه در مترو توسط مرکز کنترل عملیات هماهنگ می‌شود. یک سیکل حرکت نشان دهنده یک سفر است که از یک پایانه شروع می‌شود و به آن ختم می‌شود. یک قطار ممکن است چندین سیکل حرکت در عملیات روزانه در شبکه را انجام دهد. قطاری که به پایانه می‌رسد تمام مسافران داخل آن تخلیه شده و پس از حداقل زمان شانت (t_{min}) آماده برای اعزام در جهت مخالف می‌شود. در صورتی که بیش از یک قطار در یک ترمینال وجود داشته باشد از سیاست اولویت بر اساس زودترین زمان ورود (FIFO) برای اعزام قطارها استفاده می‌شود. زمانبندی قطارها در شبکه‌های مترو معمولاً در طول یک شبانه روز و برای تعداد مشخصی قطار و در یک مسیر یا شبکه دوخطه ریلی انجام می‌شود. حداقل (h_{min}) و حداکثر سرفاصله زمانی (h_{max}) در طول زمانبندی مشخص و ورودی مساله است. محدودیت‌های مسئله بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- محدودیت ظرفیت قطار
- ۲- محدودیت ظرفیت ایستگاه (تنها یک قطار می‌تواند سکوی یک ایستگاه را اشغال نماید)
- ۳- محدودیت حداقل سرفاصله زمانی حرکت قطارها از یک ایستگاه
- ۴- محدودیت اندازه ناوگان
- ۵- محدودیت حداکثر تعداد کل اعزام‌ها در مسیر
- ۶- محدودیت حداقل زمان شانت قطارها در انتهای مسیر جهت برگشت و اعزام در مسیر مخالف

در سیستم حمل و نقل عمومی، تقاضای سفر معمولاً با تغییرات قابل توجهی بین ساعات اوج و غیراوج در نوسان است. به طور کلی، تواتر اعزام قطار در ساعات غیر اوج کاهش می‌یابد و مجدداً در طول ساعات اوج تقاضا افزایش می‌یابد. تغییرات سرفاصله زمانی نیز باید از برآورد تقاضای مسافر تبعیت داشته باشد. در این تحقیق، تقاضای سفر در سیستم راه‌آهن شهری به صورت پویا و با توزیع بین ورود تصادفی و با میانگین وابسته به زمان در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی تغییرات نرخ ورود از یک دوره به دوره دیگر، فرض شده است که کل افق برنامه ریزی به تعدادی از بازه‌های زمانی با طول متغیر تقسیم شده است. بر این اساس، نماد $p \in P$ نشان دهنده یک دوره زمانی است. در این تحقیق، فرض بر این است که مسافران به

بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در خطوط راه‌آهن شهری.....

در ایستگاهی در مسیر رفت تخلیه کرده و با کمک سوزن خطوط، به مسیر برگشت فرستاده می‌شود.



شکل ۲. گردش قطار از مسیر رفت به مسیر برگشت جهت کاهش ازدحام مسافری در مسیر برگشت

مجموعه ایستگاه‌های کنترلی شامل نقاطی است که در آنها امکان برگشت قطار و یا عدم توقف قطار وجود دارد. ایستگاه‌هایی که قطارها در آنها مجاز به عدم توقف هستند با نماد S ($S \subseteq K$) نمایش داده می‌شود. همچنین مجموعه ایستگاه‌هایی که در آن قطارها امکان گردش مسیر و حرکت در مسیر مخالف را دارند نیز با نماد T ($T \subseteq K$) نشان داده می‌شود. متغیرهای تصمیم صفر و یک در مدل مدیریت اختلال شامل تعیین ایستگاه توقف/عبور برای هر قطار و نیز ایستگاه گردش مسیر است. جهت مدل سازی تصمیمات مدیریت اختلال در مدل شبیه سازی، متغیرهای تصمیم بر اساس تأمین قطار عبوری از هر ایستگاه از مسیرهای رفت ($r = 1$) یا برگشت ($r = 2$) بصورت زیر تعریف می‌شوند. همچنین زمان حرکت هر قطار از هر ایستگاه نیز متغیر تصمیم مربوط به بخش مدل زمانبندی مجدد حرکت قطارها است.

$$x_{ikr} = \begin{cases} 1 & \text{آمین قطار عبوری از ایستگاه } k \text{ در مسیر } r \text{ در آن ایستگاه توقف نداشته باشد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$y_{ikr} = \begin{cases} 1 & \text{آمین قطار عبوری در ایستگاه } k \text{ از مسیر } r \text{ گردش کند} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

۴. مدل بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی

بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی را می‌توان به عنوان فرآیندی از یافتن بهترین مقادیر متغیرهای ورودی از میان تمام جواب‌های شدنی بدون ارزیابی گسترده‌ی هر جواب، در یک مساله بهینه سازی تصادفی تعریف کرد [Carson and Maria, 1997]. در رویکرد فوق، از مدل شبیه سازی می‌توان به عنوان ابزاری برای تولید جواب یا ارزیابی جواب‌های حاصله از یک روش دیگر استفاده نمود. این ارزیابی جواب عمدتاً شامل

راهی انتخاب می‌شوند اما ممکن است در مواقعی نیز قطار در ایستگاه مبدا بدون سوارکردن مسافر اعزام شود. عدم توقف قطارها در برخی از ایستگاه‌ها می‌تواند در توزیع بهتر سرفاصله‌های زمانی حرکت بین قطارها، بسیار مفید و موثر باشد. در اختلالاتی مانند نقص فنی در سیستم ترمز یا حرکت قطار، که در این حالت قطار نمی‌تواند در ایستگاه‌ها به دلایل فنی توقف کند، با اطلاع رسانی به مسافری، قطار تنها در ایستگاه مقصد و انتهای مسیر توقف می‌کند و سایر مسافری با توجه به مسیر حرکت خود یا در ایستگاه فعلی و یا در ایستگاه‌های انتهایی مسیر از قطار خارج می‌شوند. در این استراتژی قطار در تعدادی یا تمام ایستگاه‌های میانی توقف نمی‌کند و در نتیجه با کاهش زمان سفر، زودتر به مقصد می‌رسد. اختلال و خرابی درب‌های قطار و عدم بازشدن آنها نیز موجب می‌شود قطار در ایستگاه‌ها توقف نکند و با فقط در ایستگاه‌های اصلی و یا در انتهای خط در پایانه‌ها که تیم فنی و تعمیرات حضور دارند، توقف داشته باشد.

بطورکلی در راه آهن شهری، عدم توقف قطارها در برخی از ایستگاه‌ها به سه دلیل شرایط ترافیکی شامل قطار و مسافر، شرایط فنی قطار و شرایط ایمنی، امنیتی ایستگاه یا مسیر است. مدیریت مرکز کنترل و فرمان وظیفه دارد که با توجه به تأخیرات و انحرافات موجود از برنامه اصلی، به منظور ایجاد تعادل و رعایت سرفاصله‌های زمانی ایمن و مناسب، دستور عدم توقف در یک یا چند ایستگاه را به راهبر قطار صادر نماید. همچنین در شرایط ازدحام شدید مسافری در یک ایستگاه خاص، مدیریت تصمیم می‌گیرد که توقف قطارها در یک یا چند ایستگاه با ضریب جذب مسافر کمتر نسبت به این ایستگاه خاص بطور موقت انجام نگیرد تا ازدحام مسافری در ایستگاه خاص به کمک ظرفیت خالی قطارها کاهش یابد.

تغییر مسیر و گردش قطارها از دیگر استراتژی‌های مورد جهت مدل‌سازی در خطوط مترو است. بازگرداندن و چرخش یک قطار از مسیر رفت به مسیر برگشت معمولاً با اهدافی نظیر توزیع مناسب سرفاصله زمانی حرکت بین قطارها در خط برگشت (و یا به دلیل اختلالی که در مسیر رفت رخ داده) و برای جلوگیری از ازدحام مسافری و تشکیل صفی از قطارها در مسیر رفت انجام می‌شود (شکل ۲). در این حالت، قطار مسافری را

قطار و ظرفیت باقیمانده قطار محاسبه می‌شود. در رابطه زیر مقدار n تعداد مسافری که داخل قطار قبل از پیاده شدن را نشان می‌دهد. در صورتی که مسافری بالقوه جهت سوار شدن از ظرفیت باقیمانده قطار $(C - n \cdot (1 - \rho_k^{(p)}))$ کمتر باشد، آنگاه تمامی این مسافری می‌توانند وارد قطار شوند و در غیراینصورت بخشی از مسافری باید روی سکو منتظر رسیدن قطار بعدی باقی بمانند.

$$B_k = \min\{C - n \cdot (1 - \rho_k^{(p)}), \tau\} \quad (5)$$

در نتیجه با توجه به حداکثر ظرفیت قطار، تعداد مسافری که روی سکو منتظر می‌مانند برابر با تفاضل تعداد مسافری بالقوه از مسافری که سوار بر قطار می‌شوند:

$$w = \tau - b \quad (6)$$

علاوه بر این، تعدادی از مسافری در داخل قطار در لحظه ترک از ایستگاه‌های بین راهی (غیر از پایانه) و نیز از ایستگاه پایانه بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$n = \begin{cases} n \cdot (1 - \rho_k^{(p)}) + b & \text{در سایر ایستگاه‌ها} \\ b & \text{در پایانه} \end{cases} \quad (7)$$

در این تحقیق متوسط مجموع زمان سفر و زمان انتظار مسافری روی سکوها به عنوان معیار ارزیابی سیستم در نظر گرفته شده است. با توجه به فرض نمایی بودن توزیع زمان بین دو ورود مسافری، پیدا کردن یک فرم بسته برای تابع هدف مساله (مجموع زمان سفر مسافری) بسیار دشوار است.

همانطور که توسط وانگ و همکاران تشریح شده، به حداقل رساندن مجموع زمان سفر و زمان انتظار مسافری، یک تابع هدف غیرخطی و غیر محدب است [Wang et al., 2013]. در اینجا، با توجه به ماهیت تصادفی و غیر خطی مساله بهینه‌سازی، روش مدل‌سازی ریاضی یک راه حل عملی نیست. با توجه به الگوی توقف-عبور قطارها، ممکن است برخی از مسافری برای رسیدن به مقصد، جلوتر از موعد از یک قطار پیاده شوند و باقی سفر خود را در داخل قطار دیگری سپری کنند. منظور از زمان سفر، مدتی است که مسافر در داخل وسیله نقلیه سپری می‌کند. در نتیجه دو کمیت مربوط به معیارهای "مجموع زمان سفر" و "مجموع زمان انتظار" مسافری دارای وابستگی نیستند و از طرفی می‌توان نشان داد که با بکارگیری استراتژی توقف-عبور، امکان کاهش همزمان زمان سفر و نیز زمان انتظار مسافری در

Error! Reference source not found. استفاده شده.

است. بر اساس مقادیر به روز رسانی شده برای متغیرهای مربوط به تعداد مسافری سوار شده (B_k) و پیاده شده (A_k) در ایستگاه k می‌توان زمان توقف قطار در ایستگاه را بدست آورد. نحوه محاسبه متغیر B_k در رابطه (5) تشریح شده است. متغیر A_k نیز بر اساس درصدی از مسافری داخل قطارها در ایستگاه k و در بازه p $(\rho_k^{(p)})$ و نیز تعداد مسافر موجود در قطار (n) بدست می‌آید.

حداقل زمان توقف قطارها در هر ایستگاه مستقل از حجم مسافر با نماد D_0 نمایش داده شده است. در عمل به دلیل تراکم مسافر ورودی و خروجی از قطار، زمان توقف قطار افزایش می‌یابد. زمان اضافه شده به زمان پایه توقف قطار در ایستگاه (D_1) به ترتیب برای هر مسافر ورودی و خروجی در ایستگاه با نمادهای D_2 و D_3 نشان داده می‌شود.

در شرایط ازدحام، تعداد مسافری بالقوه برای سوار شدن یا پیاده شدن از قطار مدت زمان توقف را افزایش می‌دهند. در نتیجه رابطه اصلی برای زمان توقف قطار در ایستگاه k (dw_k) از رابطه زیر بدست می‌آید. ذکر این نکته ضروری است که در صورتی که قطار از ایستگاهی بدون توقف عبور کند، زمان توقف این قطار در ایستگاه برابر با صفر خواهد شد.

$$dw_k = \max\{D_0, D_1 + D_2 * A_k + D_3 * B_k\} \quad (2)$$

۴-۱-۲ معادلات جریان مسافر

در این بخش، معادلات مربوط به متغیرهای جریان مسافری ورودی و خروجی به ایستگاه‌ها تشریح می‌شود. تعداد سواران بالقوه جهت سوار شدن به ایستگاه (T) برابر با تعداد مسافری منتظر بعد از اعزام قبلی (W) و تعداد مسافری جدیدی است (δ) که تا رسیدن قطار بعدی به ایستگاه می‌رسند.

$$\tau = w + \delta \quad (3)$$

برای محاسبه تعداد کل مسافری که در فاصله بین دو اعزام متوالی $(d_1$ و $d_2)$ به ایستگاه می‌رسند، از انتگرال‌گیری از تابع نرخ ورود استفاده می‌شود.

$$\delta = \int_{t=d_1}^{t=d_2} \lambda_k^{(t)} \cdot dt \quad (4)$$

چنانچه قطار در ایستگاه توقف داشته باشد، با توجه به محدودیت حداکثر ظرفیت قطار (C) ، تعداد مسافری که قادر به سوار شدن هستند (B_k) از روی نسبت خروج مسافری از داخل

استراتژی‌های توقف-عبور و یا گردش قطارها برای یکی از مسیرهای رفت یا برگشت است.

در گام اول از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر، یک مجموعه جواب‌های اولیه بصورت تصادفی تولید می‌شود. بر اساس یک قاعده ابتکاری، به عناصر ماتریس جواب مقادیر تصادفی ۰ و ۱ با احتمالات غیریکسان تخصیص می‌یابد. این قاعده ابتکاری به منظور افزایش همگرایی الگوریتم به سمت جواب‌های نزدیک به بهینه پیشنهاد شده است. مطابق با این قاعده، احتمال عبور یک قطار از یک ایستگاه بر اساس درصد نسبی نرخ ورود در آن ایستگاه در مقایسه با نرخ ورود مسافر در سایر ایستگاه‌ها است. هرچه نرخ ورود مسافر به یک ایستگاه بیشتر باشد، آنگاه عدم توقف قطار در آن ایستگاه می‌تواند تاثیر نامطلوبی در مقدار تابع هدف مسئله داشته باشد.

احتمال عدم توقف یک قطار در ایستگاه k در رابطه (1) تعریف شده است. به دلیل تغییرات نرخ ورود مسافر در طول زمان، این احتمال نیز متغیر بوده و در هر بازه زمانی ($p \in P$) بصورت جداگانه محاسبه می‌شود. هرچه این درصد برای یک ایستگاه بیشتر باشد، نشان دهنده این موضوع است که نرخ ورود نسبی بیشتری در این ایستگاه وجود دارد و در نتیجه در جواب بهینه، با احتمال کمتری قطار از ایستگاه فوق بدون توقف عبور می‌کند.

$$p(x_{ikr} = 1) = 1 - \frac{\lambda_k^{(p)}}{\sum_{k \in S} \lambda_k^{(p)}} \quad p \in P. \quad (1)$$

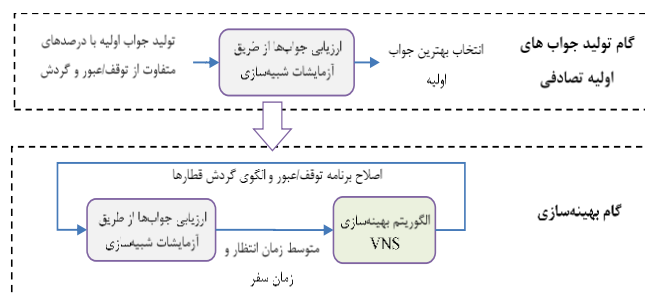
گام‌های بخش تولید جواب‌های اولیه تصادفی (BRS^V) در جدول زیر آورده شده است. در شروع الگوریتم، ابتدا جواب‌های کاملاً تصادفی برای الگوی توقف-عبور و نیز گردش مسیر قطارها تولید می‌شود. سپس در گام‌های بعدی الگوریتم، تعدادی جواب اولیه بر اساس قاعده ابتکاری گفته شده تولید می‌شوند. سپس جهت ارزیابی هر جواب، از اجرای مکرر مدل شبیه‌سازی و برآورد مقدار تابع هدف مساله استفاده می‌شود. بهترین جواب حاصل از الگوریتم تولید جواب‌های اولیه، به عنوان نقطه شروع الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در نظر گرفته می‌شود.

گام‌های الگوریتم تولید جواب‌های اولیه تصادفی BRS

سکوها وجود دارد. همچنین در تحقیقی از آلبرت و همکاران (۲۰۱۳) نشان داده شده است که مسئله زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها در رده مسائل با پیچیدگی محاسباتی $NP-complete$ قرار دارد [Albrecht et al., 2013]. در نتیجه در این تحقیق، رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی به عنوان یک روش جایگزین برای تولید جواب‌های نزدیک به بهینه و نیز ارزیابی استراتژی‌های مدیریت اختلال مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۲ رویکرد بهینه‌سازی

در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی استراتژی‌های ترکیبی مدیریت اختلال پیشنهاد شده است (شکل ۴). مرحله اول از الگوریتم تولید جواب‌های اولیه تصادفی است که بر اساس نرخ ورود نسبی مسافری به ایستگاه‌ها، انجام می‌شود. در مرحله دوم، از بهترین جواب بدست آمده از گام اول به عنوان یک نقطه شروع برای جستجوی همسایگی متغیر استفاده می‌شود. در ادامه به تفکیک بخش‌های مختلف رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی تشریح می‌شود.



شکل ۴. رویکرد پیشنهادی ترکیب بهینه‌سازی و مدل شبیه‌سازی

در حل مساله مدیریت اختلال

۴-۲-۱ تولید جواب‌های اولیه در گام پردازش مقدماتی

همانطور که در بخش قبل ذکر شد، هر جواب از مساله در قالب ماتریس‌های صفر و یک نمایش داده می‌شود. با توجه به اینکه تصمیمات توقف-عبور و نیز گردش قطارها برای مسیرهای رفت و برگشت بطور مستقل انجام می‌شود، در نتیجه از چهار ماتریس صفر و یک برای نمایش جواب‌های مساله و تصمیمات استراتژی‌های مدیریت اختلال استفاده می‌شود. هر ماتریس نشان دهنده مقادیر متغیرهای تصمیم برای یکی از

می‌گیریم. اگر جواب بهینه محلی از جواب اولیه X بهتر باشد آنگاه جستجو مجدداً با اولین ساختار همسایگی آغاز می‌شود و در غیر این صورت از ساختار همسایگی بعدی برای جستجو استفاده می‌شود. در الگوریتم پیشنهاد شده در این تحقیق، از یک مکانیزم تطبیقی برای ایجاد تعادل بین جستجوی محلی و جستجوی جهانی الگوریتم استفاده می‌شود. در واقع علاوه بر تغییر ساختار همسایگی که مطابق با منطق الگوریتم VNS انجام می‌شود، به تدریج محدوده جستجوی همسایگی کاهش یافته و از طرفی تعداد نقاط بیشتری در همسایگی بررسی می‌شوند. جستجوی همسایگی از طریق تبدیل مقادیر صفر به یک یا بالعکس برای مقادیر ماتریس‌های متغیرهای تصمیم انجام می‌شود. در صورت یافتن یک جواب همسایه مانند X' (در گام ۱۰)، می‌بایست تابع برازندگی برای این جواب محاسبه شود. با توجه به ماهیت تصادفی مسئله، لازم است این جواب چندین بار شبیه‌سازی شده و متوسط مقدار تابع هدف به عنوان برازندگی این جواب در نظر گرفته شود. در نتیجه در گام ۱۱ از الگوریتم VNS، جواب X' به تعداد Rep شبیه‌سازی می‌شود. جهت محدود نمودن جستجو، در طول فرآیند بهینه‌یابی شعاع جستجو (فاصله بین جواب فعلی و جواب‌های همسایه) و نیز تعداد نقاط همسایگی کاندید برای جستجو تغییر می‌کند. برای این منظور از نمادهای D_{Radios} به عنوان شعاع جستجو و R_{max} به عنوان تعداد جواب‌های همسایه ارزیابی شده در شعاع همسایگی استفاده می‌شود. ضریب β به منظور تعیین تعداد جواب‌های کاندید برای بررسی در شعاع همسایگی تعریف شده است. به تدریج در طول فرآیند جستجو، جهت تقویت‌سازی جواب‌ها بایستی تعداد جواب‌های بیشتری در همسایگی یک جواب خوب بررسی شوند. در واقع هر بار با یافتن یک جواب بهتر، ضریب β افزایش یافته و تعداد جواب‌های بیشتری در شعاع همسایگی بررسی می‌شوند. حداکثر شعاع همسایگی نیز که جواب‌ها تا حداکثر آن فاصله بررسی می‌شوند نیز با نماد D_{max} نمایش داده می‌شود. این پارامتر نیز بصورت هوشمند در طول فرآیند جستجو کاهش می‌یابد تا به تدریج جستجو محدودتری در فضای جواب و همسایگی جواب‌های خوب انجام شود. هر گاه جواب بهتری (x') در همسایگی یک جواب مانند X یافت شود، آنگاه جستجوی همسایگی از حداقل شعاع همسایگی ($D_{Radios} = 1$) آغاز می‌شود. در صورتی که جواب بهتر یافت

Biased Random Search ($popSize, x_0$)

```

1 Begin
2  $x_0 := \text{Random}(0,1)$  ;
3  $k := 1$  ;
4  $F_{best} := +\text{Inf}$ 
5 While  $k \leq popSize$  do
6  $f(x_k) := \text{Simulate}(Rep, x_k)$ ;
7 if  $f(x_k) < F_{best}$  then
8  $x_{best} := x_k$  ;
9  $F_{best} := f(x_k)$ ;
10 Endif
11  $k := k + 1$  ;
12  $x_k := \text{Biased-Random}(0,1)$  ;
13 EndWhile
14 Return ( $x_{best}, F_{best}$ ) ;
15 End.
```

۴-۲-۲ الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر VNS

فضای شدنی مساله در حالتی که تعداد اعزام‌ها برابر با n و تعداد ایستگاه‌هایی که در آن استراتژی‌های کنترل مانند توقف-عبور و یا گردش مسیر مجاز برابر با m باشد، متشکل از 2^{m*n} جواب است. این فضای شدنی بزرگ، دشواری‌های محاسباتی در یافتن جواب به بهینه را در مسایل با ابعاد واقعی نشان می‌دهد. در واقع استفاده از روش‌های حل دقیق برای حل مسایل مدیریت اختلال در راه آهن شهری، از کارایی محاسباتی لازم برخوردار نیست. همچنین مساله بهینه‌سازی توقف-عبور در رده مسایل NP-hard قرار دارد و عمده روش‌های حل کارا برای حل این مساله، فراابتکاری است [Liu et al. 2013]. در نتیجه در این تحقیق نیز از روش فراابتکاری جستجوی همسایگی متغیر استفاده شده است. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر (VNS) توسط ملادنویچ و هانسن برای مسائل بهینه‌سازی ترکیبی ارائه شد [Mladenović and Hansen, 1997]. این الگوریتم برای فرار از به دام افتادن در بهینه محلی، ساختار همسایگی را در حین فرآیند جستجو تغییر می‌دهد. در این الگوریتم باید به تعداد k_{max} ساختار همسایگی تعریف شود. اگر N_k بیانگر ساختار همسایگی k ام باشد، آنگاه $N_k(x)$ شامل مجموعه جواب‌های همسایه جواب x با k امین ساختار همسایگی است. جهت مطالعه روشهای مختلف جستجوی همسایگی متغیر به تحقیقی از هانسون و همکاران (۲۰۱۰) مراجعه شود [Hansen et al. 2010]. انتخاب ساختارهای همسایگی و ترتیب استفاده از آنها نقش اساسی در طراحی الگوریتم VND^۸ دارد. ساختار همسایگی اول را N_1 و x را به عنوان جواب اولیه در نظر

برای آزمایش روش پیشنهادی در این تحقیق، خط ۱ متروی تهران (از تجریش تا کهریزک) به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. با توجه حجم ترافیک بالای این مسیر، اطلاعات موجود در مورد بروز یک سانحه واقعی در این مسیر و نیز ابعاد بزرگ آن از نظر تعداد سفرهای روزانه و نیز اندازه ناوگان، خط ۱ به عنوان یک مثال عددی مناسب جهت اعتبارسنجی رویکرد بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی انتخاب شده است. این خط متشکل از ۲۹ ایستگاه بین راهی است (شکل ۵). مقادیر پارامترهای ورودی مدل شبیه سازی شامل اطلاعات مشخصات ناوگان و محدودیت های عملیاتی در جدول ۲ خلاصه شده است. مسافت بین ایستگاه های خط ۱ بر حسب متر در جدول ۳ مشخص شده است. در شکل ۶ به ازای چند ایستگاه منتخب، تغییرات حجم مسافری و ورودی به خط ۱ در طول ساعات شبانه روز نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ایستگاه های با شماره ۲۱ و ۲۵ دارای بیشترین حجم تقاضای سفر هستند. همچنین ساعت اوج تقاضا در بازه [7:00 8:00] است. مجموعه ایستگاه های مجاز برای عبور بدون توقف در مسیر رفت (تجریش به کهریزک) شامل $S_1 = \{8, 20, 22, 26\}$ (ایستگاه های همت، شوش، خزانه، و باقرشهر) و در مسیر برگشت (کهریزک به تجریش) شامل $S_1 = \{3, 8, 14, 26\}$ (ایستگاه های شاهد، خزانه، امام خمینی و قلهک) است. همچنین ایستگاه های مجاز برای گردش قطارها در مجموعه $T = \{7, 12, 18, 24\}$ شامل ایستگاه های حقانی، هفت تیر، خیام و جوانمرد، آورده شده است. در مطالعه موردی، فرض شده است که اختلال در حد فاصل بین ایستگاه طالقانی-دروازه دولت در زمان ۸:۳۰ دقیقه صبح رخ داده است. توزیع زمان رفع مسدودی بصورت توزیع یکنواخت گسسته به همراه زمان های محتمل، خوش بینانه و بدبینانه و احتمالات مربوطه در نظر گرفته می شود. در حالت بدبینانه رفع مسدودی با احتمال ۰,۲، به اندازه ۶۰ دقیقه به طول می انجامد. در محتمل ترین حالت، مدت زمان مسدودی با احتمال ۰,۵، به اندازه ۳۰ دقیقه و در بهترین حالت با احتمال ۰,۳، به اندازه ۱۰ دقیقه خواهد بود. با توجه به توزیع احتمالی فوق، به طور متوسط زمان رفع مسدودی خط به اندازه ۳۰ دقیقه خواهد شد.

نشود، آنگاه الگوریتم جستجوی همسایگی، به تدریج شعاع جستجو را افزایش داده تا جواب هایی در فاصله دورتر را بررسی کند. فاصله بین جواب ها بر اساس تابع فاصله همینگ و از طریق شمارش عناصر غیرمشترک (صفر یا یک) محاسبه می شود.

گام های الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر VNS

VNS ($R_{max}, \beta_0, x_0, D_{max}, MaxIter$)

```

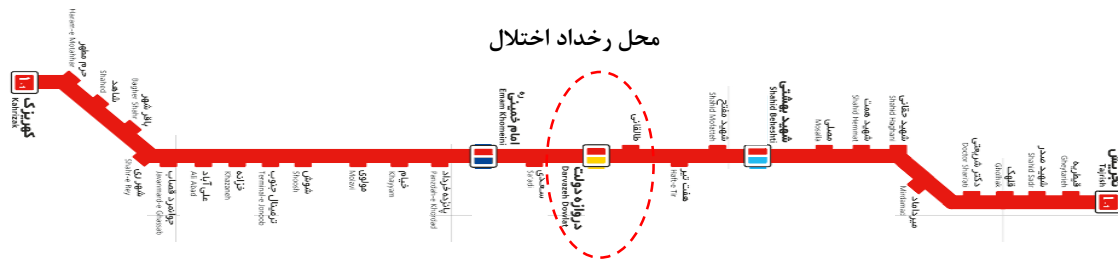
1 Begin
2  $x := x_0$ ;
3  $iter := 1$ ;
4  $k := 1$ ;
5  $\beta := \beta_0$ 
6  $D_{Radios} := 1$ ;
7  $R_{max} := D_{Radios} * \beta$ ;
8 While  $iter \leq MaxIter$  do
9   While  $k \leq R_{max}$  do
10     $x' := \text{Local Search}(x, D_{Radios})$ ;
11     $f(x') := \text{Simulate}(Rep, x')$ ;
12     $iter := iter + 1$ ;
13    If  $f(x') < f(x)$  then
14       $x_{best} := x'$ ;
15       $k := 1$ ;
16       $D_{Radios} := 1$ ;
17       $\beta := \text{update}(\beta, iter)$ ;
18       $D_{max} := \text{update}(D_{max}, iter)$ ;
19       $R_{max} := D_{Radios} * \beta$ ;
20    Else
21       $k := k + 1$ ;
22    EndWhile
23     $k := 1$ ;
24     $D_{Radios} := \max(D_{max}, D_{Radios} + 1)$ ;
25     $R_{max} := D_{Radios} * \beta$ ;
26  EndWhile
27  Return ( $x_{best}$ );
28 End.

```

۵. نتایج مطالعه موردی

در راه آهن شهری تهران به دلایل مختلف از جمله خرابی و نقص فنی قطارها، تغییرات پیش بینی نشده تقاضای سفر و نیز مسدودی خط، خدمت رسانی به مسافری با مشکل مواجه می شود. در این تحقیق مدل های شبیه سازی و روش های بهینه یابی توسعه داده شده اند به نحوی که زمان انتظار و سفر مسافری را بعد از رخداد اختلال به حداقل برسانند. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی روش پیشنهادی، چند سناریوی اختلال از نوع مسدودی موقتی بلاک در بخشی از شبکه متروی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در خطوط راه آهن شهری.....



شکل ۵. خط ۱ متروی تهران

جدول ۲. مقادیر پارامترهای ورودی مدل شبیه سازی

D_3	D_2	D_1	D_0	α	t_{min}	dw_{min}	C	σ^2	V_{max}	V_{ave}	h_{min}	NT	θ	N	M
۰,۰۷	۰,۰۸	۰,۵	۱۵	۱۵ ثانیه	۹۰	۳۰	۲۰۰۰	۳۰	۸۰	۵۰	۴	۷	۶۰	۲۹	۲۹
ثانیه															
کیلومتر/ساعت															
دقیقه															

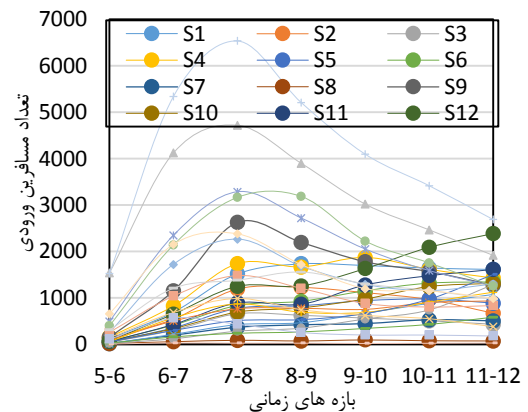
جدول ۳. مسافت بین ایستگاه های خط ۱

شماره بلاک	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
مسافت (متر)	۱۰۲۶	۸۷۹	۱۳۳۷	۱۳۱۲	۱۳۳۵	۱۰۹۶	۹۳۴	۸۹۹	۱۰۱۳	۷۲۶	۹۳۶	۹۶۷	۶۲۱	۸۸۹
شماره بلاک	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸
مسافت (متر)	۱۱۹۴	۸۶۴	۵۳۳	۶۰۹	۱۱۶۸	۷۶۹	۱۱۳۷	۱۲۵۰	۲۱۹۹	۱۶۹۱	۴۷۰۶	۲۴۰۲	۱۰۷۵	۱۹۰۱

انتظار و سفر مسافری استفاده می‌شود. در در استراتژی دوم، تنها از راهکار گردش قطارها قبل از رسیدن به پایانه استفاده می‌شود. در استراتژی چهارم نیز ترکیب استراتژی های توقف-عبور و گردش مسیر استفاده خواهد شد.

۱. بدون استراتژی کنترلی (N)
۲. استراتژی توقف-عبور (SS^q)
۳. استراتژی گردش مسیر (ST^1)
۴. استراتژی ترکیبی توقف-عبور و گردش مسیر (C)

جهت اجرای الگوریتم بهینه‌سازی VNS از تنظیم مقادیر پارامترها بصورت زیر استفاده شده است. جمعیت جواب‌های اولیه تصادفی برابر با $popSize = 200$ تعداد تکرارهای الگوریتم VNS برابر با ۵۰۰۰، مقادیر اولیه $\alpha_0 = 10$ و شعاع همسایگی $D_{max} = 10$ در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی به ازای سناریوهای مختلف از مدت زمان رفع اختلال (با ۹۵٪ اطمینان) در جدول ۴ آورده شده است. مطابق نتایج



شکل ۶. تغییرات تعداد مسافری ورودی به خط ۱

۱-۵ ارزیابی سناریوهای اختلال

تعریف استراتژی های مدیریت اختلال بصورت زیر انجام شده است. در سناریوی اول، از هیچ استراتژی کنترلی برای کاهش زمان سفر و انتظار مسافری استفاده نمی‌شود. در استراتژی دوم، تنها از سیاست عبور-توقف برای کاهش زمان

حاصل از استراتژی ترکیبی برای معیار "متوسط مجموع زمان سفر و زمان انتظار هر مسافر" در مقایسه با استراتژی های گردش مسیر و توقف-عبور به ترتیب برابر با ۱۵,۶٪ و ۰,۴۳٪ حاصل شده است.

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که به دلیل طولانی بودن مسیر، الگو و توزیع خاص تقاضای سفر در طول مسیر، استراتژی گردش مسیر تاثیر بیشتری در کاهش زمان های انتظار و سفر مسافری در مقایسه با استراتژی توقف-عبور داشته است. در واقع با گردش قطارها در طول مسیر، سرفاصله زمانی بین قطارها با نظم بهتری توزیع شده و زمان های انتظار مسافری بصورت محسوسی کاهش یافته است.

درصد بهبود حاصل از استراتژی گردش مسیر در مقایسه با استراتژی توقف-عبور از نظر متوسط مقدار تابع هدف برابر با ۱۴,۷٪ است. نتایج الگوریتم بهینه سازی (VNS) نشان داده است که با بکارگیری همزمان استراتژی های کنترلی توقف-عبور و گردش مسیر می توان از مزایای هر کدام استفاده نمود و مدیریت موثرتری بعد از رخداد اختلال داشت.

نکته جالب توجه این است که بکارگیری استراتژی گردش مسیر موجب افزایش واریانس مقدار تابع هدف در مقایسه با حالت بدون کنترل (N) شده است. این در حالی است که با احتمال ۹۵٪ کران بالا و پایین مقدار تابع هدف (LB و UB) به ازای این استراتژی از مقدار مشابه آن برای حالت بدون کنترل (وضعیت موجود) در شرایط بسیار بهتری قرار دارد.

جدول ۵. نتایج ارزیابی بهترین جواب بدست آمده از الگوریتم

VNS برای استراتژی های مختلف مدیریت اختلال در مدل

شبیه سازی (با ۹۵٪ اطمینان)

راهکار	متوسط مجموع زمان انتظار و سفر مسافری (ثانیه)	انحراف استاندارد (ثانیه)	کران پایین (ثانیه)	کران بالا (ثانیه)
N	۱۸۲۰,۷	۲۱,۲	۱۸۱۰,۸	۱۸۳۰,۶
SS	۱۸۱۴,۵	۲۱,۰	۱۸۰۲,۸	۱۸۲۶,۳
ST	۱۵۴۸,۰	۱۱۷,۷	۱۵۲۴,۹	۱۵۷۱,۱
C	۱۵۴۱,۳	۹۵,۱	۱۵۲۲,۷	۱۵۶۰,۰

بدست آمده، متوسط مقدار تابع هدف به ازای سناریوهای مدت اختلال $\omega = 10$ ، $\omega = 30$ و $\omega = 60$ به ترتیب به اندازه ۰,۶۱٪، ۳,۳۷٪ و ۱۸,۵۶٪ نسبت به حالت عادی (بدون اختلال) افزایش یافته است. همانطور که انتظار می رود، با افزایش مدت زمان رفع اختلال، واریانس مقدار تابع هدف نیز افزایش یافته است. در حالتی که مدت زمان رفع اختلال بصورت احتمالی و با متوسط ۳۰ دقیقه باشد، واریانس مقدار تابع هدف حدود ۶ برابر بزرگتر از حالتی است که مسدودی خط دقیقاً برابر با ۳۰ دقیقه به طول بیانجامد.

جدول ۴. نتایج شبیه سازی سناریوهای اختلال (۹۵٪ اطمینان)

مدت اختلال (دقیقه)	متوسط مجموع زمان انتظار و سفر مسافری (ثانیه)	انحراف استاندارد (ثانیه)	کران پایین (ثانیه)	کران بالا (ثانیه)
۰	۲۹,۳۶	۰,۳۰	۲۹,۲۷	۲۹,۴۴
۱۰	۲۹,۵۴	۰,۲۸	۲۹,۴۶	۲۹,۶۲
۳۰	۳۰,۳۵	۰,۳۵	۳۰,۱۸	۳۰,۵۱
۶۰	۳۴,۸۰	۰,۹۰	۳۴,۵۵	۳۵,۰۵
احتمالی با میانگین ۳۰	۳۱,۲۵	۲,۱۱	۳۰,۶۷	۳۱,۸۴

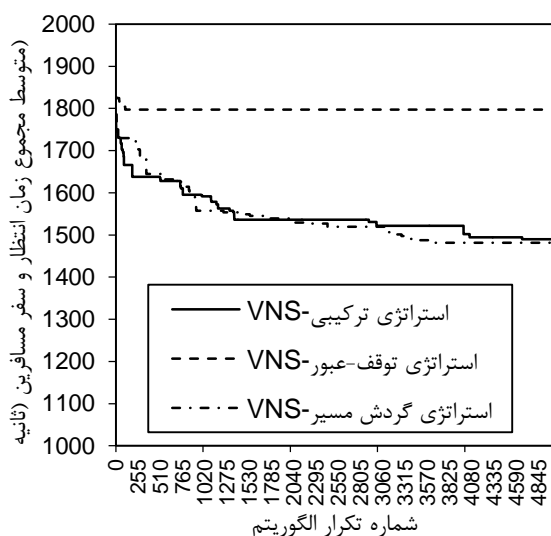
۲-۵ ارزیابی راهکارهای مدیریت اختلال در شرایط

قطعی

نتایج حاصل از الگوریتم VNS در حالت مسدودی خط با زمان برآورد متوسط (۳۰ دقیقه) در جدول ۵ آورده شده است. در این جدول بهترین جواب حاصل از الگوریتم برای ۱۰۰ تکرار شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است و شاخص های آماری آن ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد، جواب حاصل از استراتژی کنترلی ترکیبی (C) کمترین مقدار متوسط تابع هدف را در مقایسه با سایر روش های مدیریت اختلال به همراه داشته است.

میزان کاهش مقدار متوسط تابع هدف در مقایسه با حالت بدون کنترل (N) برابر با ۱۵,۳۴٪ بوده است. این درصد کاهش نشان دهنده کارایی و تاثیر مثبت مدل پیشنهادی مدیریت اختلال در کاهش زمان های سفر و انتظار مسافری است. بر اساس خروجی های مدل بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی، میزان بهبود

بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در خطوط راه‌آهن شهری.....



شکل ۷. گراف همگرایی الگوریتم VNS به ازای استراتژی های

مدیریت اختلال (در حالت ثابت بودن مدت زمان اختلال)

مطابق عملکرد جستجوی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در فضای جواب، اجرای الگوریتم VNS جهت بهینه‌سازی استراتژی ترکیبی (C) سرعت همگرایی بیشتری در مقایسه با سایر استراتژی های کنترلی داشته است. در نتیجه بکارگیری استراتژی ترکیبی مدیریت اختلال (C) از کارایی و اثربخشی بیشتری در مقایسه با سایر بکارگیری استراتژی های مدیریت اختلال (ST و SS) برخوردار است.

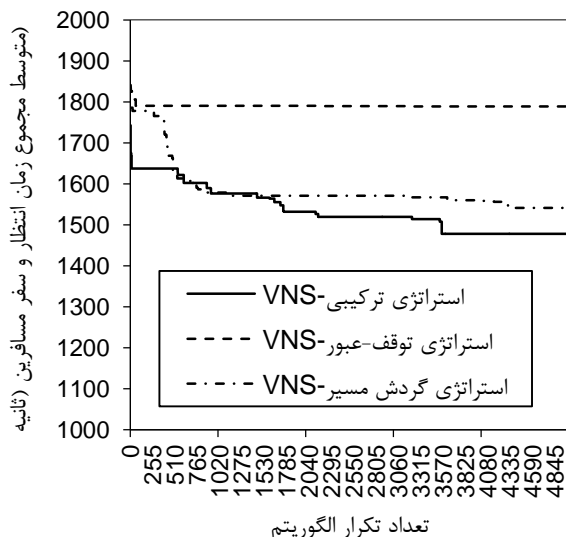
۳-۵ ارزیابی استراتژی های مدیریت اختلال در شرایط

تصادفی

در این بخش، نتایج حاصل از الگوریتم VNS در حالت مسدودی خط با زمان تصادفی در جدول ۶ آورده شده است. بهترین جواب حاصل از الگوریتم VNS برای ۱۰۰ تکرار شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته و شاخص های آماری مربوطه برآورد شده است. همانطور که نتایج شبیه سازی نشان می دهد، بکارگیری استراتژی ترکیبی مدیریت اختلال (C) منجر به جوابی با کمترین مقدار متوسط تابع هدف شده است. میزان کاهش مقدار متوسط تابع هدف در مقایسه با وضعیت موجود و یا به عبارتی حالت بدون کنترل (N) برابر با ۱۳٫۸۳٪ بوده است. میزان بهبود حاصل از استراتژی ترکیبی (C) برای معیار "متوسط زمان سفر و انتظار مسافران" در مقایسه با استراتژی های گردش مسیر (ST) و توقف-عبور (SS) به ترتیب برابر با ۱۳٫۶۲٪ و

در صورت بروز یک اختلال غیرمنتظره، ارائه یک برنامه زمان‌بندی مجدد در کوتاه‌ترین زمان ممکن به منظور کاهش نارضایتی مسافران بسیار مهم است. بنابراین، نرخ همگرایی سریع‌تر در نتایج یک الگوریتم، نشان‌دهنده برتری آن در یافتن یک راه‌حل بهتر و کاربردی در زمان واقعی برای حل مسئله زمان‌بندی مجدد حرکت قطارها است. با نمایش کیفیت راه‌حل بدست آمده از الگوریتم فراابتکاری در طول زمان، می‌توان بستر مناسبی برای تجزیه و تحلیل همگرایی الگوریتم‌های محاسباتی ارائه نمود. پروفایل جستجوی فضای جواب و بهترین جواب بدست آمده از الگوریتم VNS با استراتژی های مختلف مدیریت اختلال، در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج قبلی، این گراف همگرایی الگوریتم در حالت قطعی بودن مدت زمان اختلال ارائه شده است. نتایج محاسباتی حاصل از الگوریتم VNS نشان می‌دهد که روش حل پیشنهادی توانسته است راه‌حل‌های نزدیک به بهینه را در حالتی که از استراتژی ترکیبی (C) استفاده می‌شود، در زمانی کوتاه‌تر در مقایسه با سایر استراتژی ها پیدا کند. همچنین سرعت همگرایی الگوریتم VNS بطور قابل ملاحظه ای در شرایطی که از استراتژی گردش مسیر استفاده می‌شود، نسبت به استراتژی توقف-عبور تأثیر بیشتری بر کاهش تابع هدف داشته است. این موضوع نشان دهنده این است که در مسئله مورد مطالعه، به دلیل مکان رخداد اختلال، اصلاح برنامه گردش قطارها موثرتر از بهینه سازی استراتژی توقف-عبور است. به منظور سنجش سرعت همگرایی الگوریتم VNS در بهینه سازی استراتژی های کنترلی، گراف همگرایی آن در ۵۰۰۰ تکرار از الگوریتم ترسیم شده است (شکل ۷).

مدت زمان رفع اختلال در نظر گرفته شود، استراتژی ترکیبی می‌تواند در کاهش زمان انتظار مسافری و زمان سفر کل اثربخشی بیشتری داشته باشد.



شکل ۸. گراف همگرایی الگوریتم VNS به ازای استراتژی‌های مختلف مدیریت اختلال (در حالت مدت احتمالی زمان اختلال)

۶. نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در متروی شهری روزانه اختلالات کوچک و بزرگی رخ می‌دهند که افزایش هزینه‌های کنترل سیستم و کاهش سطح خدمت ارائه شده به مسافری را به دنبال دارد. استفاده از مدل‌ها و روش‌های حل سریع و کارا جهت مدیریت اختلال می‌تواند صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان‌های انتظار و سفر مسافری، کاهش هزینه‌های عملیاتی ترمیم اختلال، افزایش ایمنی سفر و بهبود سطح خدمت را به همراه داشته باشد. در این تحقیق، مساله بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در راه‌آهن شهری مورد مطالعه قرار گرفت. دو استراتژی توقف-عبور و گردش مسیر به عنوان استراتژی‌های مجاز جهت مدیریت اختلال در مساله شناسایی و یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای کاهش زمان‌های انتظار و سفر مسافری بعد از رخداد اختلال ارائه شد. مسدودی موقتی بلاک بین دو ایستگاه به عنوان عامل اختلال در حرکت قطارها مدنظر قرار گرفته است. در مدل شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی مساله شامل زمان‌های سیر احتمالی، نرخ ورود تصادفی مسافری به ایستگاه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف در طول روز، نسبت خروج احتمالی مسافری از قطارها در ایستگاه‌ها و نیز زمان احتمالی رفع اختلال

۹۳٪ بدست آمده است. همچنین واریانس مقدار تابع هدف برای جواب حاصل از استراتژی گردش مسیر از سایر استراتژی‌های مدیریت اختلال کمتر بوده و در نتیجه استواری بیشتر این رویکرد را در شرایط عدم قطعیت در مدت زمان رفع اختلال نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج الگوریتم VNS برای استراتژی‌های مختلف

مدیریت اختلال در مدل شبیه‌سازی (با ۹۵٪ اطمینان)

استراتژی مدیریت اختلال	متوسط مجموع زمان انتظار و سفر مسافری (ثانیه)	انحراف استاندارد (ثانیه)	کران پایین (ثانیه)	کران بالا (ثانیه)	N
SS	۱۸۷۰٫۴	۱۱۸٫۷	۱۸۴۷٫۲	۱۸۹۳٫۷	۱۹۱۰٫۲
ST	۱۶۳۰٫۹	۱۰۱٫۵	۱۶۰۲٫۷	۱۶۵۹٫۰	۱۸۴۰٫۱
C	۱۶۱۵٫۷	۱۰۵٫۴	۱۵۹۵٫۱	۱۶۳۶٫۴	۱۲۶٫۳

جهت ارزیابی سرعت همگرایی الگوریتم در حالت تصادفی بودن مدت زمان مسدودی خط، گراف همگرایی الگوریتم VNS برای بهینه‌کردن استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری از ناوگان در شکل ۸ ترسیم شده است. الگوریتم VNS با استراتژی ترکیبی (C) بعد از حدود ۳۶۰۰ تکرار به همگرایی رسیده است. همچنین بر اساس خروجی‌های مدل بهینه‌سازی، الگوریتم VNS در شرایطی که تنها از استراتژی توقف-عبور استفاده می‌کند، از کارایی لازم برای حل مسئله مدیریت اختلال برخوردار نیست. بر اساس نتایج بدست آمده، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر توانسته است استراتژی ترکیبی (C) را با سرعت همگرایی بیشتری در مقایسه با سایر استراتژی‌های کنترلی به جواب جواب بهینه سوق دهد. با توجه به لزوم پاسخ سریع و اتخاذ تصمیمات کنترلی در زمان محدود، الگوریتم VNS توانسته است با بهینه‌سازی یک مدل ترکیبی متشکل از استراتژی‌های توقف-عبور و نیز گردش مسیر، متوسط زمان انتظار و سفر هر مسافر را در زمان معقول به حداقل برساند. در نتیجه بکارگیری استراتژی ترکیبی (C) مدیریت اختلال از کارایی و اثربخشی بیشتری در مقایسه با سایر استراتژی‌های مدیریت اختلال (استراتژی‌های ST و SS) برخوردار است. نتایج این مطالعه موردی نشان می‌دهد که در شرایطی که عدم قطعیت در

4. Variable Neighborhood Search
5. First In First Out
6. Enterprise Dynamics
7. Biased Random Search
8. Variable Neighborhood Decent
9. Skip and Stop
10. Short-Turn

۸. مراجع

-بهبهانی، حمید، افندی زاده، شهریار و رحیم اف، کامران (۱۳۸۷) "تحلیل زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی (مطالعه موردی متروی تهران)". پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره اول، ص ۱۵-۳۰.

-بهبهانی، حمید، افندی زاده، شهریار و رحیم اف، کامران (۱۳۸۷) "بهینه‌سازی مدل تأخیر مسافران مترو با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری (MADM) چند شاخصه"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال پنجم، شماره سوم، ص ۲۳۳-۲۴۸.

-حسن نایبی، عرفان، حسینی، سید رسول، مردانی، سهیل و ساجدی نژاد، آرمان (۱۳۹۱) "نرم افزار زمانبندی حرکت قطارها SIMARail مبتنی بر رویکرد بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی"، یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران.

حسن نایبی، عرفان، ساجدی نژاد، آرمان، مردانی، سهیل و طاهری فر، مرتضی (۱۳۹۳) "بهینه‌سازی سرفاصله زمانی حرکت قطارها در خطوط مترو با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی"، شانزدهمین همایش بین‌المللی حمل و نقل ریلی، تهران، انجمن مهندسی حمل و نقل ریلی ایران.

-خان‌محمدی، سهراب؛ صندیدزاده، محمد علی و صالحی، پژمان (۱۳۹۲) "هوشمندسازی ترافیک خط یک متروی تهران با استفاده از منطق فازی"، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران.

-خطیبی، اصغر، خاتمی فیروزآبادی، سید محمد علی و جوانشیر حسن (۱۳۹۱) "مدلی برای کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های متقاطع خطوط متروی تهران"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران.

است. برای بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال، از روش جستجوی همسایگی متغیر استفاده شد و از مدل شبیه‌سازی نیز به منظور ارزیابی جواب‌های حاصل از الگوریتم و برآورد مقدار تابع هدف استفاده گردید. مدل شبیه‌سازی برای دو حالت تصادفی بودن زمان مسدودی خط و نیز در حالت زمان متوسط برای رفع مسدودی، مورد استفاده قرار گرفت و بهترین جواب‌های حاصل از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای هر یک از استراتژی‌های منفرد و ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور شناسایی استراتژی موثر برای کاهش زمان‌های انتظار و سفر مسافری، هر یک استراتژی‌های توقف-عبور و گردش مسیر بصورت جداگانه و نیز بصورت ترکیبی در مدل بهینه‌سازی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج خروجی حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی روی خط ۱ راه آهن شهری تهران نشان داد که استفاده از استراتژی گردش مسیر به دلیل شکل خاص تقاضای سفر در طول مسیر، از کارایی و اثربخشی بیشتری در مقایسه با استراتژی توقف-عبور برای کاهش مقدار متوسط تابع هدف برخوردار است. همچنین استفاده از ترکیب استراتژی‌های فوق موجب یافتن جواب‌های بهتر در زمان کوتاه‌تر برای مساله شده است. میزان کاهش متوسط مجموع زمان‌های انتظار و زمان سفر مسافری به ازای جواب بدست آمده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در مقایسه با حالت بدون کنترل برابر با ۱۴٪ بدست آمده است که نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در حل مساله مدیریت اختلال در خطوط راه آهن شهری است.

در تحقیقات آتی می‌توان مدل‌سازی مساله را به یک شبکه ریلی با ایستگاه‌های تقاطعی توسعه داد. مطالعه سایر عوامل اختلال مانند تقاضای پیش‌بینی نشده در بخشی از مسیر نیز می‌تواند در تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد. همچنین به منظور کاهش زمان حل مساله، مطالعه الگوهای مکانی و زمانی تقاضای سفر می‌تواند در انتخاب استراتژی‌های مناسب مدیریت اختلال قبل از شروع بهینه‌سازی مفید باشد. در نظر گرفتن سایر استراتژی‌های مدیریت اختلال مانند توقف موقتی و اعزام قطارهای فوق‌العاده نیز از دیگر زمینه‌های توسعه مدل مدیریت اختلال در راه آهن شهری است.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Discrete Event Simulation
2. Branch and Bound
3. Branch and Cut

analysis”, *Transportation Research Part A*, Vol. 31, No. 1, pp. 69-70.

-Eberlein, X. J., Wilson, N. H., Barnhart, C. and Bernstein, D. (1998) “The real-time deadheading problem in transit operations control”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 32, No. 2, pp. 77-100.

-Eberlein, X. J., Wilson, N. H. and Bernstein, D. (2001) “The holding problem with real-time information available”, *Transportation Science*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-18.

-Ghoneim, N. S. A. and Wirasinghe, S. C. (1986) “Optimum zone structure during peak periods for existing urban rail lines”. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 20, No. 1, pp. 7-18.

-Grube, P., Núñez, F. and Cipriano, A. (2011) “An event-driven simulator for multi-line metro systems and its application to Santiago de Chile metropolitan rail network”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, No. 1, pp. 393-405.

-Hansen, P. and Mladenović, N. (2014) “Variable neighborhood search”, *Search Methodologies: Springer*, pp. 313-337.

-Jamili, A. and Aghaee, M. P. (2015) “Robust stop-skipping patterns in urban railway operations under traffic alteration situation”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, No. 61, pp.63-74.

-Jin, J. G., Teo, K. M. and Sun, L. (2013) “Disruption response planning for an urban mass rapid transit network”, Paper read at Transportation Research Board, 92nd Annual Meeting, Washington DC.

-Juan, A. A., Faulin, J., Grasman, S. E., Rabe, M. and Figueira, G. (2015) “A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems”, *Operations Research Perspectives*, Vol. 2, No. 1, pp. 62-72.

-Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X. and Wang, B. (2015) “A practical model for last train

-سجادی، سید جواد (۱۳۸۷) “زمانبندی حرکت قطارها در شبکه متروی تهران با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری” پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

-صالحی، پژمان (۱۳۹۳) “طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم دانش بنیان جهت کنترل زمان اعزام قطارها در ترافیک سامانه قطارهای سریع‌السیر درون شهری و حومه با رویکرد توجه به ازدحام مسافری در ایستگاه‌های ریلی (مطالعه موردی: نیمه جنوبی خط یک متروی تهران)، اولین همایش ملی راه آهن سریع‌السیر در ایران، تهران.

-نصیریان، فرزانه و رنجبر، محمد (۱۳۹۲) “زمانبندی اتوبوسهای درون شهری با هدف حداقل کردن زمان انتظار مسافری”، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران.

-Albrecht, T. (2009) “Automated timetable design for demand-oriented service on suburban railways”. *Public Transport*, Vol. 1, No. 1, pp. 5-20.

-Canca, D., Barrena, E., Laporte, G. and Ortega, F.A. (2014) “A short-turning policy for the management of demand disruptions in rapid transit systems”, *Annals of Operations Research*, Vol. 246, No. 1-2, pp. 1-22.

-Canca, D., Barrena, E., Zarzo, A., Ortega, F. and Algaba, E. (2012) “Optimal train reallocation strategies under service disruptions”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 54, No. 1, pp. 402-413.

-Carson, Y. and Maria, A. (1997) “Simulation optimization: methods and applications”, *Proceedings of the 29th conference on winter simulation*, pp. 118-126, IEEE Computer Society.

-Ding, Y. and Chien, S. (2001) “Improving transit service quality and headway regularity with real-time control”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1760, pp. 161-170.

-Eberlein, X. J. (1997) “Real-time control strategies in transit operations: Models and

Computer-aided Systems in Public Transport: Springer, pp. 319-337.

-Shen, S. (2000) "Integrated real-time disruption recovery strategies: A model for rail transit systems", Massachusetts Institute of Technology, USA.

-Shen, S. and Wilson, N. H. (2001) "An optimal integrated real-time disruption control model for rail transit systems", In Computer-aided scheduling of public transport: Springer, pp. 335-363.

-Simulation Notes Europe (SNE) ARGESIM/ASIM Pub., TU Vienna 22 (2): pp. 69-76.

-Tavakkoli-Moghaddam, R., Razie, Z. and Tabrizian, S. (2015) "Solving a bi-objective multi-product vehicle routing problem with heterogeneous fleets under an uncertainty condition", International Journal of Transportation Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 207-225.

Ullrich, O., Lückerath, D., Franz, S. and Speckenmeyer, E. (2012) "Simulation and optimization of Cologne's tram schedule", Simulation Notes Europe, Vol. 22, No. 2, pp. 69-76.

-Ullrich, O., Lückerath, D. and Speckenmeyer, E. (2013) "A robust schedule for Montpellier's Tramway network", Technical Report, Univ. Köln, 17 p.

-Wang, Y., De Schutter, B., van den Boom, T., Ning, B. and Tang, T. (2013) "Real-time scheduling for single lines in urban rail transit systems", Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2013 IEEE International Conference, pp. 1-6.

-Yin, J., Tang, T., Yang, L., Gao, Z. and Ran, B. (2016) "Energy-efficient metro train rescheduling with uncertain time-variant passenger demands: An approximate dynamic programming approach", Transportation Research Part B: Methodological, No. 91, pp.178-210.

rescheduling with train delay in urban railway transit networks", Omega, No. 50, pp.29-42.

-Koutsopoulos, H. and Wang, Z. (2007) "Simulation of urban rail operations: Application framework", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.

-Kuster, J., Jannach, D. and Friedrich, G. (2009) "Extending the RCSP for modeling and solving disruption management problems", Applied Intelligence, Vol. 31, No. 3, pp. 234-253.

-Liu, Z., Yan, Y., Qu, X. and Zhang, Y. (2013) "Bus stop-skipping scheme with random travel time", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 35, No. 2, pp. 46-56.

-Middelkoop, D. and Bouwman, M. (2001) "Simone: large scale train network simulations", Paper read at Proceedings of the 33rd Conference on Winter Simulation.

-Mladenović, N. and Hansen, P. (1997) "Variable neighborhood search", Computers & Operations Research, Vol. 24, No. 11, pp. 1097-1100.

-O'Dell, S. W. (1997) "Optimal control strategies for a rail transit line", Massachusetts Institute of Technology, USA.

-O'Dell, S. W. and Wilson, N. H. (1999) "Optimal real-time control strategies for rail transit operations during disruptions", Computer-aided Transit Scheduling: Springer, pp. 299-323.

-Osuna, E. and Newell, G. (1972) "Control strategies for an idealized public transportation system", Transportation Science, Vol. 6, No. 1, pp. 52-72.

-Puong, A. (2001) "A real-time train holding model for rail transit systems, Massachusetts Institute of Technology, USA.

-Puong, A. and Wilson, N. H. (2008) "A train holding model for urban rail transit systems",

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



سیدحسام الدین ذگردی استاد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، مدرک دکترای خود را از دانشگاه توکیو ژاپن در سال ۱۹۹۴ دریافت کردند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل 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 دکترای خود را از دانشگاه ویرجینیای آمریکا در سال ۱۹۹۲ دریافت کرد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل هوش مصنوعی، سیستم‌های خبره، برنامه ریزی انرژی، الگوریتم‌های فراابتکاری و بهینه سازی است.



مسعود یقینی، دانشیار دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت تهران است. وی دکترای مهندسی و برنامه ریزی حمل و نقل ریلی خود را از کشور چین در سال ۲۰۰۲ اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل مسائل برنامه ریزی حمل و نقل ریلی، مسایل بهینه سازی شبکه، شبکه‌های چند کالایی، طراحی شبکه، تخصیص-جانمایی، پوشش مجموعه‌ای، 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.

