



زمانبندی مجدد حرکت قطارها در صورت اختلال ناشی از خرابی لکوموتیو

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی حمل و نقل ریلی

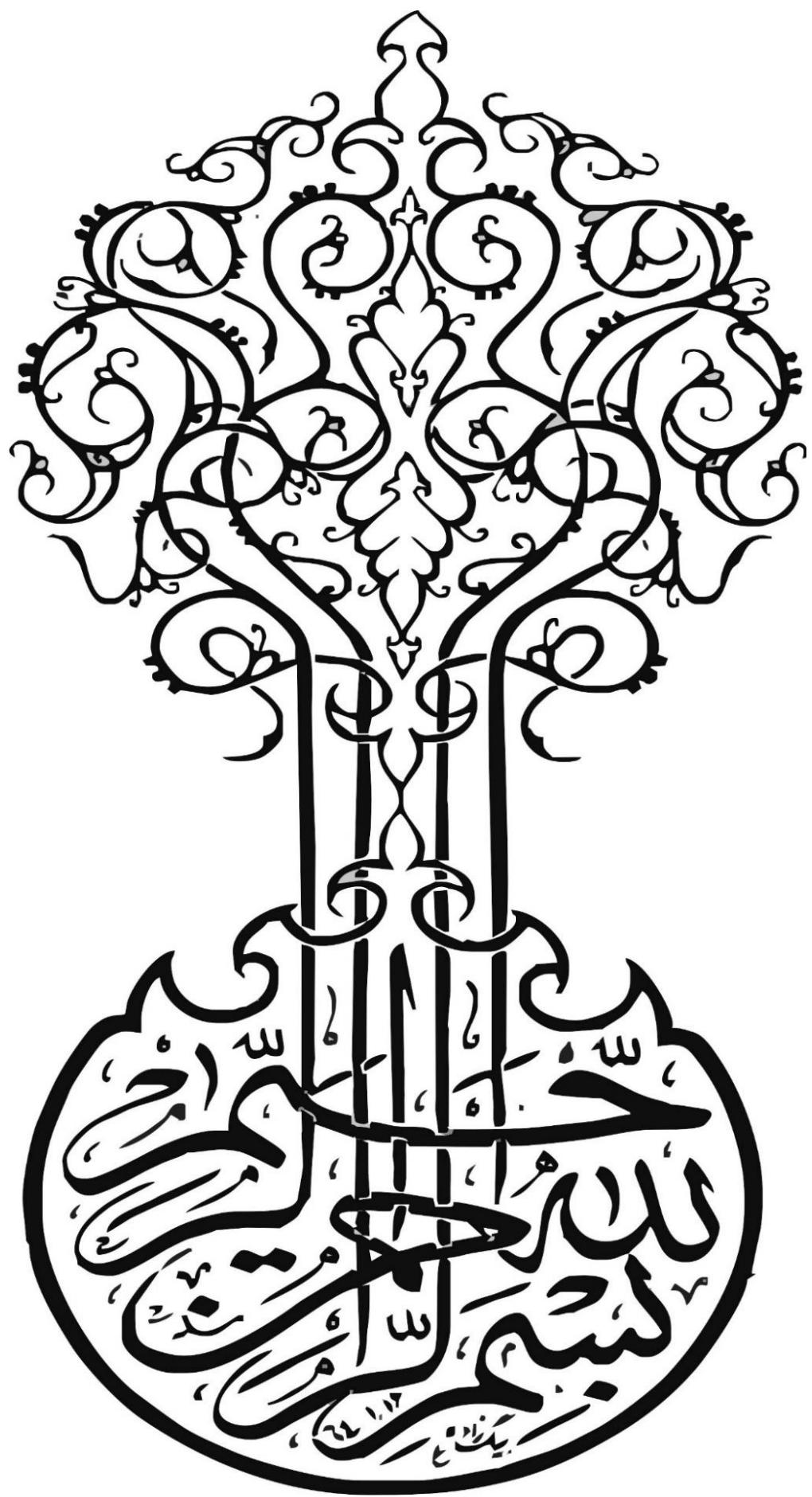
دانشجو:

میثم مرادی مدیریان

استاد راهنمای:

دکتر مسعود یقینی

فروردین ماه ۱۳۹۸



تَعْدِيْمُ بَهْ

مقدسرین واژه‌های دلخواست نامه دلم، مادر مهربانم که زندگیم را میدیون مهربانی و عطف آن می‌دانم.

پدر، مهربانی مشق، بردار و حامی.
٤

برادران و خواهرم هم‌اگاهان همیشگی و پشتونهای زندگیم.

حاصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهربانی شان آرام بخش آلام زینی ام است

به استوارترین تکیه‌گاه‌ها، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین مکاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در کتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قدره‌ای از دیایی بی کران مهربانی‌تان را سپاس توانم بکویم.

امروز، هستی ام به امید شماست و فرد اکمیدیان بحشم رضای شما را آوردی کران سکت راز این ارزان نداشتم تا به خانک پیمان

شارکنم، باشد که حاصل تلاش نیم کونه غبار حسکی‌تان را بزداید. بوسه بر دستان پر مهر تان

به مصدق

«من لم يشکر المخلوق لم يشکر الخالق»

بسی شایسته است از استاد فرهیخته جناب آقای دکتر مسعود یقینی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کار ساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

(یزکیهم و یعلمهم الکتاب و الحکمه)

معلم مقامت ز عرش برتر باد همیشه تو سن اندیشهات مظفر باد
به نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند صحیفه‌های سخن از تو علم پرور باد

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه/رساله

نام دانشکده: مهندسی راه‌آهن

نام دانشجو: میثم مرادی مدیریان

عنوان پایان‌نامه یا رساله: زمانبندی مجدد حرکت قطارها در صورت اختلال ناشی از خرابی لکوموتیو

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی حمل و نقل ریلی

| ردیف | سمت | نام و نام خانوادگی | مرتبه دانشگاهی | دانشگاه یا مؤسسه | امضا |
|------|------------------|--------------------|----------------|--------------------------|------|
| ۱ | استاد راهنما | دکتر مسعود یقینی | دانشیار | دانشگاه علم و صنعت ایران | |
| ۲ | استاد مدعو خارجی | | | | |
| ۳ | استاد مدعو داخلی | | | | |

تأییدیهی صحت و اصالت نتایج

با اسمه تعالی

اینجانب میثم مرادی مدیریان به شماره دانشجویی ۹۴۶۳۳۱۱۷ دانشجوی رشته مهندسی حمل و نقل ریلی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیهی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. درصورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احراق حقوق مکتب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: میثم مرادی مدیریان

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنمای شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/رساله با اخذ مجوز از استاد راهنمای، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد راهنمای: دکتر مسعود یقینی

تاریخ:

امضا:

چکیده

حوادث و اختلالات پیش بینی نشده در شبکه های ریلی موجب افزایش زمان تاخیر قطارها و کاهش ظرفیت بالقوه مسیر می شود. مدیریت اختلال در راه آهن، شامل مجموعه روش هایی است که جهت مدیریت رخدادهای پیش بینی نشده و کاهش انحراف از برنامه زمانبندی اولیه، اتخاذ می گردد. در این پژوهش، مسدودی موقتی بلاک های شبکه ریلی در اثر خرابی لکوموتیو به عنوان یک اختلال در برنامه حرکت قطارها در نظر گرفته شده است که این اختلال یکی از عمدۀ رخدادهایی است که در بخش مسافری شبکه ریلی جمهوری اسلامی ایران اتفاق می افتد. در این پایان نامه، به منظور کمینه کردن انحراف قطارها از برنامه زمانبندی اولیه با در نظر گرفتن استراتژی مقابله با تاخیر و تغییر ترتیب حرکت قطارها و با توجه به محدودیت های موجود در راه آهن ج.ا.ا. از جمله محدودیت های زمان سیر در بلاک، سبقت و تلاقی قطارها، توقف های موردنیاز در ایستگاه، اشغال بلاک و محدودیت های مربوط به تعیین و تخصیص لکوموتیو امدادی به قطار مختل شده، یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط توسعه داده شده است. تخصیص لکوموتیو، تعیین زمان های اعزام قطارها و لکوموتیو از ایستگاه و زمان رسیدن قطارها و لکوموتیو به ایستگاه از جمله تصمیماتی هستند که در این مدل اتخاذ می شوند. برای مطالعه موردی محور تهران - مشهد که دارای ۵۰ ایستگاه و شامل ۳۲ قطار مسافری رفت و ۳۲ قطار مسافری برگشت می باشد، در بازه زمانی ۲۴ ساعته انتخاب شده است. نتایج به دست آمده از مدل با نتایج حاصل از زمان اجرایی مقایسه شده است و مدل ارائه شده قادر به کاهش تاخیرات از ۶۳۴ دقیقه به ۱۶۹ دقیقه در مدت زمان ۸ ثانیه بوده است. مدل با استفاده از زبان مدل نویسی GAMS و حل کننده CPLEX حل شده است.

کلمات کلیدی: زمانبندی مجدد حرکت قطار، خرابی لکوموتیو، مسدودی بلاک، تاخیر

فهرست مطالب

| | |
|----|--|
| ۱ | - کلیات پژوهش |
| ۲ | ۱-۱- مقدمه |
| ۳ | ۲-۱- تعریف مسأله |
| ۴ | ۳-۱- اهمیت مسأله |
| ۶ | ۴-۱- هدف پژوهش |
| ۶ | ۵-۱- روش و مراحل پژوهش |
| ۷ | ۶-۱- ساختار گزارش |
| ۷ | ۲- مفاهیم پایه‌ای و پیشینه‌ی تحقیق |
| ۸ | ۱-۲- سلسله مراتب برنامه‌ریزی در راه‌آهن |
| ۸ | ۱-۱-۲- برنامه‌ریزی استراتژیک |
| ۹ | ۱-۲-۱-۲- برنامه‌ریزی تاکتیکی |
| ۹ | ۱-۲-۲-۱-۲- برنامه‌ریزی عملیاتی |
| ۱۰ | ۱-۲-۲- زمانبندی |
| ۱۰ | ۱-۲-۲-۱- کلیات زمانبندی حرکت قطارها |
| ۱۱ | ۱-۲-۲-۲- اصطلاحات حمل و نقل ریلی |
| ۱۱ | ۱-۲-۲-۱- ایستگاه |
| ۱۲ | ۱-۲-۲-۲- بلاق |
| ۱۲ | ۱-۲-۲-۳- سیستم علائم الکتریکی |
| ۱۳ | ۱-۲-۲-۴- محدودیتهای مسأله زمانبندی حرکت قطارها |
| ۱۴ | ۱-۲-۵- گراف حرکت قطارها |
| ۱۵ | ۱-۲-۶- ساختار خطوط ریلی |
| ۱۵ | ۱-۲-۶-۱- ساختار ریلی تک خطه |
| ۱۶ | ۱-۲-۶-۲- ساختار ریلی دو خطه و تک جهته |
| ۱۶ | ۱-۳-۶- ساختار ریلی دو و یا چند خطه به صورت دو جهته |
| ۱۷ | ۱-۴-۶- ساختار ریلی شبکهای |
| ۱۷ | ۱-۷-۲- برنامه ریزی مجدد حرکت قطار |

| | | |
|----|-------------------------------------|-------|
| ۱۸ | - چارچوب برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطار | ۱-۷-۲ |
| ۱۸ | - انواع اختلالات | ۲-۷-۲ |
| ۱۹ | - زمانبندی مجدد حرکت قطار | ۳-۷-۲ |
| ۲۲ | - عمدۀ مشکلات زمانبندی مجدد | ۴-۷-۲ |
| ۲۴ | - ادبیات موضوع | ۸-۲ |
| ۵۴ | - جمع‌بندی و نتیجه گیری | ۹-۲ |
| ۵۶ | ۳- مدل ریاضی پیشنهادی | |
| ۵۷ | - مقدمه | ۱-۳ |
| ۵۷ | - بیان مسأله | ۲-۳ |
| ۵۷ | - مفروضات | ۱-۲-۳ |
| ۵۸ | - محدودیت‌ها | ۲-۲-۳ |
| ۶۰ | - مدل توسعه داده شده | ۳-۳ |
| ۶۰ | - علائم و نشانه‌گذاری | ۱-۳-۳ |
| ۶۲ | - متغیرها | ۲-۳-۳ |
| ۶۳ | - مدل ریاضی | ۳-۳-۳ |
| ۶۸ | ۴- مطالعه موردنی | |
| ۶۹ | - مطالعه موردنی | ۱-۴ |
| ۷۰ | - ورودی‌های مدل | ۴-۲ |
| ۷۰ | - برنامه زمانبندی حرکت قطارها | ۱-۲-۴ |
| ۷۱ | - ایستگاه‌های مسیر | ۲-۲-۴ |
| ۷۴ | - اطلاعات مربوط به زمان حادثه | ۳-۲-۴ |
| ۷۷ | - خروجی‌های حل مدل | ۳-۴ |
| ۷۷ | - تابع هدف | ۱-۳-۴ |
| ۷۷ | - گراف حرکت قطارها | ۲-۳-۴ |
| ۸۱ | - بررسی تاخیرات | ۳-۳-۴ |
| ۸۵ | ۵- جمع‌بندی و پیشنهادات | |

| | |
|----------|---------------|
| ۸۶ | ۱-۵ جمع‌بندی |
| ۸۷ | ۲-۵ پیشنهادات |
| ۸۹ | ۶ منابع |

فهرست جداول

| |
|---|
| جدول (۱-۱) عوامل اختلال در شبکه راه آهن ایران در ۹ ماه اول سال ۱۳۹۷ ۴ |
| جدول (۱-۲) سطوح برنامه‌ریزی در راه آهن ۹ |
| جدول (۲-۱) اقدامات موجود در برنامه ریزی مجدد ۲۲ |
| جدول (۲-۲) مطالعات صورت گرفته در زمینه زمانبندی مجدد حرکت قطار ۴۷ |
| جدول (۲-۳) علائم و نشانه‌گذاری‌های مورد استفاده در مدل ریاضی ۶۰ |
| جدول (۲-۴) متغیرهای مورد استفاده در مدل ریاضی ۶۲ |
| جدول (۳-۱) برنامه‌ی زمانی موجود حرکت قطارها در مسیر برنامه‌ریزی ۷۰ |
| جدول (۳-۲) ایستگاه‌های موجود در مسیر موردنظر ۷۲ |
| جدول (۳-۳) تأخیرات مربوط به خرابی لکوموتیو در ۴ آذر ۹۷ ۷۵ |
| جدول (۴-۱) مبدأ جدید و زمان اعزام قطارها در جدول زمانی اولیه ۷۶ |
| جدول (۴-۲) انحراف از جدول زمانی اولیه ۸۲ |
| جدول (۴-۳) زمان اعزام قطارهای رفت از هر ایستگاه (بر حسب دقیقه) ۸۳ |
| جدول (۴-۴) زمان اعزام قطارهای برگشت از هر ایستگاه (بر حسب دقیقه) ۸۳ |
| جدول (۴-۵) زمان رسیدن قطارهای رفت به ایستگاه (بر حسب دقیقه) ۸۴ |
| جدول (۴-۶) زمان رسیدن قطارهای برگشت به ایستگاه (بر حسب دقیقه) ۸۴ |

فهرست اشکال

| | |
|---|----|
| شکل (۱-۲) نمای یک ایستگاه..... | ۱۱ |
| شکل (۲-۲) فاصله‌ی بین دو ایستگاه به عنوان یک بلاک | ۱۲ |
| شکل (۳-۲) ساختار ریلی تک خطه | ۱۶ |
| شکل (۴-۲) ساختار ریلی دو خطه | ۱۶ |
| شکل (۵-۲) ساختار ریلی دو خطه به صورت دو جهته..... | ۱۷ |
| شکل (۶-۲) ارتباط بین دو قطار پایه..... | ۲۰ |
| شکل (۷-۲) تاخیر قطار اعزامی به دلیل تاخیر در قطار ورودی | ۲۰ |
| شکل (۸-۲) تاثیر زمان شناوری در حرکت قطارها | ۲۱ |
| شکل (۱-۳) : زمان اعزام قطارها در بازه زمانی وقوع اختلال | ۵۸ |
| شکل (۲-۳) عدم اجازه سبقت به قطارها | ۶۴ |
| شکل (۳-۳) مجاز بودن قطارها برای سبقت از همدیگر | ۶۴ |
| شکل (۴-۳) حالت اول تلاقی قطارهای با جهت مخالف | ۶۵ |
| شکل (۵-۳) حالت دوم تلاقی قطارهای با جهت مخالف | ۶۵ |
| شکل (۶-۳) محدودیت زمان رسیدن قطار مختل شده به ایستگاه بعدی خود | ۶۶ |
| شکل (۷-۳) استفاده از مسیر برگشت به عنوان تک خطه تا تاپایان زمان انسداد..... | ۶۶ |
| شکل (۱-۴) نقشه مسیر تهران - مشهد، محور تهران..... | ۷۳ |
| شکل (۲-۴) نقشه مسیر تهران - مشهد، محور شمال شرق ۱ | ۷۳ |
| شکل (۳-۴) نقشه مسیر تهران - مشهد، محور خراس | ۷۳ |
| شکل (۴-۴) نمودار حرکت قطارها در جدول زمانی جدید | ۷۸ |
| شکل (۴-۵) نمودار حرکت قطارها با جزئیات زمان اختلال | ۷۹ |
| شکل (۴-۶) نمودار حرکت قطارها در بازه زمانی اختلال | ۸۰ |

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

صنعت حمل و نقل ریلی یکی از شیوه‌های مهم حمل و نقل است و نقش بسیار مهمی در جابجایی کالا و مسافر در سطح جهان ایفا می‌کند. این گونه‌ی حمل و نقلی دارای مزایای فراوانی است که صرفه جویی در مصرف انرژی، توانایی حمل انبوهر کالا و مسافر، اینمنی بالا و سازگاری با محیط زیست از آن جمله به شمار می‌رond. سازگاری با محیط زیست در سیستم ریلی چنان جایگاهی دارد که به راه آهن عنوان "حمل و نقل سبز" اطلاق گردیده است [۱]. از مهمترین مسائل برنامه ریزی در صنعت حمل و نقل ریلی زمانبندی حرکت قطارها می‌باشد به طور کلی زمانبندی^۱ فرآیند تخصیص فعالیتهای مشخص به منابع در طول یک بازه زمانی است [۲]، چرا که در بین مسائل مختلف برنامه ریزی در یک شبکه‌ی راه آهن، مهم ترین مسئله‌ای که اولاً بر روی سایر مسائل برنامه ریزی تاثیر مستقیم داشته و ثانیاً نتایج حاصل از آن، کل برنامه‌های موجود در مجموعه‌ی راه آهن را تحت شعاع قرار می‌دهد و ثالثاً حلقه‌ی تکمیلی مسائل مربوط به سیر و حرکت قطارها می‌باشد، مسئله‌ی زمان بندی حرکت قطارهاست [۳]. زمانبندی حرکت قطارها یکی از مسائل مهم برنامه‌ریزی در راه آهن می‌باشد که عبارت است از استفاده بهینه از امکانات یا تخصیص مناسب بلاک‌ها به قطارها با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و فرضیات موجود در شبکه‌ی ریلی به منظور حداقل کردن تاخیرات قطارهای مسافری و باری. زمانبندی حرکت قطارها که باعث کاهش تأخیر در حرکت و بالابردن ظرفیت موثر در راه آهن می‌شود، به دلیل وجود محدودیت‌های بسیار در شبکه و مسیرهای ریلی، فرآیندی سخت و پیچیده است. یکی از زیر شاخه‌های مبحث زمانبندی در سیستم ریلی، زمانبندی مجدد حرکت قطارها^۲ است. زمانبندی مجدد حرکت قطارها در مواردی مطرح می‌گردد که تاخیرات کوچک یا بزرگ یا حوادث پیش‌بینی نشده در قسمتی از شبکه یا محور ریلی روی دهند و سبب انحراف و نامعتبر شدن جدول زمانی حرکت اولیه قطارها شوند. وقوع حادثه معلول عوامل مختلفی از جمله؛ خرابی زیرساخت و ناوگان، نوسان حجم تقاضای مسافر، رفتار پرسنل راه آهن، شرایط آب و

^۱ Scheduling

^۲ Train Rescheduling

هواي و ... اشاره نمود [۴]. در شرایط ايجاد انحراف در جدول زمانی اوليه ناسازگاريها^۱ و تداخلات پيش آمده بين قطارها در استفاده از زير ساخت ريلى مى تواند سبب انتشار بيشتر تأخيرات گردد [۵] از اين رو تداخلات احتمالي در حرکت قطارها بايستى به طور موثر و در كمترین زمان ممکن برطرف شود [۶]. به طور كلي مساله زمانبندی مجدد حرکت قطارها عبارت است از يافتن يك جدول زمانبندی جديد که نه تنها هزينه هاي زمانی و مالي مجموع سفرها را کمينه نماید، بلکه انحراف^۲ از زمانبندی اوليه را نيز به حداقل برساند [۱].

۱-۲- تعریف مسئله

همانطور که پيش تر ذکر شد زمانبندی مجدد به دليل ايجاد اختلال در شبکه لازم الاجرا مى باشد و يکی از عواملی که مى تواند به عنوان ناسازگاري شمرده شود اختلال ناشی از ناوگان است. خراب شدن لکوموتیو يکی از مهم ترین عواملی است که در اين دسته از اختلالات رخ می دهد. به همین منظور در پژوهش حاضر مساله زمانبندی مجدد حرکت قطارها هنگام خرابی ناشی از لکوموتیو مورد بررسی قرار می گيرد. در اين مساله در يك محور دو خطه هنگامي که يکی از قطارها به دليل خراب شدن لکوموتیو قادر به ادامه مسیر نمی باشد سيرگاهی را که در آن حضور دارد از دسترس خارج ميکند و علاوه بر اين اينکه خود متحمل تاخير زيادي مى شود قطارهایی را هم که در ادامه اين فعالیت قرار دارند دچار تاخير می شوند. اين نوع حوادث در برخی سیستم های راهآهن همچون سیستم ريلی ايران متداول هستند. بر اساس اطلاعات دریافتی از راهآهن ج.ا.ا. در ۹ ماهه اول سال ۱۳۹۷، بيشترین تأخيرات به وجود آمده ناشی از خرابی لکوموتیو است. جدول زير حوادث اتفاقا افتاده و میزان تأخيرات اوليه برای هر عامل را نشان می دهد.

^۱ Conflicts

^۲ Deviation Cost

جدول (۱-۱) عوامل اختلال در شبکه راه آهن ایران و کل تاخیرات مربوطه به همراه فراوانی هر کدام در ۹ ماه اول سال ۱۳۹۷/۷

| نوع اختلال | مجموع تاخیرات (دقیقه) | فراوانی |
|----------------|-----------------------|---------|
| ATC | ۴۳۸۷ | ۲۰۲ |
| ارتباط و علایم | ۱۵۳۹۳ | ۹۴۴ |
| خط | ۶۶۴۳ | ۴۰۹ |
| سالن و خود کشش | ۷۶۹۷ | ۳۶۴ |
| سانحه | ۴۶۹۹ | ۱۴۷ |
| سیر و حرکت | ۶۸۵۶ | ۵۲۶ |
| کشش | ۱۸۸۴۱ | ۶۶۴ |
| دیگر عوامل | ۴۹۵۱ | ۳۱۱ |
| مجموع | ۶۹۴۷۳ | ۳۵۶۷ |

جدول فوق (۱-۱) حوادثی که در محور تهران مشهد رخ داده است نشان می دهد. همانطور که در این جدول نیز معین است بیشترین حجم از تاخیرات محور مربوط به عامل کشش است که بنا بر دلایل مختلف لکوموتیو قادر به حمل قطار نمی باشد و نیاز به لکوموتیو امدادی می باشد. به محض وقوع چنین حادثه‌ای اعزم گران موظف هستند تا در کمترین زمان ممکن لکوموتیوی به این قطار تخصیص دهند که علاوه بر به اجرا درآوردن فعالیت مختل شده، سیرگاه را نیزآزاد کرده تا تداخلات و اختلالات را به کمترین حالت برسانند. در این پروژه سعی بر این است که با در نظر گرفتن این نوع خرابی، مدلی جهت زمانبندی مجدد حرکت قطارها ارائه شود تا بتواند نزدیکترین لکوموتیو موجود در شبکه را به قطار تخصیص دهد و همچنین با در نظر گرفتن تغییر اولویت قطارها از انتشار تاخیر به دیگر قطارها جلوگیری کند.

۱-۳-۱- اهمیت مسئله

یکی از مهم ترین اهداف و اولویت دولتها در جهان در بخش حمل و نقل، افزایش سهم حمل و نقل ریلی می باشد. از طرفی افزایش میزان رضایت مسافران و صاحبان کالا با هدف ترغیب آنها به استفاده از حمل و نقل سبز مورد توجه بسیاری از سیستم های راه آهن دنیا گرفته است. از این رو پرداختن به پژوهش های کاربردی در حوزه برنامه ریزی حرکت قطارها با هدف کاهش هزینه های استفاده از سیستم ریلی در سالیان اخیر رشد قابل توجهی داشته است. مباحث زمانبندی مجدد حرکت قطارها در حال حاضر به عنوان یکی از حوزه های تحقیقاتی فعال در مباحث مرتبط با پژوهش

عملیاتی مطرح می باشد [۱]. زمانبندی مجدد حرکت قطارها جهت کاهش تاخیرات و هزینه‌های ناشی از ایجاد اختلال در حرکت قطارها در محورهای مختلف شبکه ریلی دارای اهمیت می‌باشد. در حال حاضر، در هنگام بروز حادثه در محورهای ریلی کشور، برنامه‌ای مدون و جامع جهت تعیین نحوه ادامه حرکت قطارهای مختلف مسافری و باری وجود ندارد. پس از اعلام وقوع حادثه برخی از قطارهایی که هنوز حرکت خود را آغاز ننموده‌اند به طور تجربی توسط کارشناسان کنترل ترافیک مرکزی متحمل تاخیرات و حتی لغو می‌گردند. عدم زمانبندی مجدد بهینه در هنگام وقوع حوادث مختلف در محورهای دو خطه ریلی می‌تواند به تحمیل تاخیرات و در نتیجه هرینه‌های زمانی و مالی زیاد به سیستم راه‌آهن و استفاده کنندگان از شبکه ریلی بیانجامد. قطارهای متأثر از حوادث شامل هر دو نوع قطارهای باری و مسافری می‌باشند.

قطارهای باری : در هنگام وقوع حوادث پیش بینی نشده اغلب قطارهایی که متحمل انحراف از زمانبندی اولیه خود می‌شوند قطارهای باری هستند. این نوع قطارها از نقطه نظر سیستم راه‌آهن ایران دارای اولویت پایین تری می‌باشند. در حالی که تاخیرات انواع قطارهای باری هزینه‌هایی در پی دارد که اغلب در تصمیم گیری کارشناسان کنترل ترافیک مرکزی مد نظر قرار نمی‌گیرد. مدت زمان حمل کالا در سیستم ریلی یکی از عوامل مهم و تاثیر گذار بر انتخاب طرفة حمل توسط صاحبان کالاست. ایجاد تاخیرات زیاد در حرکت قطارهای باری موجب طولانی شدن زمان حمل کالا توسط راه آهن می‌گردد و همین امر در تصمیم گیری صاحبان کالا جهت حمل ریلی بار بسیار تاثیر گذار می‌باشد. به همین دلیل برنامه دار نمودن قطارهای باری به منظور ترغیب بیشتر صاحبان کالا به حمل ریلی از اولویت‌های مسئولین راه آهن جمهوری اسلامی ایران اعلام شده است. کاهش تاخیرات قطارها علاوه بر تاثیر بر حمل و نقل ریلی داخلی، در افزایش مطلوبیت مسیرهای ریلی عبوری از ایران جهت ترانزیت ریلی کالا، تاثیر به سزایی خواهد داشت. این مساله با توجه به قرار گرفتن ایران در مسیر چندین کریدور بین المللی حمل و نقلی مهم نظیر؛ کریدور تراسیکا^۱، کریدور جنوبی اسکاپ^۲، کریدور جاده ابریشم، کریدور ترانزیتی شمال – جنوب^۳ (INSTC)، کریدور حمل و نقل آسیا-اروپا^۴ (EATL)، کریدور آلتید^۵ (ALTID) و ... اهمیت مضاعف یافته است.

قطارهای مسافری: حوادث ریلی ممکن است سبب تاخیر زیاد قطارهای مسافری با اولویت‌های گوناگون نیز شود. تاخیر قطارهای مسافری از دیدگاه مسافران سبب نارضایتی و کاهش تمایل به انجام سفر از طریق ریلی می‌شود و از دیدگاه گردانندگان سیستم ریلی تاخیر قطارهای مسافری

^۱ TRACECA: Transport Corridor Europe – Caucasus Asian

^۲ Trans Asian Railway Southern Corridor

^۳ International North-South Transport Corridor

^۴ Euro-Asian Transport Links

^۵ Asian Land Transportation Infrastructure Development

موجب تحمیل هزینه‌هایی همچون پرداخت غرامت به مسافران، هزینه‌های مصرف سوخت و نگهداری ناوگان، هزینه‌های تغییر برنامه خدمه و ... می‌گردد. پرداخت غرامت بابت تاخیر یا لغو قطارهای مسافری به میزان اولویت این قطارها بستگی دارد به نحوی که با افزایش اولویت قطار مسافری مبلغ غرامت افزایش می‌یابد. در شرایط کنونی فرایند رفع تداخلات حرکتی قطارها در هنگام وقوع حادثه در سیستم ریلی ایران تنها با تکیه بر مهارت شخصی و با اعتماد به دانش بصری، تجربه و قضاوت مهندسی کارشناسان کنترل ترافیک مرکزی صورت می‌پذیرد. در حالی که راهکارهای ارائه شده توسط این افراد به ویژه در ارتباط با مسائلی با ابعاد متوسط و بزرگ لزوماً بهینه و یا حتی نزدیک به بهینه نیستند [۸].

۴-۱- هدف پژوهش

در پژوهش‌های انجام شده در زمینه زمانبندی مجدد به مساله خرابی لکوموتیو و محدودیت آن در شبکه توجه خاصی نشده است. پژوهش حاضر بر آن است تا مدل مناسبی جهت حل مساله زمانبندی مجدد حرکت قطارها در هنگام بروز حادثه از نوع خرابی لکوموتیو ارائه نماید که یکی از نیازهای ضروری راه آهن جمهوری اسلامی ایران می‌باشد. هدف از توسعه مدل مذکور این است که در هنگام وقوع حادثه امکان دستیابی اعزام گران^۱ به جداول زمانبندی مجدد بهینه یا نزدیک به بهینه در زمان مناسب فراهم آید.

۵-۱- روش و مراحل پژوهش

پس از بررسی ادبیات موضوع در زمینه زمانبندی مجدد حرکت قطارها و بررسی شرایط حاکم بر شبکه ریلی کشور محدودیتها و ضوابط موجود جهت حرکت قطارها در طی خطوط ریلی استخراج شده است. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه داده شده که ابتدا جهت برنامه‌ریزی حرکت قطارها بر روی یک مسئله‌ی کوچک اعتبار سنجی و راستی آزمایی شده، و در نهایت بر اساس داده‌های واقعی پیاده سازی شده است. نتایج به دست آمده بسیار مفید بوده و توانسته است در زمان قابل قبولی مجموع تاخیرات را به طور چشم گیری کاهش دهد.

^۱ Dispatchers

۱-۶- ساختار گزارش

در این پژوهش ابتدا به بیان مفاهیم پایه‌ای زمانبندی مجدد حرکت قطارها پرداخته خواهد شد، پس از آن ادبیات موضوع برای مسائله‌ی زمانبندی مجدد حرکت قطارها مورد بررسی قرار خواهد گرفت، ارائه‌ی مدل ریاضی توسعه داده شده، مسائله‌ی موردنی حل شده، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی جهت تحقیقات آتی نیز بخش‌های دیگر پژوهش را تشکیل می‌دهند.

فصل دوم

مفاهیم پایه‌ای و پیشینه تحقیق

در این فصل ابتدا برخی از تعاریف و اصطلاحات کلی برنامه‌ریزی در راه‌آهن، زمانبندی، مجدد حرکت قطارها بیان خواهد شد سپس به بررسی پیشینه‌ی تحقیق زمانبندی مجدد حرکت قطارها به طور خاص پرداخته می‌شود.

۱-۲- سلسله مراتب برنامه‌ریزی در راه‌آهن

در مرحله اول برنامه‌ریزی راه‌آهن به منظور مشخص شدن میزان مسافری که درخواست جابه‌جایی بین یک مبدأ و یک مقصد معین را دارند، باید نوع تقاضای مشتری مشخص و بررسی شود. برای تعیین اینکه کدام خطوط و مسیرها با چه فرکانسی باید مورد بهره‌برداری قرارگیرند برنامه‌ریزی خط انجام می‌شود، این نوع برنامه‌ریزی شامل تصمیم‌گیری درمورد مسیرها و خطوط است. در مرحله برنامه‌ریزی حرکت قطار تمام زمان‌های ورود و خروج قطارها از خطوط معین می‌شود، جدول زمانی بر اساس مکان ابتدا و انتهای و برنامه‌ریزی زمانی برای هر قطار به دست می‌آید [۹]. برنامه‌ریزی آلات نقلیه عبارت است از تشکیل قطار با استفاده از متصل شدن واگن‌ها و لوکوموتیوهایی که به خطوط تخصیص داده شده‌اند. پس از تشکیل قطار باید توزیع پرسنل در قطارها مشخص شود تا پرسنل موردنیاز هر قطار برای سرویس دهی به آن تخصیص داده شود، این فعالیت مدیریت خدمه نام دارد. مدیریت خدمه شامل دو بخش برنامه‌ریزی پرسنل و تهیه صورت کار پرسنل است. برنامه‌ریزی پرسنل، تخصیص پرسنل به قطارها و صورت کار پرسنل، وظیفه خدمه را معلوم می‌کند [۹].

از نقطه‌نظر افق برنامه‌ریزی نیز سطوح مختلفی وجود دارند که تمام این مراحل به صورت سلسله مراتبی باهم در ارتباط هستند، محاسبه جواب بهینه در یک مرحله ممکن است جواب‌های موجه در مراحل بعدی را محدود کند، این سطوح به صورت زیر می‌باشند:

۱-۱-۲- برنامه‌ریزی استراتژیک

در برنامه‌ریزی استراتژیک سرمایه‌های انسانی بررسی می‌شوند و سپس تصمیم گرفته می‌شود که ایستگاه جدیدی ساخته شود، ایستگاه‌های قبلی توسعه داده شوند یا سرویس‌های حمل و نقلی افزایش یابند. این تصمیم‌گیری‌ها بلندمدت هستند و اغلب به هزینه‌ی زیادی نیاز دارند، شبکه زیربنایی معمولاً در این مرحله توسعه پیدا می‌کند، تحلیل و آنالیز تقاضا و برنامه‌ریزی خط نیز اغلب به این مرحله تعلق دارد.

۲-۱-۲- برنامه‌ریزی تاکتیکی

برنامه‌ریزی تاکتیکی بر تخصیص منابع مرکز است، جریان ترافیک از اطلاعات تقاضای مصرف کننده و زیربنا به دست می‌آید، بیشتر جزئیات برنامه‌ریزی خط و برنامه‌ریزی حرکت قطار در این مرحله انجام می‌شود.

۳-۱-۲- برنامه‌ریزی عملیاتی

برنامه‌ریزی عملیاتی همان برنامه‌ریزی روزانه است، در بعضی مواقع به علت خرابی خط یا قطار باید برنامه‌ریزی خط و پرسنل دوباره انجام شود.

در جدول زیر سطوح مختلف برنامه‌ریزی در راه‌آهن نشان داده شده است [۱۰].

[۱-۲] جدول سطوح برنامه‌ریزی در راه‌آهن [۳]

| استراتژیک | | سال |
|---------------------------|----------------------------|------|
| • توسعه‌ی شبکه‌ی خطوط | • برنامه‌ریزی حمل بار | |
| • توسعه‌ی محوطه‌ها | • تعیین اندازه ناوگان | |
| تاکتیکال | | فصل |
| • گروه‌بندی واگن‌های باری | • زمانبندی حرکت قطارها | |
| • برنامه‌ریزی لکوموتیو | • برنامه‌ریزی تشکیل قطار | |
| عملیاتی | | ماه |
| • تخصیص خدمه قطار | • برنامه‌ریزی خدمه قطار | |
| • تخلیه و بارگیری واگن‌ها | • برنامه‌ریزی عملیات مانور | |
| • تخصیص لکوموتیو | | ساعت |

۲-۲- زمانبندی

زمانبندی، تخصیص منابع در طول زمان برای اجرای مجموعه‌ای از وظایف است. در مسائل زمانبندی عمدتاً دو نوع محدودیت وجود دارد: محدودیت‌های تکنولوژیکی و محدودیت‌های در دسترس‌پذیری منابع. در حقیقت هر مسأله زمانبندی در صدد یافتن راه حلی موجه برای این دو نوع محدودیت است به طوریکه حل هر مسأله زمانبندی برابر با پاسخگویی به این دو سوال است:

۱. کدام منبع برای انجام هر وظیفه تخصیص داده خواهد شد؟
۲. هر وظیفه در چه وقت انجام خواهد شد؟

به بیان دیگر، جوهره مسائل زمانبندی به تصمیم‌گیری در مورد تخصیص منابع و توالی عملیات منحصر می‌شود [۱۱].

۱-۲-۲- کلیات زمانبندی حرکت قطارها

زمانبندی در میان مسائل مختلف برنامه‌ریزی در یک شبکه‌ی راه آهن بر روی سایر مسائل برنامه‌ریزی تاثیر مستقیم داشته و حلقه‌ی تکمیلی مسائل مربوط به سیر و حرکت قطارها محسوب می‌شود [۱۲]. به دست آوردن یک برنامه زمانبندی مناسب حرکت قطارها مزایای فراوانی دارد که از میان آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کاهش توقف‌های غیر ضروری در ایستگاه‌ها
- کاهش مدت زمان سفر قطارها
- کاهش هزینه‌ها
- افزایش طول خط ریلی
- افزایش رضایت مشتریان

سفر قطار با چهار ویژگی شناخته می‌شود:

- مبدأ و مقصد
- زمان اعزام
- ایستگاه‌هایی که قطار در آن توقف می‌نماید
- حداقل زمان توقف در ایستگاه‌ها

اهداف زمانبندی حرکت قطارها به شرح زیر می‌باشد:

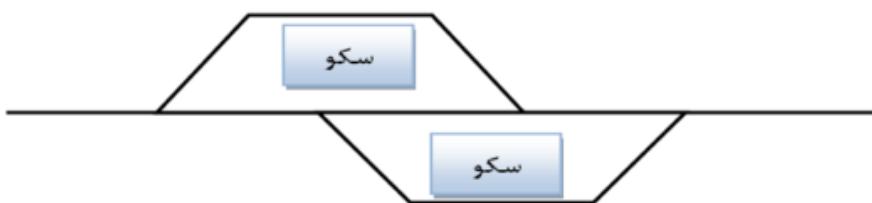
- تعیین زمان اعزام قطار از ایستگاه مبدأ
- تعیین مدت زمان سیر قطار در بلکها
- تعیین زمان ورود و خروج و میزان توقف قطار در ایستگاه‌های بین راهی که شامل زمان‌های توقف برنامه‌ای نظیر زمان توقف در ایستگاه‌ها برای سوار و پیاده کردن مسافر و توقف‌های اجباری نظیر توقف برای انجام عملیات تلاقي و سبقت است.
- تعیین محل تلاقي و سبقت قطارها
- تعیین زمان رسیدن قطار به ایستگاه مقصد

۳-۲- اصطلاحات حمل و نقل ریلی

در این قسمت برخی اصطلاحات و مفاهیم مهم در حمل و نقل ریلی بیان می‌شود.

۱-۳-۲- ایستگاه

ایستگاه^۱ محوطه‌ای است که مجموعه‌ای از خطوط و سوزن‌های به هم پیوسته و ساختمان‌های اداری و مسکونی و سکوهای بار و مسافر در آن قرار دارد و محل توقف، قبول، اعزام و عملیات مانور و سبقت و تلاقي قطارها و سایر وسایل نقلیه را هم می‌باشد [۱۳]. در شکل زیر نمونه‌ای از یک ایستگاه آورده شده است [۱۲].

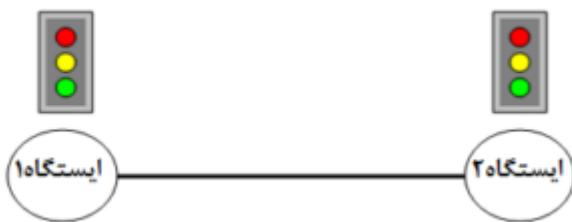


شکل (۱-۲) نمای یک ایستگاه

^۱ Station

۲-۳-۲- بلاک

بلاک^۱ یا سیرگاه، قطعه خطی است بین دو نقطه که برای تنظیم فاصله زمانی سیر قطارها مشخص می‌شود [۱۳]. در حقیقت یک بلاک بخشی از یک شبکه ریلی است که ورود و خروج قطارها به آن توسط سیگنال‌هایی که ابتدا و انتهای آن قرار گرفته‌اند کنترل می‌شود. هدف عدمه از تعریف سیستم بلاک، حفظ فاصله ایمنی بین قطارها می‌باشد. نکته‌ی مهمی که در زمانبندی حرکت قطارها مورد توجه قرار دارد این است که ورود قطار به سیرگاه یا بلاک اشغال شده (سیرگاهی که یک قطار در آن در حال حرکت است)، از هردو جهت ممنوع است. به عبارتی دیگر ظرفیت هر بلاک دقیقاً یک قطار است، سیر قطارها در هر بلاک باید حداقل توسط دو سیگنال کنترل شود [۱۴]. در ساده‌ترین سیستم بلاک‌بندی که در راه‌آهن ایران نیز انجام می‌شود فاصله‌ی بین هر دوایستگاه متولی به عنوان یک بلاک در نظر گرفته می‌شود. شکل زیر یک بلاک را نشان می‌دهد [۱۲].



شکل (۲-۲) فاصله‌ی بین دو ایستگاه به عنوان یک بلاک

۳-۳-۲- سیستم علائم الکتریکی

این سیستم وظیفه کنترل ترافیک و ایمنی حرکت قطارها در بلاک را بر عهده دارد. وضعیت اشغال بودن یا آزاد بودن بلاک‌ها توسط سیگنال‌هایی که در ابتدا و انتهای هر بلاک است به لکوموتیوران اعلام می‌شود [۱۲]. سیستم‌های سیگنالینگ به کار رفته در راه‌آهن بسیار متفاوت هستند، اما به طور کلی یک سیگنال ممکن است در یکی از وضعیت‌های قرمز، زرد و یا سبز باشد. سیگنال قرمز بدین معنا است که بلاک مقابل توسط قطار دیگری اشغال است. سیگنال زرد به معنای آزاد بودن بلاک مقابله اما اشغال بودن بلاک بعد از آن است و سیگنال سبز نیز به این معناست که دو بلاک مقابل آزاد هستند.

^۱ Block

۴-۲- محدودیت‌های مسأله زمانبندی حرکت قطارها

مسأله زمانبندی حرکت قطار به منظور تعیین زمان‌های بهینه ورود و خروج هر قطار در هر ایستگاه با توجه به محدودیت‌های زمان سفر، محدودیت‌های ایمنی حرکت قطارها و سایر محدودیت‌هایی که بسته به نوع بیان مسأله تعریف می‌شوند به کار می‌رود [۹].

محدودیت‌های فیزیکی مسأله زمانبندی حرکت قطارها عبارتند از:

❖ حداقل زمان سیر

این محدودیت حداقل زمان ممکن سیر بین دو ایستگاه را نشان می‌دهد. زمانی که قطار فاصله‌ی بین دو ایستگاه را می‌پیماید می‌باشد کوچکتر و یا مساوی با این حداقل زمان باشد.

❖ حداقل زمان توقف در ایستگاه

زمان توقف در ایستگاه‌هایی که مسافر پیاده و سوار می‌شود می‌باشد بزرگتر و یا مساوی با حداقل زمان مجاز توقف باشد، در سایر ایستگاه‌ها که برای رفع تلاقي‌ها و یا آزاد شدن بلاک، قطار توقف می‌نماید محدودیتی وجود ندارد.

❖ محدودیت وجود یک قطار در بلاک

برای قطارهایی که در یک مسیر و یک جهت حرکت می‌کنند در هر بلاک (بین دو سیگنال) حداکثر می‌باشد یک قطار وجود داشته باشد.

❖ محدودیت‌های سبقت

هنگامی که دو قطار با سرعت‌های مختلف در یک جهت حرکت می‌نمایند و قطار با سرعت کمتر جلوتر از قطار با سرعت بیشتر در حال حرکت است امکان روی دادن تلاقي وجود دارد. در این صورت قطار با سرعت کمتر در ایستگاه منتظر می‌ماند تا قطار با سرعت بیشتر از آن سبقت بگیرد، سبقت تنها می‌تواند در ایستگاه‌ها رخ دهد.

❖ حداقل سرفاصله

به جهت دلایل ایمنی می‌باشد یک فاصله‌ی زمانی حداقلی بین دو رویداد ورود یا خروج در هر ایستگاه وجود داشته باشد.

❖ محدودیت عبور از سوزن

باید یک فاصله‌ی زمانی بین عبور دو قطار از یک سوزن وجود داشته باشد تا تلاقی در محل سوزن رخ ندهد.

❖ محدودیت تخصیص خط

اگر دو قطار متوالی به یک خط از ایستگاه تخصیص یافته باشند باید یک فاصله‌ی زمانی حداقلی بین رسیدن آن‌ها وجود داشته باشد.

علاوه بر محدودیت‌های بالا که برای هر نوع زمانبندی حرکت قطارها باید به اجبار لحاظ شوند، محدودیت‌های بسیاری با توجه به نوع مسئله قابل تعریف هستند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- محدودیت مربوط به تعداد خطوط هر ایستگاه که می‌توانند قطارها را در خود جای دهند.
- محدودیت مربوط به طول مختلف خطوط هر ایستگاه که تنها می‌تواند قطارهای خاصی را در خود جای دهد.
- محدودیت توقف قطارها برای ادائی فریضه‌ی نماز در ایستگاه‌های مجہز به نمازخانه به گونه‌ای که نماز مسافران قضا نشود.
- محدودیت حداقل فاصله زمانی بین دو قطار در یک بلاک در جاییکه بیش از یک قطار مجاز به حرکت در یک بلاک نباشد.

۲-۵- گراف حرکت قطارها

اولین بار گراف قطارها در سال ۱۸۲۵ در بریتانیا به کار گرفته شد [۱۵]. گراف از دو محور مسافت و زمان تشکیل شده است که جهت نمایش برنامه زمانبندی حرکت قطارها استفاده می‌شود و در حقیقت نمایش موقعیت مکان-زمان قطارهاست. در محور مسافت تقسیم‌بندی بر اساس فواصل ایستگاه‌ها انجام شده و در محور زمان تقسیم‌بندی بر اساس ساعت با درجه‌بندی ۱۰ دقیقه‌ای و یا دو دقیقه‌ای انجام می‌شود (در ایران تقسیم‌بندی ۱۰ دقیقه‌ای رایج است).

گراف قطارها به دو منظور استفاده می‌شود:

- نمایش دادن حرکت قطارها و کنترل ترافیک
- نمایش دادن برنامه حرکت قطارها

انواع گراف‌ها از نظر نحوه نمایش زمان و مسافت روی محورها عبارتند از:

- محور افقی (طول) برای نمایش دادن زمان و محور عمودی (عرض) برای نشان دادن مسافت (گراف مورد استفاده در ایران).
- محور افقی (طول) برای نمایش دادن مسافت و محور عمودی (عرض) برای نشان دادن زمان (گراف مورد استفاده در اروپا).

نوع دیگر تقسیم‌بندی گراف حرکت قطارها بر اساس خطوط سیرگاه است، بر این اساس، گراف قطارها به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود.

- دسته اول گراف یک خط است که در آن تلاقی و سبقت قطارها در ایستگاه‌ها انجام می‌شود.
- در دسته دوم یا گراف‌های دوخطه فقط سبقت قطارها در ایستگاه‌ها انجام می‌شود.
- در حالت سوم بخشی از مسیر می‌تواند به صورت دوخطه و بخشی از آن به صورت یک خط باشد.

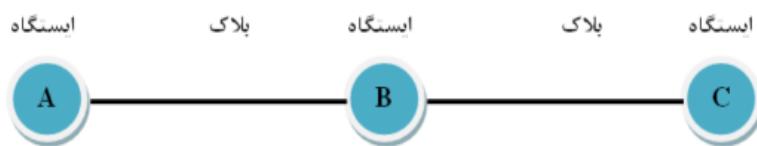
۶-۲- ساختار خطوط ریلی

شبکه‌های ریلی بر اساس نوع طراحی خطوط دارای انواع متفاوتی هستند. وضعیت این خطوط از عوامل موثر در مدل‌سای ریاضی مسئله زمانبندی حرکت قطارها می‌باشد. در ادامه انواع مختلف ساختارهای شبکه ریلی توضیح داده می‌شوند.

۱-۶-۲- ساختار ریلی تک خط

در شبکه‌های ریلی تک خط^۱ بین هر دو ایستگاه از شبکه ریلی تنها یک خط ریلی وجود دارد. واضح است که به دلیل تک خطه بودن شبکه، تمام قطارهای رفت و برگشت از این خط استفاده کرده و در نتیجه خطوط از هردووجهت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲]. به دلیل آن که ظرفیت بلاک‌ها تنها یک قطار است، هرگونه تلاقی و سبقت قطارها بایستی در ایستگاه‌ها انجام شود. شکل زیر ساختار ریلی تک خط را برای سه ایستگاه متوالی نشان می‌دهد.

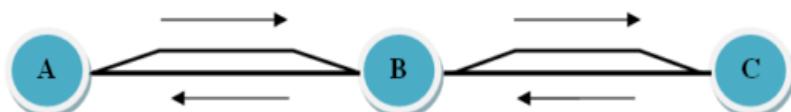
^۱ Single Track



شکل (۳-۲) ساختار ریلی تک خطه

۲-۶-۲- ساختار ریلی دو خطه و تک جهته

در شبکه‌های ریلی دو خطه^۱ و تک جهته^۲، مسیر بین دو ایستگاه شامل دو خط ریلی است که یک خط برای قطارهای رفت و یک خط برای قطارهای برگشت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هریک از خطوط تنها در یک جهت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. تنها محل تلاقی قطارهای رفت و برگشت در ایستگاه‌ها می‌باشد. مسائل زمانبندی در مسیرهای دو خطه به دلیل عدم تلاقی قطارهای رفت و برگشت از پیچیدگی کمتری برخوردار هستند. شکل زیر این نوع ساختار خط را به خوبی نشان می‌دهد [۱۲].



شکل (۴-۲) ساختار ریلی دو خطه

۳-۶-۲- ساختار ریلی دو و یا چند خطه به صورت دو جهته

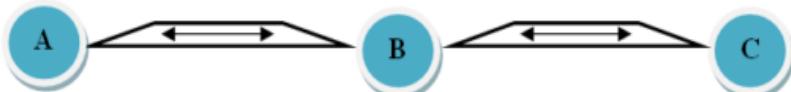
در این ساختار بین ایستگاه‌ها بیش از یک خط وجود دارد و این خطوط به صورت دو جهته^۳ قابل بهره‌برداری می‌باشند. لازم به ذکر است در صورت طراحی مناسب سیستم سیگنالینگ، هر یک از خطوط راه‌آهن می‌تواند از هر دو جهت مورد استفاده قرار گیرد. در این حالت یک شبکه‌ی چند

^۱ Double Track

^۲ Single-Directional

^۳ Bi-Directional

خطه‌ی راه‌آهن به تعدادی شبکه‌ی تک خطه مبدل می‌شود که هریک از خطوط از هر دو جهت قابل بهره‌برداری است. شکل زیر نمایانگر این نوع از ساختار خط است [۱۲].



شکل (۵-۲) ساختار ریلی دو خطه به صورت دو جهته

۴-۶-۲- ساختار ریلی شبکه‌ای

در حالت شبکه‌ای بودن مسئله‌ی زمانبندی حرکت قطارها، مبدا و مقصد قطارها مشخص بوده ولی ایستگاه‌های بین راهی سفر قطارها از پیش تعیین نشده‌اند و بنابراین قطارها مجاز به انتخاب یک مسیر میان تعدادی مسیر متفاوت با ایستگاه‌ها و طول‌های متفاوت است.

۷-۳- برنامه ریزی مجدد حرکت قطار

برنامه ریزی مجدد حرکت قطار یکی از موضوعات و مفاهیم کلیدی در مبحث برنامه ریزی در بخش ریلی است. هنگامی که برنامه اولیه به دلیل اختشاشات در شبکه قابل اجرا نمی باشد برای بازگرداندن برنامه به حالت اولیه خود و یا نزدیک کردن برنامه به برنامه ای اولیه از برنامه ریزی مجدد استفاده می‌شود. برنامه ریزی مجدد می‌تواند شامل بازگرداندن جدول زمانی، برنامه‌ی ناوگان و برنامه‌ی خدمه باشد. که این مفاهیم خود به زمانبندی مجدد حرکت قطار، برنامه ریزی مجدد ناوگان و برنامه ریزی مجدد خدمه تقسیم بندی می‌شود. دلیل استفاده از این نوع برنامه ریزی وجود اختلالات در شبکه است که گاه این اختلالات تاثیرات بزرگی را به همراه دارند و نیاز به برنامه ریزی تمامی بخش‌های مذکور است و گاه تاثیراتشان به اندازه ایست که تنها نیاز به برنامه ریزی مجدد در یک یا دو بخش از قسمت برنامه ریزی می‌شود.

۲-۷-۱- چارچوب برنامه‌ریزی مجدد حرکت قطار

برنامه ریزی مجدد کاری پیچیده و با اندازه‌ی بزرگ است. یک سیستم برنامه ریزی مجدد که وظایف برنامه ریزی مجدد را انجام می‌دهد باید دارای ساختار جامعی باشد.

هر سیستم برنامه ریزی مجدد دارای چارچوب دارای زیر سیستم‌هایی است از جمله: زیر سیستم برنامه ریزی مجدد مجموعه قطار، زیر سیستم برنامه ریزی مجدد خدمه، زیر سیستم برنامه ریزی مجدد قطار و زیر سیستم برنامه ریزی مجدد شانتینگ. هر زیر سیستم اطلاعات مربوطه را مبادله می‌کند و برنامه ریزی را با کمک بقیه زیر سیستم‌ها فراهم می‌کند [۱۶]

۲-۷-۲- انواع اختلالات

یک اختلال مربوط به این حقیقت است که زمان اجرایی برخی از فرآیندهای راه آهن (همچون زمان سیر در بلاک و توقف در ایستگاه) بزرگتر از زمان مشخص شده می‌باشد. در نتیجه، اعزام یا رسیدن قطارها ممکن است بعد از زمانی باشد که برنامه‌ریزی شده باشد. یک تاخیر که باعث می‌شود عملیات بیشتر از زمان برنامه ریزی شده باشد را تاخیر اولیه می‌نامند. این تاخیر ممکن است به آسانی از یک قطار به دیگری انتقال یابد. در این صورت تاخیری که به دومین قطار اعمال می‌شود، تاخیر ثانویه نام دارد. طبق تعریف، یک اختلال چنین است که می‌توان آن را با برنامه ریزی مجدد جدول زمانبندی، بدون توجه به زمانبندی مجدد وظایف خدمه کنترل کرد. این دسته از اختلالات در گروه اختلالات نسبتاً کوچک^۱ قرار می‌گیرند. اما در دسته‌ی دیگری از اختلالات را که گاهًا بنا به دلایل مختلف از جمله بد عمل کردن زیر ساخت یا ناوگان، تصادفات و ... اتفاق می‌افتد نه تنها جدول زمانی هر فعالیت نیاز به روز شدن می‌باشد بلکه خدمه و ناوگان نیز لازم است دوباره برنامه ریزی شوند. این نوع اختلالات را اختلالات نسبتاً بزرگ^۲ دسته‌بندی می‌کنند. در مورد یک اختلال نسبتاً کوچک، تنها جدول زمانی باید به هنگام شود. این بدان معناست که قطارها، برنامه‌ریزی مجدد (اصلاح یا تغییر زمان برای ورود به سگمنت‌ها) یا دوباره مسیر یابی می‌شوند (یک مسیر جدید از یک مجموعه از مسیرهای ممکن در داخل یا بین ایستگاه). در مورد اختلال نسبتاً بزرگ، معمولاً جدول زمانی برنامه‌ریزی مجدد می‌شود چرا که زمانبندی مجدد به عنوان یک ورودی به ناوگانهایی که در مرحله برنامه‌ریزی مجدد هستند داده می‌شود. که در نهایت زمانبندی مجدد جدول زمانی و شرح

^۱ Disturbances

^۲ Disruption

عملیات قطار ها خود به عنوان ورودی برای برنامه ریزی مجدد خدمه به کار گرفته می شود. اصلاح جدول زمانی، برنامه ریزی ناوگان و برنامه ریزی خدمه از لحاظ پیچیدگی با هم شبیه و مرتبط است [۱].

۳-۷-۲- زمانبندی مجدد حرکت قطار

زمانبندی مجدد ترافیک قطارها با ماهیت پویا و همیشه در حال تغییر خود شناخته می شود. پس از آنکه یک برنامه اولیه پایه ایجاد گردید، حوادث و رویدادهای پیش بینی نشده در محیط عملیاتی، موجب اختلال در اجرای برنامه اولیه می شوند. به همین ترتیب برنامه ای قبلی با گذشت زمان منسوخ خواهد شد. بنابراین یک سیستم زمانبندی مجدد ترافیک قطارها بایستی ضمن تجدید نظر در برنامه اولیه، قادر باشد با برطرف نمودن تداخلات حرکت ها، شرایط به وجود آمده را تغییر دهد [۱۷]. در یک جدول زمانبندی سیستم ریلی، حرکت قطارها با توجه به برنامه ای از پیش تعیین شده ای که خالی از تداخلات حرکتی می باشد، تنظیم می گردد. هرگونه اختلال در ترافیک راه آهن در چنین محیطی می تواند باعث ناپایداری سیستم با تأخیرات زیاد هزینه های عملیاتی بالا گردد. بنابراین، هرگونه تداخل حرکتی ناشی از اختلالات و سوانح، بایستی به موقع و به طور موثر برطرف شود [۶]. اختلالات و اتفاقات پیش بینی نشده در سیستم راه آهن ممکن است به علل مختلفی از جمله خرابی تجهیزات زیر ساختی مسیر و یا ناوگان ریلی، نوسانات حجم مسافر، رفتار پرسنل راه آهن و تأثیرات جوی و آب و هوایی به وجود آیند. در این صورت حرکت قطارها مختل شده، تداخلات مسیر حرکت قطارهای برنامه ریزی شده افزایش می یابد [۱۸]. لذا در هنگام وقوع سوانح ریلی، هریک تأثیرات خود را بر جدول زمانی حرکت قطارها می گذارند. ارائه برنامه ای زمانبندی مجدد حرکت قطارها با در نظر داشتن برخی از موارد فوق یکی از نیازهای مهم و اساسی شبکه های ریلی است.

مدل ریاضی زمانبندی مجدد در مساله کنترل ترافیک ریلی، مشابه با مدل ریاضی مساله زمانبندی کارگاهی است. در این مدل، خطوط ریلی موجود بین ایستگاه ها (یا بلاک های بین سیگنال ها) متناظر با ماشین ها و قطارها موجود در هردو مسیر جهت، متناظر با شغل ها در مساله زمانبندی کار کارگاهی هستند. تابع هدف در مدل زمانبندی کارگاهی به حداقل رساندن مجموع زمان حرکت قطار ها (و یا به حداقل رساندن مجموع انحراف قطارها از زمان های اعزام برنامه اولیه) می باشد [۶]. یکی از شاخص های اصلی برای ارزیابی یک برنامه زمانبندی مجدد، میزان تغییر جدول زمانی (SOT) است. هرچه بخش کمتری از جدول زمانی اولیه اصلاح گردد، برنامه زمانبندی مجدد بهتر خواهد بود. تابع هدف در برنامه ریزی مجدد، شامل یک شاخص ارزیابی جدید با نام تغییر جدول

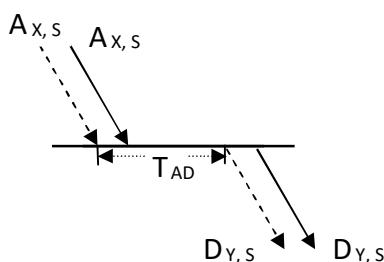
زمانی می باشد [۱۹]. کارایی و سرعت روش حل ارائه شده جهت مساله زمانبندی مجدد، یکی از مهمترین دغدغه های مطرح در طراحی الگوریتم حل مساله برنامه ریزی حرکت قطار ها می باشد. زیرا در شرایط واقعی زمانبندی مجدد بایستی به موقع و با رعایت سقف زمانی مجاز حل گردد. مفهوم کارایی با توجه به شرایط و موقعیت های مختلف متفاوت است با این حال، می توان گفت به طور کلی زمانی در حدود ده دقیقه، کران مناسب و قابل تحملی جهت زمان حل مساله زمانبندی مجدد است [۶]. یکی از نکات مهم و تاثیر گذار بر کارایی روش حل اندازه مساله است. اندازه مساله زمانبندی مجدد به تعداد تلاقی / عبور قطارها (تعداد تداخلات بین قطارها) بستگی دارد. تداخلات قطارها به نوبه خود به طول خط، شدت ترافیک، سرعت قطارها و تنوع آنها و طول دوره زمانی بستگی دارد [۱۹].

اگر T_{AD} حداقل زمان میانی ورود - اعزام در نقطه تقاطع ایستگاه S و T_{DA} زمان میانی اعزام - ورود باشد. در شکل زیر ارتباط پایه ای بین ورود قطار X و اعزام قطار Y نشان داده شده است که زمان رسیدن قطار X به ایستگاه S و $D_{Y,S}$ زمان اعزام قطار Y از ایستگاه S می باشد.



شکل (۷-۲) ارتباط بین دو قطار پایه

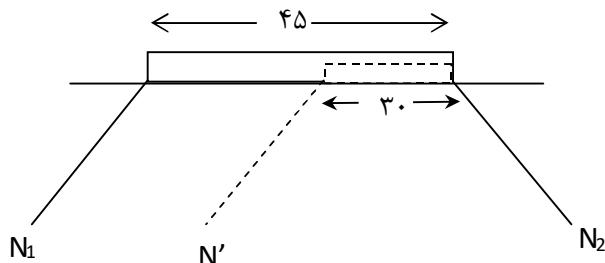
در برنامه ابتدایی ممکن است زمان واقعی میانی بین $A_{X,S}$ و $D_{Y,S}$ از T_{AD} و T_{DA} بزرگتر باشد و تفاوت آنها زمان شناوری بین دو رخداد است. فرض شود زمان میانی رخداد ورود قطار X و رخداد اعزام قطار Y در برنامه ابتدایی دقیقا به اندازه حداقل زمان میانی باشد. این به این معنا است که زمان شناوری بین دو رخداد وجود ندارد و اگر قطار X به علت تأخیر داشته باشد قطار Y هم بایستی تأخیر داشته باشد که در شکل زیر این موضوع نشان داده شده است.



شکل (۷-۳) تأخیر قطار اعزامی به دلیل تأخیر در قطار ورودی

در حالتی که ابتدا ورود صورت می‌گیرد شکل a بدون برنامه ریزی مجدد توالی رخدادها هر چه قدر قطار X بیشتر تاخیر کند قطار Y هم بیشتر تاخیر می‌کند. در این حالت اگر قطار X و Y دارای اولویت یکسانی باشند و قطار X تاخیری بیشتر از نصف T_{AD} داشته باشد ممکن است اگر ابتدا قطار Y اعزم شود ترتیب بهتری برای رسیدن به تاخیر کمتر همه قطارها ایجاد شود. ممکن است چنین شرایطی برای اعزم ابتدایی شکل b وقتی قطار Y دچار تاخیر می‌شود، در نظر گرفته شود.

در صورتی که بین دو رخداد زمان شناوری وجود داشته باشد و تاخیر از زمان شناوری بین دو رخداد بیشتر نباشد نیاز به ایجاد اصلاحات در برنامه اولیه و انجام برنامه ریزی مجدد نیست. مثلاً در ایستگاه پایانی زمان دور زدن قرار داده می‌شود تا قطار دور بزند. گاهی چندین دقیقه زمان شناوری همراه این زمان دور زدن وجود دارد. شکل زیر مثالی از این حالت است که در آن قطار N₁ به ایستگاه S رسیده است و قطار N₂ قطار اعزامی از ایستگاه S با همان واگن‌های استفاده شده از N₁ است. فرض زمان حداقل دور زدن ۳۰ دقیقه در ایستگاه S باشد. سپس اگر قطار N₁ به اندازه ۱۵ دقیقه به تاخیر داشته باشد قطار اعزامی N₂ هنوز می‌تواند از ایستگاه S بدون تاخیر اعزام شود.



شکل (۱-۲) تاثیر زمان شناوری در حرکت قطارها

ولی اگر طول مدت تاخیر از زمان شناوری بیشتر باشد نیاز به زمانبندی مجدد است.

زمانبندی مجدد معمولاً توسط اپراتورهای ورزیده و با تجربه انجام می‌شود که اعزم کننده نامیده می‌شوند. زمانبندی مجدد رفت و آمد قطار ممکن است آثار اقتصادی متفاوتی داشته باشد. یک زمانبندی مجدد کارا فقط شرایط کار و سرویس را بهبود نمی‌بخشد بلکه زمان سفر را کاهش می‌دهد که این هزینه سرمایه در واگن و خدمه را کاهش می‌دهد. سطح سرویس، قابلیت انتکا و سرعت سفر که می‌توانند از نتایج زمانبندی مجدد متاثر شوند از فاکتورهای مهم مشتری است که منافع

راه آهن به آن وابسته می باشد. روش هایی که برای اصلاح برنامه ریزی به کار می رود در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول (۲-۲) اقدامات موجود در برنامه ریزی مجدد

| روش | انجام اصلاح |
|--------------------------|---|
| لغو | لغو کردن عملیات قطار |
| لغو جزئی | لغو کردن قسمتی از عملیات قطار |
| قطار اضافی | وارد کردن قطاری که در برنامه اولیه وجود نداشته است |
| گسترش فعالیت قطار | گسترش دادن عملیات قطار |
| تغییر برنامه مجموعه قطار | تغییر دادن برنامه‌ی مجموعه قطار |
| تغییر خط ^۱ | تغییر دادن خط قطار در ایستگاه |
| تغییر زمان اعزام | تغییر دادن زمان اعزام قطار |
| تغییر زمان تلاقی | تغییر دادن زمان تلاقی قطارها در منابعی مثل تقاطعها |
| تغییر توقف / عبور | متوقف کردن قطار در ایستگاهی که در برنامه اولیه قرار بوده است از آن عبور کند |
| تغییر نوع قطار | تغییر دادن نوع قطار (مثلاً قطار اکسپرس به عادی تغییر کند). |

۴-۷-۲- عمده مشکلات زمانبندی مجدد

(۱) به کار بردن معیاری که به طور کامل قابل اجرا باشد بسیار مشکل است. معیارهای زمانبندی مجدد بر اساس فاکتورهای مختلفی مثل سختی تصادف، زمان رخ دادن تصادف و خصوصیات خط متفاوت است. به عنوان مثال اگر چه تاخیر قطار معمولاً ناخوشایند است، بازگشتن به برنامه در خطوط راه آهنی که قطارها با فاصله کم مشغول فعالیت اند زیاد مهم نیست و مهم تر آن است که از زیاد شدن بیش از حد فاصله قطارها جلوگیری شود. معیار بر طبق زمان رخ دادن تصادف هم متفاوت خواهد بود. در زمان ساعت‌ها و ترافیک در صبح، نگه داشتن فاصله مناسب بین قطارها مهم تر از کم کردن تاخیر است. در حالی که در عصر رسیدن به برنامه قبل از اوج ترافیک غروب مهم تر خواهد بود و گاهی اوقات تعداد قابل

^۱ Track

توجهی از قطار ها لغو می شوند.

(۲) زمانبندی مجدد قطار ها یک مساله ترکیبی با اندازه بزرگ است. در مناطق شهری تعداد قطار ها به صدها و گاهی اوقات به هزار ها می رسد.

(۳) سرعت زیادی لازم است. چون زمانبندی مجدد قطارها برای اصلاح برنامه ی قطارهایی انجام می شود که هم اکنون در حال عمل اند و این کار بایستی سریع انجام گردد.

(۴) همه اطلاعات مورد نیاز را نمی توان به دست آورد. برخی از اطلاعات برای زمانبندی مجدد بهتر، لازم است. به عنوان مثال چه تعداد مسافر در ایستگاه برای قطار منتظراند و یا منتظر خواهند بود. چه تعداد مسافر از ایستگاه خارج خواهند شد. با تکنولوژی های موجود سخت و تقریباً غیر ممکن است که این اطلاعات را به دست آورد و یا تخمين زد.

به طور خلاصه مساله زمانبندی مجدد مساله ای با ساختار مشکل^۱ نامیده می شود. که دارای اندازه بزرگ، پیچیده و با معیار های مبهم است.

چون زمانبندی مجدد قطار ها امر بسیار مشکلی است امروز تا حدی از سیستم های اتوماتیک کمک گرفته شده است. اگرچه آنها توابعی برای پیش بینی قطار ها دارند اما مشکل این است که این توابع برای زمانبندی مجدد به طور اتوماتیک بسیار ضعیف می باشند. آنها دارای توابعی هستند که فقط تغییر زمان اعزام قطار را پیشنهاد می کنند و سایر روش اعم از لغو، تغییز نوع قطار، تغییر نوع خط و ... اجرا نمی کنند. بنابراین انجام زمانبندی مجدد بر عهده اعزام کننده می ماند.

برای مواجهه با مساله زمانبندی مجدد به عنوان مساله بهینه سازی معیار هایی که تا به حال به کار رفته اند به صورت زیر می باشند:

I. زمان تاخیر قطار ها باید حداقل شود.

II. تعداد قطار های لغو شده باید حداقل گردد.

III. زمان رسیدن به ترافیک نرمال باید حداقل شود.

IV. نارضایتی مسافران باید حداقل شود.

V. فاصله بین سرویسی که مسافر انتظار دارد با آنچه عملآ دریافت می کند باید حداقل گردد.

هیچ یک از معیارهای بالا به طور کامل قابل قبول نیستند چون زمانی که برنامه ریزی مجدد انجام می شود متفاوت است. مثلاً تعداد زیاد قطار های لغو شده باعث کم شدن مقدار تاخیر می شود اما مسافران به سختی می افتدند چرا که قطارها شلغ و تناوب قطار ها کم می شود. اگرچه درست است که لغو قطارها موجب به زحمت افتادن مسافرین می شود اما گاهی اوقات روشی کارا برای بازگرداندن

^۱ Ill-structured

برنامه به حالت عادی است. بنابراین اغلب پسندیده است که تعدادی از قطار ها لغو شوند مخصوصاً زمانی که تصادف قبل از زمان اوج ترافیک رخ می دهد. لازم به ذکر است که اندازه گیری نامطلوبیت برای مسافران و فاصله بین سرویس ارائه شده به عنوان معیار از نگاه مسافران با تکنولوژی های فعلی سخت است.

هر اعزام کننده قطار در هنگام زمانبندی مجدد استراتژی خاص خود را برای تصمیم گیری دارد که منجر به تفاوت در تصمیم گیری ها می شود. به عنوان مثال در شرایط ثابت ممکن است اعزام کننده ای استراتژی بازگرداندن هرچه سریع تر ترافیک مختل شده را در نظر بگیرد در حالی که اعزام کننده دیگری تصمیم بگیرد تا ظرفیت راه آهن را در حد کارایی نگه دارد. به این صورت هر اعزام کننده برای برنامه ریزی مجدد، استراتژی های مخصوص خود را دارد.

برخلاف مسئله زمانبندی حرکت قطارها که دهها سال سابقه پژوهش دارد، اکثر مطالعات انجام شده در زمینه زمانبندی مجدد حرکت قطارها مربوط به حدوداً سال سال گذشته است و این مبحث نسبت به مسئله زمانبندی اولیه موضوع جدیدتری محسوب می شود.

در ادامه ادبیات موضوع زمانبندی مجدد حرکت قطارها مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین در بخش های انتخه های فصل جمع بندی مطالعات صورت گرفته در این حوزه ارائه می گردد.

۲-۸-۲- ادبیات موضوع

در ابیات موضوع زمانبندی مجدد حرکت قطارها نامهای مختلفی برای این موضوع مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان نمونه در ادبیات موضوع مسئله اعزام قطارها^۱ مترادف با مسئله زمانبندی مجدد حرکت قطار مورد استفاده قرار گرفته است [۵] همچنین مسئله مدیریت اختلال در سیستم ریلی^۲ و مسئله شناسایی و رفع تداخل^۳ [۱] و مسئله انحراف ترافیک قطارها^۴ [۲۰] از جمله عنوانی هستند که بدین منظور در ادبیات به کار گرفته شده اند. با بررسی مقالات و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه مشخص می گردد که دسته بندی های مختلفی برای این موضوع وجود دارد. یکی از دسته بندی هایی که می توان بر ادبیات موضوع داشت کاربرد هریک از مطالعات انجام شده است که این دسته بندی شامل موارد زیر می شود:

^۱ Train Dispatching Problem

^۲ Railway Disruption Management Problem

^۳ Conflict Detection and Resolution Problem

^۴ Train Traffic Deviation Problem

- ✓ راهآهن بین شهری
- ✓ مترو
- ✓ راهآهن حومه‌ای
- ✓ و راهآهن سریع السیر

دسته بندی دیگری که وجود دارد بر اساس نوع تحقیق می باشد که آیا مدل شبیه سازی^۱ می باشد یا بهینه سازی^۲. در بهینه سازی تصمیم مشخص است و بر اساس اهداف از پیش تعیین شده به دنبال اتخاذ بهترین تصمیم می باشیم اما شبیه سازی بیشتر برای تحلیل رفتار سیستم به کار می رود و به دنبال پاسخ دادن به خیلی سوالات از جنس "چه می شود اگر..." بدون اجرا در زمان واقعی می باشد. که تحقیقات انجام شده در بخش بهینه سازی یا بر ارائه مدل ریاضی تمرکز دارند یا بر ارائه روش حل و یا هر دو. همانطور که پیش تر نیز ذکر شد هدف از انجام این پژوهش ارائه مدل ریاضی برای حل مسأله زمانبندی مجدد حرکت قطار در صورت خرابی ناشی از لکوموتیو می باشد. در ادامه به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه زمانبندی مجدد حرکت قطارها در هنگام بروز اختلال (اختلالات نسبتاً کوچک و اختلالات نسبتاً بزرگ) می پردازیم.

ساهین مساله تداخل آنی^۳ دو قطار مختلف الجهت در یک سیرگاه را با استفاده از دو روش مدل کرده است؛ ۱- برنامه ریزی خطی بر اساس تصمیمات قبلی اعزام گران ۲- ارائه یک الگوریتم ابتکاری. مدل کردن رفتار اعزام گران جهت تصمیم گیری با یافتن وزن هریک از ویژگی های یک تداخل انجام شده است.تابع هدف مدل ریاضی کمینه سازی میزان تاثیر (مجموع انحراف زمانهای رسیدن مورد انتظار قطارها از برنامه اولیه) است. خلاصه نحوه کار الگوریتم ابتکاری بدین صورت است، یک تداخل آنی شناسایی می شود، بر مبنای تعداد تداخل بالقوه آن تداخل آنی، زمان مورد انتظار جهت رسیدن قطار متداخل به مقصدش محاسبه می شود و بر مبنای میزان انحراف هر قطار متداخل از برنامه اولیه ش اولویت اعزام از بین دو قطار متداخل انتخاب می گردد. در این مطالعه ۳۵ مثال مختلف به همراه یک بخش از مسیر راه آهن استانبول – آنکارا از کشور ترکیه مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج نشان دهنده آن است که با توجه به الگوریتم پیشنهادی کیفیت جواب های حاصله تا ۲۲ درصد نسبت به جوابهای حاصل از عملکرد اعزامگران بهبود یافته است [۶].

^۱ Simulation

^۲ Optimization

^۳ Immediate Conflict

چیزی و همکاران ابزار تعاملی بر اساس محدودیت‌های توسعه توصیف می‌کنند دو معیار بهینه مد نظر می‌باشد ۱- کمینه سازی تعداد مراجعات به ایستگاهها . ۲- کمینه سازی تاخیرات مسافران. در این ابزار محدودیت سرعت، زمان‌های هدوی مابین قطارهایی که یک خط مشترک را اشغال کرده‌اند، زمان‌های هدوی مابین ورود و خروج قطارها به ایستگاه، سبقت‌گیری و حداقل زمان توقف قطارها در ایستگاه در نظر گرفته می‌شود. زمان بندی مجدد شامل : تنظیم زمان‌های ورود و خروج قطارها می‌باشد الگوریتم‌های ابتکاری در بخشی از شبکه که شامل ۴ خطوط راه‌آهن مابین لانجستی و شانگهان در چین است تست شده است آزمایشات امکان پذیر بودن رویکرد توصیف شده را در کسری از ثانیه در تعداد جواب، نشان می‌دهد [۲۱].

چانگ با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک (GA) مسئله زمانبندی اولیه را حل نموده است. سپس با استفاده از برخی پارامترهای به دست آمده از حل مسئله قبلی و استفاده دوباره از الگوریتم ژنتیک، مسئله زمانبندی مجدد را نیز حل کرده است. تابع هدف در این مسئله کمینه کردن مجموع میانگین زمان سفر مسافرین، میانگین ضریب بار و تغییر جدول زمانی می‌باشد [۱۹]

گلی یک مدل ریاضی به منظور توصیف مسئله برنامه‌ریزی مجدد جدول زمانی برای قطارهایی که دارای تاخیر در حرکت می‌باشند، ارائه کرده است. این مدل شامل متغیرهای پیوسته برای نشان دادن زمان‌های ورود و خروج قطار از هر گره موجود در شبکه است و همچنین شامل متغیرهای باینری برای نشان دادن بازترتیب نشانی^۱ (به این مفهوم که آیا یک قطار خاص قبل از یک قطار دیگر در یک گره خاص در شبکه عبور کرده است یا خیر) و نشان دادن انتخاب‌های مسیر^۲ (به این مفهوم که آیا یک قطار از یک مسیر خاص استفاده کرده است یا خیر) و همچنین برای نمایش ایست‌های اضافی^۳ (اینکه یک قطار در یک گره بیش از زمانی که در جدول زمانی برایش در نظر گرفته شده بود توقف کرده است یا خیر) استفاده شده است و محدودیت‌های اصلی این مسئله نیز شامل محدودیت‌های مربوط به زمان‌های سرفاصله بین قطارها، زمان‌های سیر و همچنین عدم امکان حرکت قطارها در ایستگاه قبل از زمان برنامه ریزی شده در جدول زمانی اولیه، می‌باشد. هدف مسئله کمینه سازی مجموع تاخیرات قطارها می‌باشد. الگوریتم‌های ارائه شده برای حل مدل شامل الگوریتم‌های تکاملی و ترکیبی هستند. این روش‌های برای نمونه‌های واقعی برای کمپانی SNCF فرانسه به کار برده شده است که شامل سیستم راه‌آهنی ما بین تورس^۴ و بوردوخ^۵ می‌باشد.

^۱ Re - ordering

^۲ Track choices

^۳ Extra - stops

^۴ Tours

^۵ Bordeaux

این نمونه شامل ۲۰۰ قطار در پنجره زمانی ۱۵:۰۰ تا ۲۳:۰۰ می باشد. نتایج نشان می دهد که تصمیم های به دست آمده برای مدیریت ترافیک راه آهن موثر و امکان پذیر هستند [۲۲]

دی آریانو و همکاران یک الگوریتم شاخه و کران^۱، برای برنامه ریزی قطارها در زمان اجرایی پیشنهاد دادند. این مدل ممکن است شامل صدها ماشین (قسمت های بلاک شده) و کار (قطار) برای نمونه های زندگی واقعی باشند، در نتیجه بسیار دشوار خواهد بود که بتوان انها را در زمان واقعی حل نمود. به منظور مقابله با این مسئله نویسندهای این مقاله پیشنهاد استفاده از قواعد ایستا و پایا را دادن . این قانون به منظور سرعت بخشیدن به الگوریتم شاخه و کران بود، در بخش استاتیکیک الگوریتم کمان های غیر فعال شبکه رو بررسی می کند و تعدادی جواب جزئی را پیدا می کند گرچه ممکن است که خروجی این بخش خالی از جواب نیز باشد. (در اغاز تنها شامل راه حل آغازین می باشد). در هر مرحله الگوریتم یک راه حل جزئی را از میان لیست قابل اتخاذ و یک جفت کمان انتخاب نشده را انتخاب می کند و دو راه حل جزئی را می سازد. یک کمان شامل (I,j) و دیگری شامل کمان (H,K) که در آن قواعد برداشته شده ایستا در نظر گرفته می شود، سپس قانون داینامیک به محاسبه می پردازد که به همین منظور ، از برنامه ریزی پیشگیرانه ای که جکسون به کار گرفته است استفاده می کنند. اگر حد پایینی کوچکتر از مقدار بهترین راه حل پیدا شده باشد آنگاه دو راحل جزئی به لیست اضافه خواهد شد. سه الگوریتم هیوریستیک که سعی در برتری جوین یا یکسان سازی در متود های بکار گرفته شده در صنعت راه آهن هستند به کار گرفته می شود. تجارب محاسباتی در نمونه بزرگی از نمونه جهانی در محدوده فرودگاه شین اوپل امستردام اجراه شده است. جدول زمان بندی شامل ۵۴ قطار است که هر ساعت یک سفر را کامل می کنند و با تأخیرات با سناریوهای مختلفی اندازه گیری شده است. الگوریتم شاخه و کران با سه روش هیوریستیک مقایسه می گردد، محدود زمان محاسبه بر روی ۱۲۰ ثانیه بر روی یک لپتاپ با پردازنده ۱,۶ گیگا هرتز محدود می شود. الگوریتم قادر است که راه حل بهینه برای ۲۹۷ از ۳۰۰ مورد بدست آورد. افزون بر آن این روش قادر است که ماکریم تاخیر دوم را تقریباً صد ثانیه کاهش دهد [۱۴].

ترنکویست و پرسنت یک مدل MIP ارائه کرده اند که در ان مسیریابی و ترتیب گذاری قطارها در نظر گرفته شده است. مدل شامل متغیر های پیوسته برای نشان دادن زمان های اغاز و پایان یک واقعه و نشان دادن زمان تأخیرات یک واقعه هستند. افزون بر ان شامل متغیر های باینری می باشد

^۱ Branch-and-bound

که نشان می دهد آیا یک قطار از یک خط یا مسیر استفاده می کند یا خیر و همچنین به منظور تصمیم گیری در مورد ترتیب قطارها مورد استفاده قرار میگیرد. هدف کمینه سازی هزینه بر اساس تاخیرات زمان قطارها میباشد. برای حل کامل مدل احتمالا نیاز به تلاش محاسباتی زیادی میباشد به علاوه از ان جایی که ترتیب قطارها بر روی ریل قبلاً توسط جدول زمان بندی اغازین تعیین شده است برایند ثابت میماند و اغلب اوقات تنها نیاز به تغییرات جزئی وجود دارد. بنابراین چهار استراتژی یا راهبرد مورد ارزیابی قرار میگیرد این راهبرد ها اصولاً ترتیب قطارها را حفظ میکند و تنها اجازه به تغییرات کوچکی در تغییر اولویت میدهدند. این مقاله مسئله زمانبندی مجدد را در ترافیک راه اهن در قسمت جنوبی در شبکه راه آهن سوئیس که استوگهان گوتمن برگ و کوپن هایگن را به هم متصل میکند، در نظر میگیرد. نمودها و مورد ها در این حالت ۵۰۰ قطار میباشد در این آزمایشات اختلالات کوچک در زمان اوج ترافیک در افق زمانی بین ۳۰ تا ۹۰ دقیقه ایجاد شده است [۲۳] از آن جایی که روش توصیه شده در این پژوهش بعضی موقع با مشکلاتی برای پیدا کردن بهترین را حل در یک مدت زمان کوتاه چند ثانیه مواجه است، ترنکویست یک رویکرد ابتکاری حریصانه برای حل همان مشکل ارائه کرده است. در این روش به منظور پیدا کردن راه حل بهتر در کوتاه ترین زمان در بخش ابتکاری الگوریتم یک جستجوی عمیق مابین شاخه ها بر اساس مجموعه ای از معیارها انجام می گیرد. این الگوریتم ابتکاری برای نمونه ها راه حلی را ارائه می کند که توسط رویکرد ثابت در مقاله‌ی ترنکویست پرسنلت ۲۰۰۷ موثر نبود. به طور کلی این کار ابتکاری می تواند راه حل ها را به اندازه کافی سریع و خوب ارائه دهد اما بر اساس گفته خود نویسنده امکان ارتقای ان همچنان وجود دارد [۲۴].

رودریگز در مطالعتش با ترتیب گذاری و مسیر یابی مجدد قطارها برای شبکه راه آهن مناطق شمالی پاریس انجام داده است. مدل برنامه ریزی زمان بندی کارگاهی با محدودیت منابع اضافی برای یافتن تناقض های موجود در بین قطارها به کار گرفته شده است. این تناقضات با تکنیک های برنامه ریزی حل شده اند. در مقایسه با تکنیک های به کار گرفته شده در SNCF این برنامه نویسی مبتنی بر محدودیت قادر به کاهش ۶۲ تا ۹۵ درصد تاخیرات در بازه زمانی ۱۸۰ ثانیه بوده است [۲]

لوثی و همکاران برنامه ریزی مجدد قطارها را در زمان اجرا با هم ترکیب کردنده به این مفهوم که جداول زمانی موجود را در پاسخ به اختلالات و کنترل قطارها به روز رسانی کردنده به طوری که آنها می توانند مسیر داده شده را با دقیقی از قبل تعیین شده در یک سیستم یکپارچه دنبال کنند. مدل

پیشنهاد شده در یک مطالعه موردی در شبکه راه آهن در اطراف لورنس در سوئیس تست شده است. روش تست شده تاخیر کلی سیستم را به طور محسوسی کاهش می دهد. این پژوهش به اهمیت کنترل دقیق بر اجرای جدول زمانبندی اشاره می کند. چرا که تاخیرات کوچک می توانند موجب ایجاد تاخیرات بزرگ شوند [۲۵]

شوبن مسئله مدیریت تاخیر را برسی می کند که شامل تصمیم گیری در مورد این است که ایا قطارهای مرتبط به یکدیگر بایستی در ایستگاه به خاطر تأخیر قطارهای ناوگان منتظر بمانند و یا بایستی در یک زمان معینی ایستگاه را ترک نماید، به عبارت دیگر مسئله مورد بحث در مورد تصمیم گیری این است ایا ارتباطات بایستی حفظ شوند و همچنین کدامیں یک از این ارتباطات بهتر است که رعایت نشوند. هدف کمینه سازی تاخیر کلی مسافر می باشد . نویسنده مقاله یک مدل MIP مبتنی بر مسیر و یک مدل MIP مبتنی بر فعالیت ارائه کرده است. هر دو مدل بر اساس مسئله مدیریت تاخیر با استفاده از فعالیت روی شبکه بیان شده اند. مورد دوم شامل : گره ها به منظور دقایق ورود و خروج و مجموعه ای از کمان های فعال، که خود مرتبط با قطارهای در حال انتظار و یا در حال حرکت هستند و به نوبه خود مسافران را از یک قطار به قطار دیگر در یک ایستگاه انتقال می دهد. لذا یک جدول زمان بندی براساس اختصاص دادن زمان بر هر واقعه به دست می اید بطوری که کوتاه ترین زمان برای هر مسیر را نشان می هد، که به کمک ان می توان معین کرد که آیا تمام ارتباطات بر روی یک مسیر حفظ شده است یا خیر . دو محدودیت تضمین می کند تاخیر در اغاز یک فعالیت به انتهای ان منتقل می شود جایی که در ان بتوان زمان شناوری برای یک فعالیت را کاهش داد، تا فعالیت را به سریعترین شکل ممکن انجام دهد برای فعالیت های در حال تغییر مسافر محدودیت های اضافی بکار گرفته می شود تا پیش نیاز های زمانی بر اورده شود. هدف کاهش تاخیر کل مسافر می باشد . این عمل منجر به یک تابع هدف درجه دو می شود که می تواند خطی سازی شود . مدل مبتنی بر فعالیت برابر است با همان مدل مبتنی بر خط . به طوری که هر دو به مجموعه جواب های بهینه ی یکسانی ختم می شوند. مدل مبتنی بر فعالیت دارای تابع هدف درجه سوم می باشد و شامل محدودیت ها و متغیر های زیادی می شود اما این مزیت را دارد که یک الگوریتم مبتنی بر شاخه و کران به راحتی می تواند با استفاده از شاخه بندی بر روی متغیرها پیاده سازی شود یک مدل ساده سازی از مدل درجه سوم نیز ارائه شده است که در ان برنامه خطی عدد صحیح به دست امده است که این امر نشان می دهد خط سازی بر اساس شرایط خاصی صادق

دیاریانو با ساده سازی بعضی از جداول و زمان بندی در رما مدلی با انعطاف پذیری بهتری در زمان اجرا به دست آورده است. انعطاف پذیری در زمان ورود و خروج مستلزم داشتن دو جدول زمان بندی است. زمان بندی عملیاتی که در آن پنجره زمانی مورد بحث است (ماکزیمم و مینیمم زمان های ورود و خروج) و جدول زمان بندی عمومی که به مسافران نمایش داده می شود که تنها شامل حداقل زمان اعزام و حداکثر زمان رسیدن می باشد. هدف که بهینه سازی تاخیر حرکت قطار هاست نتایج تجربی در منطقه پرترافیک فرودگاه شین پل امستردام با در نظر گرفتن (اختلالات) تصادفی به دست آمده است. به طور اخص نویسندها از جدول زمانبندی دقیق که در راه آهن هلند تهیه شده است شروع کرده‌اند، این جدول زمانبندی تنها مقدار محدوده زمان وافر یا زمان های به منظور بازیابی از تاخیرها ارائه میدهند. نویسندها این مقاله یک جدول زمانبندی انعطاف پذیر به وسیله جایگزینی زمان های ورود و خروج برنامه ریزی شد توسط زمان خروج کمینه و زمان های ورود بیشینه توسعه داده اند. انواع مختلفی از اختلالات کوچک در نظر گرفت شده است. به منظور مقایسه بین جدول زمان بندی انعطاف پذیر و جدول زمان بندی سخت گیرانه برنامه ریزی مجدد به کار بسته شد. نتایج به دست آمده از جدول های زمانی نوید بخش بوده است لذا الگوریتم شاخه و کران عملکرد بهتری نسبت به قبل از خود نشان داده است. با به دست آوردن انحراف حداکثر ۲۶ درصدی از حد پایین در حالی که سه روش صحیح و خطأ و انحرافی بالای ۸۵ درصد انحراف از حد پایین نشان می دهند. با افزایش انعطاف پذیری از زمان صفر به ۱۲۰ ثانیه الگوریتم شاخه و کران با کاهش ۳۰ درصد مجموع تاخیرات برخوردار است [۲۷]. مفهوم جدول زمانبندی انعطاف پذیر به مدیریت ترافیک پویا مرتبط است، نکته اساسی و مهم تر در اینجا اجازه دادن زمان آزادی بیشتر به عملیات های در حال اجرا به وسیله برداشتن محدودیت های زمان بندی است همان طور که شافسما و بارژولوموز (۲۰۰۷) این موضوع را شرح داده اند. که در مرحله برنامه ریزی تنها ترتیب تقریبی و جزئی از قطارها تعیین شده است یعنی تا آن زمان به تاخیر افتاده است. مدیریت ترافیک پویا در عمل به شبکه پر ترافیک در اطراف فرودگاه امستردام در هلند به کار رفته است. به نظر می رسد که این مقیاس برای مدیریت تعداد زیادی از قطارها در گلوگاه ها مناسب و کافی باشد [۲۸].

ترتیب بندی مجدد در زمان اجرا توسط شیمیزو در یک مطالعه‌ی محیطی در شبکه راه آهن شین گان سن در شمال توکیو مورد بررسی قرار گرفته است در این مقاله فرض بران گرفته شده است یک

رخداد با اختلال بزرگ در بخش اعظم از شبکه راه اهن ما بین دو ایستگاه اتفاق افتاده است و این اختلال تاثیر بالقوه ای در شبکه راه اهن می گذارد. یک رویکرد برنامه نویسی مبتنی بر محدودیت توسعه داده شده است که در ان تغییرات به ترتیب خروج قطارها از ایستگاه ها به منظور کمینه سازی تاخیرات مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش محدودیت های که انحراف از زمان های خروج در جدول زمان بندی اصلی به ان اشاره شده است مورد مدیریت قرار گرفته است راه حل های در طی ۱۵ ثانیه محاسبه به دست آمده است [۲۹].

مانی نو ماسیس یک الگوریتم شاخه و کران دقیق برای استفاده در زمان اجرا برای مهم ترین کمپانی حمل و نقل عمومی در شهر میلان ایتالیا یعنی آندا ترنسپورت میلان^۱ (ATM) توسعه داده اند. همانطور که در قبل نیز شرح داده شد زمانبندی مجدد می تواند ابتدا با انتخاب یک مسیر برای قطارها و سپس با محاسبه ای زمان آن، موضوع را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. راه حل پیشنهاد شده در این مقاله شامل در نظر گرفتن تمامی راه حل های امکان پذیر برای قطار هاست و سپس مدل به حل آن می پردازد. برای هر مسیر یک مسئله مسیر یابی یا جاب شاپ مورد استفاده قرار می گیرد. این روش انحرافات زمان از زمان برنامه ریزی شده برای اعزام و هزینه های مرتبط با آن به دلیل تخطی از مقررات را کمینه می کند. به منظور تسريع بخشیدن در محاسبات حدود، زمانبندی کارگاهی بر اساس جریانات شبکه توسعه داده اند. این مطالعه بر روی یکی از پایانه های سیستم ریلی شهر میلان انجام شده است و در ۸ نمونه انجام گرفته که شامل ۴ تا ۸ قطار بوده است. بهینه سازی بر روی یک سیستم کامپیوتری با پردازنده ای ۴ هسته ای ۳,۲ گیگا هرتزی در کسری از زمان اجام شده است. که نتایج به دست آمده با نتایجی که توسط افراد اعزام کننده ای حاصل شده است مقایسه گردیده که این نتایج زمان را تا ۸ درصد بهبود و در عین حال به حرکت ها نیز نظم بهتری داده است [۳۰].

شوبن [۳۱] و شاتبک و شوبن [۳۲] نیز در مقالات خود محدودیت ظرفیت راه و خطوط را در نظر گرفته اند و یک الگوریتم شاخه و کران با رویکرد های ابتکاری و تجربی برای حل این مسائل توسعه داده اند. الگوریتم های بدست آمده تست شده و در مقایسه با یکدیگر قرار گرفته اند و بروی راه اهن آلمان بر اساس داده های واقعی در کمپانی دویچه بان که شامل بخشی از شبکه راه اهن آلمان

^۱ Azienda trasporti milanesi

هستند، پیاده سازی شده است ،

کاکچیانی مسأله‌ی زمانبندی مجدد را با رویکردی متفاوت و با هدف اضافه کردن حداکثر تعداد قطارهای باری اضافی ممکن به جدول زمانی موجود توسعه داده است. برخی از قطارهای مسافری دارای برنامه‌ای از پیش تعیین شده می‌باشند و مدل قطارهای باری جدید را به نحوی اضافه می‌کند که در برنامه‌ی قطارهای مسافری تغییری ایجاد نگردد. مسأله با استفاده از الگوریتم ابتکاری مبتنی بر لاگرانژین رلکسیشن حل شده است. یکی از مسیرهای راه آهن ایتالیا به عنوان مطالعه‌ی موردی بررسی شده است [۳۳].

در مانینو [۳۴]، لامورجز و مانینو [۳۵] و لامورجز و مانینو [۳۶] زمانبندی مجدد به وسیله یک رویکرد تعاملی بین میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک حل شده است. به طور خاص پایه و اساس این پژوهش‌ها به دو بخش تقسیم شده است که کنترل ترافیک خطوط را با رویکرد ماکروسکوپیک و کنترل ترافیک ایستگاه‌ها را با رویکرد میکروسکوپیک تجزیه کرده‌اند. لذا به همین منظور نیز یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط یا همان مدل MIP برای حل مسئله زمانبندی مجدد بر روی یک سیستم راه آهنی تک خطه و چند خطه پیشنهاد کرده‌اند. در این مدل از متغیرهای باینری به عنوان نشان دادن محل تلاقی قطارها و متغیرهای پیوسته جهت نشان دادن زمان‌های اعزام و رسیدن استفاده شده است. محدودیت اساسی در این مدل برخورد یا به هم رسیدن قطارها در یک ایستگاه با توجه به ظرفیت آن ایستگاه است. لذا برای حل موضوع ظرفیت ایستگاه دو حل در نظر گرفته اند که یک فرمول بندی غیر فشرده و دیگر جریان فشرده را در نظر گرفته است. که بر اساس آن مدل با بکار بردن روش بندرز به صورت ترجیحی حل می‌شوند. بر اساس چندین فرضیه این مدل می‌تواند جواب‌های بهینه را برگرداند. نتایج محاسبه شده توسط مانینو و لومارجز (۲۰۱۲) [۳۵] نشان می‌دهد که روش non-compact نتایج بهتری در نمودارهای واقعی بر روی راه آهن تک خطه ایتالیا ایجاد می‌کند. میانگین این محاسبات کمتر از ۸ ثانیه برای فرمول فشرده و تقریباً ۲ ثانیه برای فرمول غیر فشرده می‌باشد. این نتایج بر روی یک سرور با پردازنده‌ی اینتل و با سرعت ۱,۸ گیگا هرتزی به دست آمده است.

آکونا آگوست و همکاران برای حل مسئله زمان‌بندی مجدد یک مدل MIP ارائه کرده‌اند که مدل ارائه شده در ترنکویست و پرنست را توسعه می‌دهد. دو بخش توسعه داده شده نسبت به مدل‌های قبلی وجود دارد. اولین مورد این است که نوسیندگان به طور واضحی این حقیقت را نشان دادند که

توقف های برنامه ریزی نشده می تواند بیشترین زمان مجاز و کمترین زمان مجاز حرکت را تغییر دهد. مورد دوم تغییرات بر روی برخی از محدودیت های اعمال شده جهت پذیرفتن بیش از یک قطار بر روی یک بخش ثابت در مسیر های هم جهت می باشد. مساله به وسیله ای محدود کردن فضای جواب به جدول زمانی بدون اختلال حل شده است. به طور ویژه با ثابت کردن متغیر های عدد صحیح از روش لوکال برنچینگ استفاده شده است این مدل بر روی مورد های در شبکه راه اهن در فرانسه و شیلی تست شده است شبکه موجود در فرانسه شامل ۶۷ قطار در بازه ای زمانی ۷ ساعته بوده است : سناریو در نظر گرفته شده وجود یک یا دو قطار که توسط یک اختلال جزئی موجب توقف شده است که باعث تاخیر مابین ۱۰-۲۰ دقیقه ای می شود . شبکه موجود در شیلی شامل ۴۰ قطار و افق زمانی ۳ الی ۴ ساعته مورد بررسی قرار گرفته است.. سناریو های موجود حداقل ۴ قطار متوقف شده توسط یک اختلال جزئی را در نظر می گیرند که باعث تاخیر بین ۱۰-۳۰ دقیقه ای می شود مسائل با استفاده از سیپلیکس ۱۱,۱ و پردازندۀ هسته ای دو پردازنده INTEL دو هسته ای با سرعت ۱/۶۶GH و ۲G هاوای ترمپ که در راه حل های ارائه شده با میانگین شکاف بهینه سازی کمتر از ۰/۱ به دست امده است که زمان محاسبه ان معمولاً کمتر از ۵ دقیقه بوده است [۳۷].

منگ و ژو پایداری برنامه را برای خطوط تک خطه که به دلیل تغییرات تصادفی در زمان های اجرایی و حرکت قطارها و همچنین ایجاد اختلالات کوچک که به مشکل بر خورده اند، انجام داده اند. به همین منظور از یک مدل ماکروسکوپیک برنامه ریزی احتمالی استفاده کرده اند تا چارچوب حرکت را برای تعیین پایداری برنامه ای زمانبندی برای هر دوره مشخص کند. کیفیت جواب ها برای فهم بهتر این موضوع که چگونه وجود اطلاعات صحیح در طی اختلالات موثر هستند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایشات عددی بر روی برنامه ای واقعی قطارها انجام شده است تا اهمیت پایداری اعظام قطارها در شرایط احتمالی مورد ارزیابی قرار گیرد. آزمایشات به طور میانگین ۸۰۰ ثانیه در یک پردازنده ای ۱,۸ گیگاهرتزی و رم ۱,۵ گیگابایتی حل شده است که این زمان با حجم ترافیک رابطه مستقیم دارد [۳۸]

آکوانا آگوست و همکاران در سال ۲۰۱۱ در مقاله دوم خود همان مشکلی را که مقاله اول در سال ۲۰۱۱ مورد بحث قرار داده بودند را در نظر گرفتند . از انجایی که مدل دوم ممکن است نیاز به زمان محاسبات بیشتری برای بعضی از موارد داشته باشد نویسندها مقاله یک رویکرد و راه حل جدید را

به نام^۱ SIPI برای حل ان انجام دادند SIPI (تحلیل آماری تکثیر وقایع) . این مدل بر اساس همان مدل MIP می باشد اما در ان احتمال اینکه یک شبکه ی راه اهن توسط مجموعه از اختلالات جزئی تحت تاثیر قرار می گیرد تخمین زده می شود و در نتیجه زمان جستجوی فضای ان کاهش پیدا می کند این مدل بر روی شبکه راه آهن فرانسه و شیلی تست شده است نتایج به دست امده از SIPI در عمل مفید واقع شده است و عملکرد متقدم قبلی را بهبود بخشیده است و به طور اخذ زمان محاسبات را بهتر و بهبود داده است این روش راه حل ها را با شکاف میانیگین ۵ درصدی ۲۸ ثانیه برای شبکه فرانسه محاسبه کرده است و این مقدار ۰/۵ در ۱۵ ثانیه برای شبکه شیلی می باشد .

مدل با استفاده از سیپلیکس ۱۱-۱ حل شده است [۳۹]

مین و همکاران یک مدل MIP را برای حل مسئله ی برخورد قطارها در شبکه راه اهن شهر سئول در کره جنوبی ارائه کرده اند انها نشان دادند در یک نمونه شامل ۲ مسیر تک خطه و ۳ ایستگاه، مساله Np-hard می باشد. در نتیجه انها یک روش تجربی بنام FRA^۲ (الگوریتم حل و بازسازی) را بکار بسته اند تا از ساختار مسئله استفاده کنند و ان را حل کنند بر اساس چندین مشاهده در شبکه راه اهن کلان شهر سئول انها مجموعه ای از فرضیات را تشکیل داده اند و مسئله خود را بر اساس این فرضیات به بخش‌های مجزا تقسیم کرده اند. یک رویکرد تولید ستونی^۳ مورد استفاده قرار گرفته است مدل جدول زمانی در یک دقیقه با استفاده از پردازنده ۴ هسته ای INTEL با سرعت ۲/۰۵ RAM 4GB و ۴۰ انجام داده است [۴۰].

کورمن و همکاران مسئله مدیریت اختلالات بزرگ را در شبکه راه اهن شلوغ و گسترده مورد بررسی قرار داده اند. به طور خاص در این پروژه انها یک شبکه دو خطه در نظر گرفته اند که در ان بخش های از بلاکها یکی از خطوط به طور موقت قابل دسترسی نمی باشد. رویکردهای مرکز شده و پخش شده ارائه شده است در رویکرد مرکز شده تمام مسئله زمان بندی مجدد حل شده است حال انکه در رویکرد پخش شده به عنوان یک هماهنگ کننده مجموعه ای از محدودیت ها را بین بخش های مختلف اعمال می کند و به عنوان یک نمونه، تصمیم گیری های برنامه ریزی را برای برنامه ریزان محلی نشان می دهد. ازمایشات محاسباتی در شبکه راه اهن در مقیاس بزرگ در هلند نشان می دهد که هر دو رویکرد با دشواری های روز افزون در پیدا کردن در برنامه ریزی کار اند و شدنی در

^۱ Statistical analysis of propagation of incidents

^۲ Fix and regenerate algorithm

^۳ Column generation

یک مدت زمان کوتاه برای زمان افزوده شده در افق زمانی پیش بینی ترافیک مواجه هست شبکه های مورد بررسی قرار گرفته شامل ایستگاه های مرکزی اترخت، آرنهم و دن بوخ با افق زمانی ۳۰، ۶۰، ۹۰ دقیقه ای می باشد این مقاله نشان می دهد که بر روی افق های ۳۰ دقیقه ای و ۶۰ دقیقه ای رویکرد پخش شده یا توزیع شده میانگین تاخیرات پیاپی کمتر از ۲۰ ثانیه را دارد حال انکه برای همان موارد در رویکردهای متمرکز شده میانگین تاخیرات پیاپی بیش از ۲۰ ثانیه بوده است برای افق زمانی ۹۰ دقیقه ای تمامی الگوریتم تقریباً میانگین تاخیرات پیاپی یکسانی داشته اند در ان حالت برنامه ریزی های عملیات به دست امده است با این حال رویکردهای توزیع شده یا پخش شده درصد بیشتری از راه حل های عملیاتی و کارآمد را تولید کرده‌اند [۴۱].

ناکامورا و همکاران الگوریتمی را ارائه کرده اند که در ان زمان بندی مجدد قطارها در طی اختلالات بزرگ برای گروهی از قطارها، که بخش هایی از حرکت آنها کنسل شده است و الگوهای بازگشتیان مورد بررسی قرار گرفته است. این فاکتور ها توسط اعزام کننده ها از قبل مشخص شده اند. در اینجا یک گروه قطار شامل مجموعه ای از قطار ها است که دارای مجموعه ای ناوگان می باشند. بخش های کنسل شده قطار شامل تجهیزات زیر بنایی راه اهن هستند که محدود به دو بخش هستند که در ان تمام قطارها کنسل خواهند شد اگر یک اختلال بزرگ در داخل ان بخش اتفاق بیافتد در نهایت الگوهای بازگشت بدین صورت تعریف می شوند: ارتباط بین قطارها در یک گروه یکسان در ایستگاه های که محدود به یک بخش که در آن اختلال رخ داده است، هستند در مورد اختلالی که منجر به سد کردن بخشی از یک شبکه شده است الگوریتمی ارائه شده جدول زمان بندی جدیدی را با قطارهای کنسل شده، ترکیب الگوهای برگشت و تغییر دستور اعزام قطارها در مجموعه ای از مراحل تعیین می کند. کارایی نقش برنامه زمان بندی مجدد در قالب عدم رضایت مسافران به دلیل تاخیرات مکرر مورد ارزیابی قرار گرفته است. این عمل با استفاده از یک شبیه سازی در یک مقیاس کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم در یک خط شبکه راه اهن در منطقه ای از شهر ژاپن مورد بررسی قرار گرفته است نتایج نشان می دهد یک زمان بندی مناسب می تواند در کمتر از ۵ دقیقه با استفاده از یک پردازنده دو هسته ای با سرعت 3/33GH RAM 3/25GB به دست اید [۴۲]

آبینک و همکاران از کنترل زمان و سرعت برای رسیدن به یک هدف معین در ارتقا دادن ورودی قطارها به راه آهن آلمان استفاده کرده اند. آنها دو نوع هدف در نظر گرفته اند که از آن به عنوان

نقاط هدف^۱ و پنجره های هدف^۲ نام برده اند. نقاط هدف مربوط به زمان های ورود و خروج از ایستگاه ایستگاه ها است که یک موضوع مهم در نگهداری ارتباط مسافرین است و همچنین این نقاط هدف شامل زمان های عبور است منظور زمان های عبور و سبقت قطارها می باشد. زمان برنامه ریزی شده ممکن است توسط یک تأخیر در واقع مورد تخطی قرار گیرد و یک حد بالایی اعمال خواهد شد. در این مقاله یک مدل بهینه سازی دو سطحی ارائه شده است که شامل بهینه سازی سرعت بین نقاط پیاپی و همچنین بهینه سازی زمان حرکت بین نقاط سفر می باشد. آنها نتیجه گرفته اند که مدل ارائه شده ابزار مفیدی برای ارتقا پیروی از جدول زمانبندی ، صرفه جویی در انرژی و همچنین افزایش ورودی قطارها به نقاط گلوگاهی می باشد[۴۳]

کورمن مسئله‌ی زمانبندی مجدد قطارها را با در نظر گرفتن همزمان دو هدف مورد بررسی قرار داده است. که این دو هدف عبارت اند از: مینیمم کردن مجموع تأخیرات و ماکزیمم کردن سرویس های مسافری به طور هم زمان. با توجه به اینکه این دو هدف با همدیگر در تناقض اند لذا برای حل چنین مسئله‌ای از نمودار پارتو استفاده کرده اند[۴۴]

بوسیکا و همکاران یک مدل جدید MIP ارائه کرده‌اند که در آن مجموعه‌ی از مسیرها برای هر قطار در نظر گرفته شده و مسیرها در آن به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم می شوند. در این مدل از متغیرهای باینری به منظور نشان دادن این موضوع که آیا یک مسیر در مجموعه مسیرهای یک قطار قرار می گیرد یا خیر و همچنین از متغیرهای پیوسته نیز به منظور نشان دادن رسیدن یک قطار به یک قسمت خاصی از بلاک استفاده شده است. دو الگوریتم ابتکاری در این مقاله ارائه شده است که بیس کاری این الگوریتم‌ها برای مدل‌های MIP می باشد. این الگوریتم‌ها بر روی بخشی از متدها و نرم افزارهای راه آهن (RAS)^۳ در سال ۲۰۱۲ و همچنین مشتقات آنها تست شده اند. نتایج حاصله نشان می دهد که الگوریتم ابتکاری قادر به پیدا کردن جواب‌های بهتر و قابل اجرا در تمام نمودها در محدوده زمانی اعمال شده (۳ تا ۱۵ دقیقه) توسط RAS می باشد. این الگوریتم توسط یک کامپیوتر core7 با پردازنده ۳,۴ گیگا هرتز به دست آمده است[۴۵].

آلبرچت (۲۰۱۳) مدلی جهت زمانبندی مجدد حرکت قطارها با در نظر گرفتن زمان مسدودی تعمیر و نگهداری ارائه نموده و همچنین روش ابتکاری جهت حل توسعه داده است. تابع هدف در این مساله

^۱ Target points

^۲ Target windows

^۳ Railway application section

مینیمم کردن مجموع تأخیرات قطارها با دو رویکرد کمینه تأخیر کل قطارها، کمینه بیشترین تأخیر هر قطار. (مطالعه موردی : استرالیا) [۴۶]

لامورجز و مانیو مدل جدیدی را معرفی میکنند که در آن زمان محاسبه را کاهش میدهد. متغیرهای جدید مکمل های اصلی هستند بدین معنا که آنها یک جفت قطار را که در یک خط قرار دارند که همدمیگر را ملاقات می کنند یا خیر، مدل می کنند. به طور دقیق از متغیرهای باینری برای این مفهوم که آیا قطار ۱ قطار زرا در یک خط خاص ملاقات می کند یا خیر استفاده شده است. رویکرد به کار گرفته شده در این روش برای حل مدل بر اساس ایجاد قطارهای به تاخیر افتاده می باشد که شباهت زیادی به مدل تجزیه بندرز دارد. نتایج محاسباتی نمودهای تک خطی در زمان اجرایی با نتایج به دست آمده از مدل مانیو لامورجز (۲۰۱۲) مقایسه شده است و نتایج موثر بودن فرمول جدید در کاهش زمان را بیان می دارد. نمودها تعداد قطارها را ۲۹ عدد در بازه زمانی ۹ ساعته در نظر گرفته است که با مدل جدید زمان محاسبات زیر یک دقیقه بوده است. این محاسبات با یک کامپیوتر با پردازنده i7 core و ۲,۸ گیگاهرتزی محاسبه شده است. مدل قبلی زمانی حدود یک دقیقه برای اجرا نیاز داشت حتی اگر سیستم ها یکسان می بودند. بخش اعظمی از تحقیقات حول نواحی گلوگاه ها پر ترافیک انجام شده اند زیرا این نقاط موارد بحرانی هستند که در آنها اختلالات بزرگ و کوچک رخ می دهد. در این مکان ها تأخیرات به راحتی از یک قطار به دیگر قطارها منتقل می شود [۳۶].

پلگرینی و همکاران مشکل برنامه ریزی مجدد جدول زمانی را که در آن زیر مجموعه ای از قطارها به محدوده ای کنترلی وارد شده اند، مبنی بر وجود اختلالات کوچک در شبکه می دانند. به همین منظور یک مدل MIP برای حل مساله تعریف کرده اند که در آن سیستم های زیربنایی به عنوان یک مدار ریلی (همانند مدارهای الکتریکی) فرمول بندی شده اند تا وجود قطارها را بر روی یک خط خاص مشخص کنند. برای هر قطار مجموعه از مسیر در یک ناحیه کنترل تعریف شده است. از متغیرهای پیوسته به منظور نمایش زمان ورود یک قطار به یک محدوده کنترلی و زمان تاخیری استفاده شده است. و همچنینی از متغیرهای باینری به مفهوم اینکه آیا یک قطار خاص از یک مسیر داده استفاده می کند یا خیر. مدل مورد استفاده اختصاص دادن مسیرها به هر قطار و همچنین تأخیرات ممکن برای هر قطار در یک Track-circuit در نظر می گیرند. محدودیت های این مسئله شامل محدودیت های مربوط به زمان و ظرفیت می باشد و همچنین محدودیت های مربوط به قطارهای در مسیر^۱ و ارتباطی که بین قطارها می باشد نیز به اشتراک گذاشته شده است. مطالعه

^۱ Rolling stock

موردي بر روی ليل فلاندرس^۱ فرانسه صورت گرفته است که برای قسمت اعظمی از بخش های در نظر گرفته شده راه حل بهینه در طی سه دقیقه به دست آمده است. که برای حل از Cplex ورژن ۱۲ استفاده شده است [۴۷]

دوايندار و شين مطالعه اي در مدیريت زمان اجرائي در ترافيك راه آهن در خط راه اهن تک خطى به طول ۱۵۰ کيلومتر در تركيه انجام داده است آنها الگوريتم ژنتيک را برای زمان بندی مجدد قطعات بر روی اين خط توسعه داده اند و به طور خاص ورود و عبور قطعات در مسیر بر عکس را مشخص كرده اند . افزاون بر ان انها سه مدل را برای سنجش اهداف توسعه داده اند مدل اول شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) هست که در ان هدف تقلید فرایند برنامه ریزی زمان مجدد توسط اعظام كننده است . مدل دوم نوع دیگري از Ga یا همون الگوريتم ژنتيک است که در ان مدل تطبيق داده شده اى از GA مى باشد که توسط هيگينز (۱۹۹۷) توسعه داده شده است را مورد استفاده قرار داده اند . مدل سوم يك مدل MIP است که بر اساس مدل نمودار جايگزين^۲ مى باشد، که با لينگو ورژن ۶,۱ حل شده است. اين مدل مى تواند برای موردها و مدل های کوچيكتری از بهينه سازی مورد استفاده قرار بگيرد به هر حال مدل های بزرگتر نمی تواند توسط اين مدل حل شوند . تمام مدل ها بر روی يك سистем خانگی از نوع پنتيم^۳ و پردازنده ۲ هسته اى ۱GB ram حل شده اند. نتایج نشان مى دهد که مدل توسعه داده شده GI توسط دوندر و شين ۲۰۱۳ عملکرد بهتری از سایر مورد ها دارد در اغلب موارد اين مورد توانسته هم راه حل را به دست آورد و هم در زمان محاسبه بهتر عمل کند [۴۸]

لور و هيوزمن يك مدل MIP را توسعه داده اند در ان هدف طراحى جدول زمان بندی دوره اي جايگزين برای مواردي است که در ان جدول زمان بندی معمول قادر به اجراء شدن به دليل وجود يك اختلال بزرگ نیست. تغييرات کوچك در زمان های ورود و خروج قطار هايی که کنسل نشده اند، مجاز دانسته شده است. نويسنده جنبه های از نظم را در نظر گرفته است به طور مثال در بلاکهای خاصی از خطوط، هدف انها به کار انداختن تعداد يکسانی از قطار ها در هر سمت يا هر مسیر مى باشد افزاون بر ان در چنین موقعه اى در نظر دارند که بتوانند تمام مسافر ها را منتقل کنند چنین محدودیت های همچنین اضافه مى شود به اين منظور که در ان احتمال موجهی برای رولينگ استوك و برنامه ریزی خدمه افزایش يابد . نتایج محاسباتی بر اساس مجموعه اى از موارد

^۱ Lille - flanders

^۲ artificial neural network

^۳ Alternative Graph Model

در خطوط راه اهن هلند نشان می دهد که این مدل منجر به کنسل شدن تعداد کمتری از قطار ها نسبت به بخش های موجود در هلند شده است [۴۹].

ویلنچوف و همکاران به منظور کمینه کردن تعداد قطارهای کنسلی و میزان تاخیر نسبت به جدول زمانبندی اولیه یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح توسعه داده اند. در این مدل علاوه بر زمانبندی مجدد مسیریابی نیز صورت گرفته شده است. تصمیماتی که در این مدل لازم است بهینه سازی شوند، شامل: زمان اعزام، کنسل شدن یا نشدن یک فعالیت انتخاب یا عدم انتخاب یک فعالیت و مسیریابی مجدد برای قطارهایی که کنسل شده اند، می باشد. مدل ارائه شده با نرم افزار سیپلکس ۱۲,۴ حل شده است [۵۰].

چن و لی به ارائه یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط پرداخته اند که هدف آنها کمینه کردن میانگین وزنی تاخیرات برای قطارهای می باشد. در این مدل آنها سعی دارند با کمینه کردن فاصله زمانی بین دو قطار متوالی (هدوی) تا جایی که مشکل تلاقی پیش نیاید میزان تاخیرات را در هنگام بروز حوادث کمینه کنند. همچنین برای حل مدل خود الگوریتم DE-JRM توسعه داده اند. علاوه بر این آنها مسیرهای جدیدی را هم برای قطار پیشنهاد می کنند، عبارت دیگر موضوع مسیر یابی مجدد نیز در مدل خود دیده اند [۵۱]

کانگ و همکاران به منظور کمینه کردن زمان های اجرایی و کاهش اختلال بین زمانبندی جدید و زمانبندی اولیه و همچنین بیشینه کردن سطح دسترسی به شبکه ی حمل و نقل ریلی یک مدل ریاضی خطی توسعه داده اند. تصمیماتی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته شده عبارت اند زمان های رسیدن و اعزام قطارها، زمان اجرایی و زمان های توقف در ایستگاهها می باشد. همچنین برای حل مدل خود از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک استفاده کرده اند. آنها مدل خود را روی راه آهن بیجینگ در هنگام بروز اختلال پیاده کرده اند و توانسته در زمان کوتاهی نتایج مفیدی را به دست بیارند [۵۲]

تولتی و مارتینز یک مدل ریاضی عدد صحیح خطی ارائه کرده اند. علاوه بر کمینه کردن زمان تاخیرات و کنسل شدن برنامه ی قطار مصرف انرژی را نیز در مدل خود دیده اند. آنها هر مسیر را بررسی کرده و زمان سیر و هزینه های عملیاتی و مصرف انرژی در هر مسیر را به صورت یک پارامتر در مدل خود در نظر گرفته اند و تنها مدل به دنبال اتخاذ مسیرهایی می باشد که این اهداف را بهینه کند. تنها متغیر تصمیم این مدل متغیر باینری برای تخصیص یک مسیر به قطار می باشد [۵۳]

ون تیلن و سوفیا برای حل مساله زمانبندی مجدد یک الگوریتم فرالبتکاری توسعه داده اند که این الگوریتم شامل سه بخش می باشد. در دو بخش اولیه این الگوریتم مربوط به قوانین اعظام و بخش بعدی این الگوریتم برای کمینه کردن اثر اختلال در ساعات بعدی می باشد [۵۴].

نارایاناسوامی یک سیستم چند عامله^۱ برای برنامه ریزی مجدد پویا در یک راه آهن دو جهته با یک مسیر ریلی ارائه کرده اند. یک چارچوب محاسباتی برای اعظام قطارهای مختل شده در زمان واقعی، براساس پارامترهای سیستم لحظه ای و برنامه ریزی مجدد قطاره تهیه کرده اند. که در این چارچوب به منظور حل و فصل اختلالات با سرعت بالا یک ساختار یادگیری وجود دارد. این مدل برخلاف راه حل های بهینه مطلوب تولید شده توسط یک مدل برنامه ریزی خطی ترکیبی (MILP) با استفاده از داده های واقع گرایانه ارزیابی می شود بحث های مفصل در مورد معماری، پیاده سازی با استفاده از JADE (توسعه عامل جاوا^۲) ، نتایج آزمایش، تجزیه و تحلیل عملکرد، ارزیابی مدل، بینش و محدودیت گزارش شده است. معیارهای عملکرد برای این چارچوب میانگین وزنی تمامی تاخیرات برای قطارها و زمان محاسبات می باشد [۵۵].

ملادنوویچ یک الگوریتم ابتکاری که شامل دو بخش می باشد، ارائه کرده اند. آنها مساله را به عنوان یک مساله Job-Shop که هر قطار یک Job است و نیاز به منابع و زیر ساخت دارد، در نظر گرفته اند. الگوریتم ارائه شده دارای دو بخش است که در بخش اول مساله را مربنده کرده و بخش دوم الگوریتم به دنبال جواب در این بخش می باشد [۵۶] به منظور توسعه مدل خود و افزایش کارایی مدل ارائه شده ملادنوویچ و اسکوویچ (۲۰۱۶) یک بخش دیگر تحت عنوان تجزیه به الگوریتم ابتکاری خود اضافه کردند. در این مدل همانند بخش قبل ابتدا الگوریتم مسائل را مربنده کرده و سپس بخش دوم الگوریتم هر کدام از این مربها را تجزیه می کند که بخش سوم الگوریتم بتواند با سرعت بهتر جواب ها را بررسی و مشخص کند [۵۷].

تولتی و همکاران مدل ریاضی عدد صحیح به منظور کمینه کردن کل تاخیرات برای قطارها و مسافران، کمینه کردن هزینه کنسل شدن، کمینه کردن نارضایتی مشتری، ارائه داده اند. تصمیماتی که در این مساله گرفته می شود عبارت اند از تخصیص یک مسیر به برنامه ی جدید یک قطار، ترکیب شدن دو قطار با یکدیگر و توقف اجباری قطار در ایستگاه. آنچه که آنها به آن اشاره دارند و می تواند مساله را کاراتر بکند در نظر گرفتن مصرف انرژی در مدل ارائه شده می باشد [۵۸].

^۱ Multi-agent system

^۲ Java Agent Development

بین و جیاتنگ یک مدل برنامه ریز احتمالی برای زمانبندی مجدد حرکت قطار ارائه کرده اند. آنها بررسی کردند که در یک خط مترو بسیار سنگین، اختلالات کوچک پیش بینی نشده ای رخ می دهند که موجب تأخیر در زمان سفر مسافران، عدم امکان زمانبندی فعلی و کاهش بهره وری عملیاتی را به همراه دارد. با توجه به ویژگی های نامطمئن و پویا خواسته های مسافران، روش معمولی برای بهبود از اختلالات بزرگ در عمل موجه کردن جدول زمانی و رولینگ استاک ها به صورت دستی بر اساس تجارب و تصمیمات حرفه ای است. هدف آنها از ارائه های این مدل کاهش هزینه های عملیاتی و زمان سفر برای مسافران و همچنین کمینه کردن تأخیراتیست که به مسافران اعمال می شود. برای دست یابی به کارکترهای پیچیده سفر مسافران، نسبت ورودی مسافران در هر ایستگاه به عنوان توزیع پواسون غیر همگن مدل سازی شده است، که در آن تابع شدت به عنوان ماتریس تقاضای مسافرتی مبدأ به مقصد تغییر می کند. با در نظر گرفتن تعدادی از مسافران حاضر در قطار مصرف انرژی کل به عنوان تفاوت بین مصرف انرژی جذب و انرژی احیا کننده مدل سازی شده است. سپس، یک الگوریتم ابتکاری برنامه ریزی پویا را برای حل مدل طراحی کرده اند، که می تواند یک راه حل با کیفیت بالا را در یک زمان کوتاه به دست آورد [۵۹].

بیندر و استی芬 برای حل مساله برنامه ریزی مجدد در هنگام اختلال یک چارچوب ابتکاری ارائه کرده اند که در این چارچوب استراتژی های مورد استفاده در هنگام بروز رخداد در نظر گرفته شده است که از جمله این استراتژی ها می توان به کنسل کردن سفر یک قطار، تأخیر و مسیر یابی مجدد و ... اشاره کرد. هدف آنها بهینه کردن انحراف از جدول زمانی، هزینه های عملیاتی و تخصیص مسافر می باشد. به منظور حل این مساله از الگوریتم فرآابتکاری جستجوی همسایگی^۱ استفاده کرده اند [۶۰]

قائمی و همکاران یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط بر اساس استراتژی short-turn ارائه کرده اند. هدف از این مدل کمینه کردن تعداد سرویس های کنسل شده و میزان تاخیرات سرویس های عملیاتی می باشد. متغیرهای تصمیم که در این مدل بهینه می شوند عبارت اند از زمان اعزام و رسیدن یک قطار، زمان تأخیر در رسیدن یک قطار، کنسل شدن یا عدم کنسل شدن یک سرویس، استفاده کردن یک قطار از استراتژی مذکور و قرار گرفتن یک قطار در پلتفرم یک خط. مدل ارائه شده به واسطه نرم افزار Gurobi بهینه سازی شده است [۶۱]

سمروف و همکاران یک روش یادگیری تقویتی برای تعویض قطار در یک راه آهن تک مسیر ارائه نمودند. در این پژوهش آنها بیان می دارند جدول زمانی به گونه ای طراحی می شود که اختلالات

^۱ Neighborhood Search

کوچک را در بر میگیرد ولی در خصوص اختلالات و تاخیرات بزرگ قادر به پاسخگویی نیست و نیاز به زمانبندی مجدد دارد. در این پژوهش به معرفی یک متذمانبندی مجدد پرداخته اند که پایه‌ی این متذ بر اساس تقویتی یادگیری می‌باشد و به طور خاص^۱ Q-Learning ارائه کرده اند. ابتدا مدل خود را با یک کیس ساده که شامل ۳ قطار بود آزمایش کردند و نتایج حاصله از این رویکرد را در یک مقایس بزرگتر در شبکه‌ی ریلی اسلوونیا بررسی کرند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که Q-Learning منجر به جواب‌های زمانبندی مجدد شده است که کمترین شbahت و بیشترین برتری را نسبت به چندین متذ که بر اساس زمانبندی مجدد کار می‌کنند و به عوامل یادگیری تکیه ندارند، دارد [۶۲].

تمنایی و همکاران به ارائه‌ی یک مدل زمانبندی مجدد و یک الگوریتم جهت یافتن جواب بر پایه‌ی الگوریتم SA ارائه کرده‌اند. مدل ارائه شده توسط ایشان با محدود کردن تاثیر تصادفات در یک زمان خاص بر اساس هریک از قطارات‌ای که بین زمانبندی مجدد و عدم تغییر تقسیم شده اند سعی در حفظ جدول زمانی بعد حادثه را دارند. مزیت اصلی این رویکرد توجه همزمان به ۳ سیاست؛ کنسل کردن، تاخیر و اصلاح مسیر می‌باشد. آنها یک مدل بهینه سازی عدد صحیح جهت یافتن بهینه ترین حالت عدم سازگاری با جدول زمانی توسعه داده اند. تابع هدف دو نوع هزینه را کمینیه می‌کند که یکی کمینه کردن انحرافات از جدول زمانی اولیه و دوم تعداد کنسل شدن قطارات‌ها. آنها مساله را با Cplex حل کرده‌اند و همچنین یک الگوریتم فراابتکار براساس الگوریتم SA نیز ارائه کرده‌اند. بررسی نتایج آزمایش در یک مسیر دو طرفه در راه آهن ایران بیانگر توانایی و قابلیت مناسب مدل و جواب حاصل از الگوریتم است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که جواب‌های الگوریتم می‌توانند در زمان خیلی کوتاهی جواب مناسب و قابل قبولی را در مقایسه با Cplex ایجا کند [۶۳].

کاون و همکاران به منظور کمینه کردن تاخیر برای قطارات و افزایش سطح استواری برای جدول زمانی یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی ارائه داده اند. در بخش بعدی یک روش ادغام برای پیوستن جدول زمانی به دست آمده با جدول زمانی اولیه و در نهایت یک روش اکتشافی برای حل تمامی مناقشات و اختلالات که ناشی از روند ادغام است به کار گرفته می‌شود [۶۴].

لوسی و ریچارد (۲۰۱۷): یک الگوریتم برای حل مساله برنامه ریزی مجدد خدمه ارائه کرده‌اند. تمایز

^۱ نوعی از یادگیری تقویتی بدون مدل است که بر پایه برنامه ریزی پویای اتفاقی عمل میکند.

کار آنها با دیگر تحقیقات این زمینه، در نظر گرفتن مسافران و جابه جایی آنها به قطارهای دیگر بود. لذا به منظور افزایش سطح رضایت مسافران یکی از اهدافی را که بهینه کردند کمبود ظرفیت صندلی قطارها بود. آنها یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح ارائه کردند که در این مدل هدف کمیه کردن: هزینه کنسل شدن، هزینه کمبود صندلی، هزینه انحراف از برنامه در پایان روز، هزینه اتصال قطارها و هزینه مسافت پیموده شده، می باشد. برای حل این مدل نیز از الگوریتم Branch-and-Price استفاده کردند [۶۵].

واگنار و جوریس بر پایه یک مدل ترکیبی^۱ سه مدل MIP برای حل مساله برنامه ریزی مجدد ناوگان با در نظر گرفتن تعمیرات و نگهداری، توسعه دادند. در مدل اول که از آن تحت عنوان Extra unit type یاد شده است هدف اضافه کردن ناوگان هایی که نیاز به تعمیرات و نگهداری دارند برنامه ریزی می شود و در مدل دوم The shadow account مقادیر سایه برای قطارهایی که نیاز به نگهداری و تعمیرات دارند، در نظر گرفته شده است و مدل سوم The job composition ساختن مسیر برای قطارهایی که نیاز به نگهداری و تعمیرات دارند، توسعه داده شده است. هدف کلی این مدلها کمینه کردن: هزینه کنسل شدن یک ناوگان، کمبود ظرفیت (صندلی) به ازای هر کیلومتر و هزینه حمل و نقل در هر کیلومتر و همچنین کمینه کردن حرکات اضافی مانورها و میزان انحراف از برنامه در پایان روز می باشد. آنها مدل خود را با نرم افزار سیپلکس حل کردند و نتایج مفیدی برای برنامه ریزی مجدد خدمه با در نظر گرفتن نت به دست آورده‌اند [۶۶].

شکیبایی‌فر و شیخ‌الاسلامی به بررسی اختلالات بزرگ در سطح جزئی و ارائه یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط پرداخته اند. در این مقاله آنها ابتدا یک مدل برنامه زمانبندی ارائه می کنند و به دنبال آن یک مدل زمانبندی مجدد حرکت قطار. هدف از مدل ارائه شده برای هنگام بروز اختلال کاهش تاخیر و انحراف در زمان اعزام بین دو مدل زمانبندی و زمانبندی مجدد است. نتیجه مدل زمانبندی به عنوان ورودی برای مساله زمانبندی مجدد در نظر گرفته شده است. مدل در راه آهن ایران بررسی شده و نتایج مناسبی را در زمان کوتاهی به دست آمده است [۶۷].

دلوقت و همکاران یک چارچوب برای زمانبندی مجدد در راه آهن در زمان اجرا ارائه کرده اند. از آنجا که اختلال در شبکه های راه آهن اجتناب ناپذیر است، اپراتورهای راه آهن و مدیران زیرساخت

^۱ composition model

نیاز به اقدامات و ابزارهای قابل اطمینان برای مدیریت اختلال دارند. اکثر تحقیقات در مورد مدیریت اختلالات بزرگ در راه آهن بیشتر وقت خود را صرف زمانبندی مجدد یک منبع (جدول زمانی، رولینگ استوک یا خدمه) می کند. در این پژوهش، کاربرد یک چارچوب تکراری را که در آن همه این سه منبع در نظر گرفته می شود، توصیف می کنند. چارچوبی که مدل های موجود و الگوریتم های موجود برای برنامه ریزی مجدد منابع منحصر به فرد اعمال می کند. آنها چارچوب پیشنهادی خود را در راه آهن هلند تست کردند و برنامه هایی که برای هر سه منبع امکان پذیر هستند و می توانند در زمان کوتاهی به جواب برسند، را معرفی کرده اند [۶۸].

فیسچتی و ماتئو یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط به منظور استفاده در الگوریتم ابتکاری Ad-Hoc ارائه کرده اند. هدف از ارائه این مدل کمینه کردن میانگین تاخیرات در جواب نهایی می باشد. آنها از متغیر پیوسته به منظور بهینه کردن زمان برنامه ریزی مجدد یک رویداد و از متغیرهای باینری جهت استفاده یا عدم استفاده از یک مسیر برای زمانبندی مجدد و اولویت دهی بین دو مسیر برای استفاده در یک رویداد استفاده کرده اند. نتایج محاسباتی نشان می دهد که الگوریتم به کار رفته شده برای زمان اجرایی برنامه ریزی مجدد مثمر ثمر واقع شود [۶۹]

داویدو و چبوتار یک مدل برنامه ریزی احتمالی برای زمانبندی مجدد حرکت قطار ارائه کرده اند. مدل تصادفی پیشنهادی از توزیع های خاصی از زمان های عملیاتی که وابسته به شرایط ترافیکی هست، استفاده می کند. توزیع زمان ورود به عنوان یک نتیجه از تنظیم مسیر قطار توسط کنترل سرعت در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از صحت داده های خود نتایج حاصل از مدل توزیع داده ها با داده های واقعی را بررسی کردند که این داده ها همخوانی نزدیکی با همدیگر داشتند. مدل پیشنهادی برای جلوگیری از تداخل و تعرضات پیچیده در ارتباطات مورد استفاده قرار می گیرد. اساس پیش بینی انحراف، مدل دو قطار است که از ویژگی های واقعی پراکندگی زمان های اجرایی در سایت ها و ایستگاه ها استفاده می کند. این مقاله همچنین یک معیار جدید از تاخیر ورود را پیشنهاد می کند که رضایت مسافران را در نظر می گیرد [۷۰].

اویگا و فرانچسکو مساله برنامه ریزی مجدد برای وسایل حمل و نقلی شامل تعریف یک برنامه جدید برای مجموعه ای از سفرهای برنامه ریزی شده قبلی است، با توجه به اینکه یک یا چند سفر انجام نمی شود. این مقاله مسئله برنامه ریزی مجدد در یک خط حمل و نقل ارائه می کند که به کاهش حجم ناوگان منجر می شود (همچنین به عنوان کاهش اندازه مساله برنامه ریزی مجدد از آن یاد می

شود). به منظور افزایش سطح رضایت مسافران بعد از اختلال یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح ارائه کرده اند. آنها در حال حاضر گزینه های مدل سازی مختلف را بسته به مفروضاتی که باید در مدل سازی گنجانده شود ارائه می کنند و نشان می دهند که مشکل می تواند به سرعت حل شود با استفاده از دوباره مدل سازی کردن که نشان می دهد دارای ویژگی یکپارچگی است. آنها نتایج خود را در یک بستر آزمایشی از نمونه های تصادفی و نتایج قبلی در تحقیقات پیشین تست کرده اند. و همچنین یک مورد واقعی در مورد قطارهای رفت و آمد مادرید، اسپانیا را برای نشان دادن کارایی مدل خود بررسی کرده اند [۷۱].

دونزلو و فابیو یک مدل ریاضی خطی ارائه کرده اند که هدف از آن کمینه کردن کل زمان سفر برای مسافران، توجه بیشتر به قطارهای مهمتر و مجاز دیدن استفاده از بیشترین حد سرعت سیر قطار. بخش نوآورانه ای این رویکرد اولویت بندی قطارها در بلاک است. آنها مدل خود را با داده های یک بخش از راه آهن ایتالیا بررسی کرده اند [۷۲].

جوسیولا و همکاران جهت حل مساله برنامه ریزی مجدد یک الگوریتم ابتکاری موازی با ساختار چند هسته ای بر پایه Depth-first search ارائه کرده اند. الگوریتم ارائه شده دارای دو بخش است که در بخش اول فضا جواب را به یک درخت دودویی^۱ و بخش دوم بر اساس الگوریتم Depth-first search عمل می کند. مدل ریاضی مورد استفاده در این پژوهش مدل ترنکوئیست (۲۰۰۷) می باشد [۷۳].

قائمی و نادجلا برای حل مساله زمانبندی مجدد حرکت قطار یک چارچوب معرفی کرده اند که این چارچوب دارای سه بخش است. در بخش اول اول طول زمان اختلال تخمین زده می شود (که قابل استفاده برای انواع اختلالات بزرگ می باشد) و در بخش بعد برای حل مساله زمانبندی مجدد حرکت قطار یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط توسعه داده اند که در این مدل هدف کمینه کردن زمان تاخیر در اعزام قطارها و کمینه کردن تعداد قطارهایی که به خاطر اختلال ممکن است کنسل شوند. و در بخش نهایی تخصیص مسافر انجام میگیرد و بر اساس این تخصیصات تاخیر را برای مسافران محاسبه میکند تا در نهایت یک برنامه ی مناسب ارائه گردد [۷۴].

^۱ Binary tree

سیجیا هو و روی سانگ برای کنترل ترافیک مسافر یک مدل برنامه ریزی پویا ارائه کردند. آنها بررسی کردند که هنگام ایجاد اختلال در جدول زمانی به خاطر تقاضای زیاد مسافر جدول زمانبندی نیاز به، به روز رسانی دارد. به منظور تحلیل رابطه تعاملی بین تقاضای مسافر و عملکرد قطار یک مدل مبتنی بر برنامه ریزی پویا برای کنترل مسافر ارائه کردند. از همین رو مسئله را به یک فرآیند تصمیم گیری مارکوف تبدیل کرده و سپس استراتژی مدیریتی را برای تنظیم زمان اجرا و کنترل تعداد مسافرهای شبانه روزی پیشنهاد داده‌اند. با توجه به بزرگ بودن ابعاد مساله آنها از رویکرد برنامه ریزی پویا برای حل این موضوع استفاده کردند. سرانجام سه سناریو آزمایشی را طراحی کردند تا اثر بخشی مدل و رویکرد پیشنهادی خود را بررسی کنند [۷۵].

ژوپو هونگ و هایرون دانگ یک مدل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح برای حل مساله زمانبندی مجدد در مترو ارائه کردند. هدف از ارائه این مدل بهینه کردن تاخیر قطارها، پاسخگویی به تقاضای مسافر و مصرف انرژی است. که تابع هدف کمینه کردن انحراف بین بین جدول زمانی جدید و جدول زمانی اولیه و همچنین تعداد مسافرانی که ممکن است به خاطر اختلال در ایستگاه منتظر بمانند به همراه مصرف انرژی که با تعداد مسافران یک قطار رابطه مستقیم دارد. برای حل مدل خود از نرم افزار Cplex استفاده کردند [۷۶].

شوگانگ ژان و وانگ بررسی کردند که به هنگام بروز اختلال برای یک قطار در یک مسیر خاص موجب اختلال در ادامه حرکت دیگر قطارهای آن مسیر می‌شود. از اهمین رو وقتی یک قطار دچار اختلال می‌شود لازم است که دیگر قطارهای بعدی نیز در ایستگاه بمانند و قطارهای متوقف شده نباید مانع دیگر قطارهایی شوند که می‌توانند در هنگام اختلال کار خود ادامه دهند. برای حل این مشکل از برنامه ریزی استقرار قطار استفاده شده است. یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مخلوط (MILP) برای به حداقل رساندن تعداد قطارهای لغو شده و کل انحراف وزنی فرموله شده است. این مدل در راه آهن سریع السیر در چین تست شده است و نتایج مفیدی را به همراه داشته است [۷۷].

یانگ کیو ژو و راب گاورد برای هنگام بروز اختلالات بزرگ یک مدل ارائه کردند. ایده اصلی بر اساس سه استراتژی تصمیم گیری شامل تنظیم مجدد زمان حرکت، تغییر ترتیب و کنسول کردن می‌باشد. به همین منظور یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مساله ارائه کردند. هدف از ارائه این مدل کمینه کردن تاخیر برای مسافران است. تصمیم گیری در این مساله به طور کلی به دو دسته تقسیم شده است اول اینکه آیا یک قطار می‌تواند از یک مسیر استفاده کند و دوم اینکه زمان استفاده چه زمانی باشد. مطالعه موردي بر روی ره آهن هلند برای سناریوهای مختلفی تست شده و مدل از قابلیت بالایی در حل مساله برخوردار بوده است [۷۸].

جدول (۳-۲) مطالعات صورت گرفته در زمینه زمانبندی مجدد حرکت قطار

| ردیف | نویسنده‌ان | نوع مدل | اهداف پژوهش | روش حل | خروجی و نتایج |
|------|--------------------------|-------------------------|---|-------------------------------|--|
| ۱ | ساهین (۱۹۹۹) | LP | کمینه سازی انحراف از جدول زمانی | الگوریتم ابتکاری | شناسایی تداخلات بالقوه و محاسبه زمان رسیدن قطارها به مقصد به منظور تعیین ترتیب زمان اعزام برای قطارهای مختلف شده |
| ۲ | شیو و همکاران (۲۰۰۲) | طراحی چارچوب تصمیم‌گیری | کمینه سازی تاخیر مسافران | الگوریتم ابتکاری | تعیین زمان‌های ورود و خروج قطار |
| ۳ | چی یو (۲۰۰۲) | ارائه روش حل | کمینه کردن بیشترین تاخیر هر قطار و تعداد قطارهایی که از برنامه انحراف پیدا کرده‌اند | الگوریتم ابتکاری | تعیین زمان‌های رسیدن و اعزام قطارها در هر ایستگاه |
| ۴ | چانگ (۲۰۰۵) | ارائه روش حل | کمینه کردن مجموع میانگین زمان سفر مسافرین و باز | الگوریتم فراابتکاری ژنتیک | تعیین جدول زمانی اولیه و زمانبندی مجدد در صورت بروز اختلالات کوچک |
| ۵ | گلی (۲۰۰۶) | MIP | کمینه کردن مجموع تاخیرات | الگوریتم‌های ترکیبی و ابتکاری | تعیین زمان‌های اعزام و ورود، تغییر ترتیب قطارها و تعیین زمان توقف در ایستگاه در برنامه جدید |
| ۶ | دی آریانو (۲۰۰۷) | توسعه روش حل | کمینه کردن تاخیرات بالاخص تاخیرات ثانویه | الگوریتم شاخه و کران | بهبود و تسریع بخشیدن به الگوریتم شاخه و کران برای حل مسائل زمانبندی مجدد |
| ۷ | ترنکوئیست و پرسنت (۲۰۰۷) | MIP | کمینه سازی هزینه ناشی از تاخیرات | Cplex | تعیین زمان اعزام و ورود و تغییر ترتیب قطارها و بررسی تاثیر استراتژی‌های مختلف |
| ۸ | ترنکوئیست (۲۰۱۲) | ارائه روش حل | کمینه سازی هزینه ناشی از تاخیرات | ابتكاری | تسريع بخشیدن به زمان حل مساله و مدل ارائه شده در مقاله قبلی خود |

| ردیف | نویسندها | نوع مدل | اهداف پژوهش | روش حل | خروجی و نتایج |
|------|---|-------------------------|---|--|---|
| ۹ | لوثی و همکاران (۲۰۰۷) | طراحی چارچوب تصمیم‌گیری | به روز رسانی جدول زمانی | -- | با نشان دادن تاثیر کاهش تاخیرات سیستم به اهمیت کنترل دقیق بر اجرای جدول زمانبندی برای جلوگیری از اختلالات کوچک تاکید دارد |
| ۱۰ | شوبن (۲۰۰۷) | MIP | کمینه سازی تاخیر مسافران | الگوریتم شاخه و کران | تعیین کوتاه ترین زمان سیر برای هر مسیر و همچنین تعیین مسیر مناسب از نظر زمان سیر، حفظ یا عدم حفظ رابطه بین مسافر و قطار |
| ۱۱ | دی آریانو (۲۰۰۸) | توسعه روشنحل | کمینه سازی تاخیرات | الگوریتم شاخه و کران | تسريع زمان حل و تهیه یک جدول زمانی انعطاف پذیر در زمان اعزام و ورود به منظور کاهش تاثیر اختلالات کوچک |
| ۱۲ | شیمیزو (۲۰۰۸) | شبیه سازی | کمینه سازی تاخیرات | -- | بررسی تغییرات در ترتیب اعزام قطارها از یک ایستگاه در زمان بروز اختلالات بزرگ |
| ۱۳ | مانی نو و ماسیس (۲۰۰۹) | روشنحل | کمینه کردن انحراف از جدول زمانی و هزینه های ناشی از آن | الگوریتم شاخه و کران | مسیر یابی مجدد با در نظر گرفتن کمترین زمان انحراف از جدول زمانی |
| ۱۴ | شوبن (۲۰۰۹) | ارائه روشنحل | کمینه کردن تاخیرات | روش ابتکاری بر اساس الگوریتم شاخه و کران | ارائه جدول زمانی و یک الگوریتم مفید و کارا برای حل مسائل زمانبندی مجد |
| ۱۵ | شاتبک و شوبن (۲۰۱۰) | توسعه روشنحل | کمینه کردن تاخیرات | الگوریتم ارائه شده در پژوهش قبلی | توسعه الگوریتم معرفی شده و افزایش سطح کارایی و سرعت حل آن |
| ۱۶ | کاکچیانی (۲۰۱۰) | ارائه الگوریتم | افزایش بهربرداری از ظرفیت سیستم بر لایه رانژین ریلکسیشن | الگوریتم ابتکاری مبتنی | تهیه برنامه حرکت قطارها با اضافه کردن قطارهای باری |
| ۱۷ | مانینو (۲۰۱۱) و مانینو و لامورجز (۲۰۱۲) | MIP | کمینه کردن تاخیرات | Non-compact | تعیین زمانهای اعزام و ورود و تصمیم‌گیری در خصوص نوع تغییر اولویت و ترتیب قطارها |

| ردیف | نویسندها | نوع مدل | اهداف پژوهش | روش حل | خروجی و نتایج |
|------|------------------------------|---------------------|---|------------------------------|---|
| ۱۸ | آکونا آگوست و همکاران (۲۰۱۱) | MIP | کمینه کردن هزینه تاخیرات | الگوریتم شاخه و کران | توسعه مدل ارائه شده در ترنسکوئیست ۲۰۰۷ با اعمال تغییراتی بر محدودیت‌ها به منظور پذیرش بیش از یک قطار به یک بخش برای قطارهای هم جهت |
| ۱۹ | منگ و زو (۲۰۱۱) | برنامه ریزی احتمالی | کمینه کردن تاخیرات | Cplex | تهیه یک جدول زمانی پایدار در برابر تاخیرات کوچک |
| ۲۰ | آکونا آگوست (۲۰۱۱) | ارائه روش حل | کاهش توقفات برنامه ریزی نشده | راه حل ابتکاری به نام SIPI | بهبود عملکرد مدل قبلی خود و ارائه الگوریتم کارا در خصوص حل مدل ارائه شده |
| ۲۱ | مین و همکاران (۲۰۱۱) | MIP | کمینه کردن میزان تاخیرات | Fix and regenerate algorithm | جلوگیری از تداخلات حرمتی قطارها و کاهش تاخیرات |
| ۲۲ | ناکامورا و همکاران (۲۰۱۱) | ارائه الگوریتم | برگرداندن فعالیت‌های کنسل شده هر قطار | -- | در طی اتفاق یک اختلال بزرگ الگوی بخشی از فعالیت‌های یک قطار که در زمانبندی مجدد کنسل شده است را بررسی کرده و آنها را زمانبندی مجدد می‌کند |
| ۲۳ | کورمن (۲۰۱۲) | Multi Objective | کمینه کردن مجموع تاخیرات و بیشینه کردن سرویس به مسافران | Cplex | به کمک نمودار پارتو یک تعادل بین اهداف برقرار کرده و جدول زمانی ارائه کرده است |
| ۲۴ | پلکرینی (۲۰۱۲) | MIP | به روز رسانی جدول زمانی با کمینه کردن انحرافات | Cplex | تعیین زمانهای ورود و اعزام، و مسیرهای حرکت هر قطار بعد از بروز اختلال |
| ۲۵ | بوسیکا و همکاران (۲۰۱۳) | MIP | کمینه کردن تاخیرات | الگوریتم ابتکاری | تعیین زمانهای ورود و خروج قطارها در هر ایستگاه و مشخص شدن مسیر حرکت قطارها |
| ۲۶ | آلبرچت (۲۰۱۳) | MIP | کمینه کردن مجموع تاخیر قطارها | روش ابتکاری | بررسی دو رویکرد کمینه سازی تاخیر کل قطارها و کمینه کردن بیشترین تاخیر هر قطار و ارائه جدول زمانی |

| ردیف | نویسندها | نوع مدل | اهداف پژوهش | روش حل | خروجی و نتایج |
|------|-------------------------|------------------------|---|------------------------|---|
| ۲۷ | دوایندر و شین (۲۰۱۳) | توسعه الگوریتم | کمینه کردن انحرافات | بر پایه الگوریتم ژنتیک | با مقایسه الگوریتم ارائه شده با یک الگوریتم عصبی، ژنتیک و نتایج یک مدل MIP عملکرد مدل سنجیده شده و به نسبت کارایی بهتری از خود نشان داده است. |
| ۲۸ | لور و هیزمن (۲۰۱۴) | MIP | کمینه کردن تاخیرات | Cplex | افزایش حجم جابجایب مسافران و کاهش تعداد لغو کمتری از فعالیتها |
| ۲۹ | ویلچوف و همکاران (۲۰۱۵) | MIP | کمینه کردن تاخیرات و تعداد کنسل شدن قطاهار | Cplex | تعیین زمانهای اعزام و رسیدن برای قطارها در برنامه جدید و تعیین مسیر برای قطارها |
| ۳۰ | چن و لی (۲۰۱۵) | MIP | کمینه کردن میانگین وزنی تاخیرات | DE-JRM الگوریتم | با کمینه کردن فاصله زمانی بین قطارها میزان تاخیرات را کم کرده‌اند. از دیگر نتایج مدل تعیین مسیر حرکت قطارهاست |
| ۳۱ | کانگ و همکاران (۲۰۱۵) | LP | کمینه کردن میزان انحرافات از جدول زمانی اولیه | الگوریتم ژنتیک | تعیین کردن زمان اعزام، ورود و توقف برای قطارها در هر ایستگاه تعیین مسیرهایی که کمترین هزینه را به همراه دارند. |
| ۳۲ | تولتی و مارتینر (۲۰۱۵) | IP | کمینه کردن تاخیرات، کنسل شدن فعالیت قطارها و مصرف انرژی | Cplex | تهیه جدول زمانی جدید قطارها هنگام بروز اختلال تعیین چارچوب تضمیم گیری برای اعزام گران در زمان اختلال به همراه ارائه مدل MIP برای حل مساله |
| ۳۳ | ون تیلن و سوفیا (۲۰۱۵) | ارائه الگوریتم | کمینه کردن تاخیرات | الگوریتم فراابتکاری | تهیه یک چارچوب تضمیم گیری برای اعزام گران در زمان اختلال به همراه ارائه مدل MIP برای حل مساله |
| ۳۴ | نارایاناسومی (۲۰۱۵) | تهیه چارچوب تضمیم گیری | کاهش تاخیرات | الگوریتم ابتکاری | ارائه یک مدل ابتکاری بر اساس مدل زمانبندی کارگاهی برای برای حل مسائل زمانبندی مجدد |
| ۳۵ | ملانوویچ a (۲۰۱۶) | ارائه روش حل | کمینه کردن تاخیرات | الگوریتم ابتکاری | الگوریتم ارائه شده در پژوهش قبلی خود را ارتقا داده است که در زمان کمتری جوابهای بهتری را ارائه می‌کند. |
| ۳۶ | ملانوویچ b (۲۰۱۶) | توسعه روش حل | کمینه تاخیرات | الگوریتم ابتکاری | الگوریتم ارائه شده در پژوهش قبلی خود را ارتقا داده است که در زمان کمتری جوابهای بهتری را ارائه می‌کند. |

| ردیف | نویسنده‌گان | نوع مدل | اهداف پژوهش | روش حل | خروجی و نتایج |
|------|-------------------------------------|---------------------|--|--|---|
| ۳۷ | بین و جیاتنگ (۲۰۱۶) | برنامه ریزی احتمالی | کاهش هزینه‌های عملیاتی، زمان سفر مسافران و تاخیرات | الگوریتم ابتکاری | ارائه یک ابزار تصمیم‌گیری برای اعزام گران در موقع پیک تقاضای سفر در مترو که موجب تاخیر می‌شود |
| ۳۸ | تولتی و همکاران (۲۰۱۶) | IP | کمینه کردن هزینه کنسل شدن | Cplex | تعیین مسیر برای یک قطار و ترکیب شدن قطارها با هم و توقف اجباری در ایستگاه |
| ۳۹ | بیندر و استیفن (۲۰۱۶) | چارچوب تصمیم گیری | کمینه کردن انحراف از جدول زمانی اولیه | الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی | با کمک استفاده از استراتژی‌های مختلف از جمله کنسل کردن و پذیرش تاخیر جدول زمانی مناسبی ارائه کرده‌اند |
| ۴۰ | قائمی و همکاران (۲۰۱۶) | MIP | کمینه کردن هزینه تاخیرات و هزینه‌های عملیاتی | Gurobi | تعیین جدول زمانی و مشخص نمودن کنسل شدن یا عدم نسل شدن یک خدمت به منظور افزایش بهره‌وری |
| ۴۱ | تمایی و همکاران (۲۰۱۶) | MIP | کمینه کردن انحراف از جدول زمانی و کاهش هزینه لغو | توسعه روشن حل بر پایه الگوریتم فراابتکاری SA | تعیین زمان‌های اعزام و رسیدن و تصمیم‌گیری در خصوص لغو فعالیت یک قطار و همچنین الگوریتم فراابتکاری مناسب در مقایسه با روش‌های دقیق |
| ۴۲ | کاون و همکاران (۲۰۱۶) | MIP | کمینه کردن تاخیر برای قطارها | روش ابتکاری | ارائه یک روش ادغام جدول زمانی به دست آمده با جدول زمانی اولیه و استفاده از یک روش اکتشافی برای حل اختلالات ناشی از ادغام |
| ۴۳ | لوثری و ریچارد (۲۰۱۷) | MIP | کمینه کردن هزینه کنسل شدن، هزینه کمبود ظرفیت و میزان انحراف از جدول زمانی اولیه | Branch & Price | در نظر گرفتن سطح رضایت مسافران و استفاده از ظرفیت دیگر قطارها برای جابجایی مسافران قطار کنسل شده |
| ۴۴ | واکنار و جوریس (۲۰۱۷) | MIP | کمینه کردن هزینه کنسل شدن، کمبود ظرفیت به ازاء هر کیلومتر و میزان انحراف از جدول زمانی | Cplex | در نظر گرفتن نگهداری و تعمیرات در مدل و توسعه مدل به سه مدل MIP مجزا |
| ۴۵ | شکیبایی فر و شیخ الاسلامی (۲۰۱۷) | MIP | کمینه کردن انحراف و زمان اعزام در هنگام اختلال | Cplex | ارائه جدول زمانبندی مجدد بر اساس جدول زمانی اولیه ارائه شده |

| ردیف | نویسنده‌گان | نوع مدل | اهداف پژوهش | روش حل | خروجی و نتایج |
|------|--------------------------------|--|--|------------------------|--|
| ۴۶ | دلووت و همکاران (۲۰۱۷) | ارائه چارچوب تصمیم‌گیری مجدد خدمه) | پاسخگو بودن به سه برنامه ریزی مجدد (زمانبندی مجدد، برنامه ریزی مجدد ناوگان و برنامه ریزی | -- | ارائه یک چارچوب که مدلها و الگوریتم‌های برنامه ریزی مجدد را شامل می‌شود و معرفی برنامه‌هایی که برای هر سه دسته امکان پذیر می‌باشد |
| ۴۷ | فیسچتی و ماتئو (۲۰۱۷) | ارائه الگوریتم ابتکاری | کمینه کردن تاخیرات | الگوریتم ابتکاری | ارائه یک مدل ریاضی MIP و یک الگوریتم برای حل مساله زمانبندی مجدد در خصوص تصمیم‌گیری برای زمان اعزام و کنسل شدن یا نشدن یک فعالیت |
| ۴۸ | داویدور و چبووتا (۲۰۱۷) | برنامه ریزی احتمالی | کمینه کردن انحراف | Cplex | با در نظر گرفتن زمانهای اعزام به صورت احتمالی و استفاده از یک معیار جدید برای تاخیر، رضایت مسافران را در نظر می‌گیرد در نظر گرفتن مفروضات برای مدل سازی و حل شدن مساله در زمان کوتاه |
| ۴۹ | اوتكا و فرانچسکو (۲۰۱۸) | MIP | افزایش سطح رضایت مسافران | Cplex | توجه به اهمیت قطارها و استفاده از بیشترین حد سرعت سیر قطار در سیرگاه |
| ۵۰ | دونزلا و فابیو (۲۰۱۸) | LP | کمینه کردن کل زمان سفر | Cplex | ارائه یک الگوریتم ابتکاری و استفاده از مدل ترنکوئیست ۲۰۰۷ برای حل مدل |
| ۵۱ | جوسیولا و همکاران (۲۰۱۸) | ارائه روش حل | کمینه کردن انحراف از جدول زمانی | Depth – first - search | تخصیص مسافران و ارائه جدول زمانی و توسعه یک مدل MIP برای حل مساله |
| ۵۲ | قائمی و نادجلا (۲۰۱۸) | ارائه چارچوب تصمیم‌گیری | کمینه کردن زمان تاخیر در اعزام قطارها و کنسل شدن | Cplex | افزایش پاسخگویی به تقاضای مسافر و ارائه جدول زمانبندی جدید |
| ۵۳ | سیجیا هو و روی سانگ (۲۰۱۹) | ارائه چارچوب تصمیم‌گیری | کمینه کردن زمان اختلال | الگوریتم ابتکاری | ارائه یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مساله زمانبندی مجدد هنگام بروز اختلالات کوچک در مترو |
| ۵۴ | ژوپی هونگ و هایرون دانگ (۲۰۱۹) | MIP | کمینه کردن انحراف در جدول زمانی، مصرف انرژی و انتظار مسافر | Cplex | |

| ردیف | نویسنده‌گان | نوع مدل | اهداف پژوهش | روش حل | خروجی و نتایج |
|------|-----------------------------|---------|---|--------|--|
| ۵۵ | شوگانگ ژان و وانگ (۲۰۱۹) | MILP | کمینه کردن تعداد قطارهای کنسل شده و میانگین وزنی انحرافات قطارهای مختلط شده | Cplex | ارائه مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط و کاهش تعداد قطارهای کنسل شده. |
| ۵۶ | پانگ کیو و راب گاورد (۲۰۱۹) | MIP | کمینه کردن تاخیر مسافران | GUROBI | ارائه مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط به منظور تصمیم گیری در مورد کنسل شدن یا تغییر مسیر برای یک فعالیت و ارائه جدول زمانی جدید به هنگام بروز اختلالات بزرگ |

۹-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

در بررسی ادبیات موضوع زمانبندی مجدد حرکت قطار مشخص می شود که در اکثر مطالعات تنها بر استراتژی تاخیر تمرکز دارند. با این حال استراتژی لغو قطارها، مسیر دهی مجدد قطارها، تخصیص مجدد سکو به مسافرین و تغییر در سرعت قطارها نیز در مطالعات مختلف زمانبندی مجدد مورد استفاده قرار گرفته است.

تابع هدف در بسیار از مطالعات کمینه سازی تاخیر میانگین و یا مجموع تاخیرات برای قطارها بوده است. برخی از توابع هدف مورد استفاده در مطالعات زمانبندی مجدد حرکت قطارها عبارت اند از:

- کمینه سازی نارضایتی مسافرین قطار
- کمینه سازی مجموع جریمه لغو و تاخیر قطارها
- کمینه سازی هزینه مسیرهای انتخابی
- بیشینه سازی قطارهای باری اضافه شده به جدول زمانی موجود
- کمینه سازی انتشار تاخیرات اولیه در جدول زمانبندی دوره‌ای

بخش قابل توجه‌ای از مطالعات در زمانبندی مجدد قطارها در هنگام بروز اختلالات کوچک تاکید دارند. دسته‌ای از مطالعه‌های ارائه یک مدل برنامه ریزی ریاضی (LP, IP, MIP) با در نظر گرفتن محدودیت‌های خاص محدود به شرایط حادثه انجام شده‌اند.

برخی از نتایج این دسته از مطالعات عبارت‌اند از: زمانبندی همزمان سفرها و تخصیص ناوگان، زمانبندی مجدد با توجه به همزمان به ظرفیت زیر ساخت و ناوگان، زمانبندی مجدد قطارهای باری و ...

دسته‌ای از مطالعات بر یافتن ابزارهای پشتیبان تصمیم گیری جهت کمک به اعزام گران و در رفع فوری ناسازگاری‌های حرکت قطارها تمرکز داشته‌اند.

در برخی از این روش‌ها از الگوریتم‌های دقیق همچون شاخه و کران جهت حل مسئله برگرفته شده است، در حالی که در برخی دیگر از رویکردهای متفاوت در روش‌های ابتکاری (همچون الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه سازی شده) استفاده شده است . همچنین ملاحظه می‌گردد که اکثر تحقیقات صورت گرفته در این حوزه در محدوده راه‌آهن کشورهای اروپایی می‌باشد.

لازم به ذکر است پس از بررسی منابع و مقالات مشخص گردید علی رغم پژوهش‌های متعدد انجام شده در زمینه زمانبندی اولیه حرکت قطارها در ایران تعداد کمی پژوهش در این زمینه انجام شده است. همچنین با مرور بر ادبیات موضوع اهمیت زمان حل مساله و فوریت بر نیاز به جواب در حل مساله زمانبندی مجدد حرکت قطار به روشنی مشخص است.

آنچه که در ادبیات موضوع همانند دیگر تحقیقات به آن توجه نشده است زمانبندی مجدد حرکت قطارها با در نظر گرفتن محدودیت لکوموتیو، و تخصیص لکوموتیو امدادی به قطار مختل شده می‌باشد. به همین منظور یک مدل ریاضی برای پوشش این اختلال توسعه داده شده است که در فصل بعد به ارائه آن خواهیم پرداخت.



فصل سوم

مدل ریاضی پیشنهادی

۱-۳- مقدمه

در فصل پیش به بررسی مفاهیم ابتدایی و تحقیقات علمی انجام گرفته در ادبیات موضوع در زمینه‌ی زمانبندی مجدد حرکت قطارها پرداخته شد. با توجه به مدل‌های بررسی شده و همچنین اطلاعات اخذ شده از راه‌آهن کشور، محدودیت‌ها و شرایط موجود حرکت قطارها اخذ شده که در اینجا از آن‌ها برای مدل‌سازی استفاده خواهد شد. در این فصل به ارائه‌ی مدل ریاضی به منظور حل مساله زمانبندی مجدد حرکت قطارها هنگام خرایی لکوموتیو پرداخته خواهد شد. ابتدا مفروضات و سپس محدودیت‌های موردنیاز برای مسئله‌ی مذکور شرح داده می‌شود، علائم و نشانه‌های مورد استفاده توضیح داده شده سپس به بررسی و ارائه‌ی مدل پرداخته خواهد شد.

۲-۳- بیان مسئله

۱-۲-۳- مفروضات

یک شبکه ریلی متشكل از ایستگاه‌ها و بلاک‌های دو خطه مفروض است. قطارها از مسیرهای مختلف بین مبدأ و مقصد خود حرکت می‌کنند. در این مساله مجموعه‌ی قطارها به دو دسته تقسیم می‌شوند قطارهایی که در جهت قطار مختل شده حرکت می‌کنند که با مجموعه I و قطارهایی که در خلاف جهت قطار مختل شده حرکت می‌کنند با مجموعه J نمایش داده می‌شوند، که هر یک از این مجموعه‌ها شامل قطارهایی می‌شوند که هنوز فعالیت خود را به اتمام نرسانیده‌اند. دلیل این امر این است که، قطارهایی که به مقصد خود رسیده‌اند نیازی به برنامه ریزی ندارند، با توجه به اینکه زمانهای سیر و توقف در هر مسیر و ایستگاه برگرفته از جدول زمانبندی اولیه است و همچنین در مساله زمانبندی مجدد هیچ‌کدام از قطارها مبدا خود را زودتر از زمان تعیین شده ترک نمی‌کنند پس برای قطارهای هم جهت فاصله زمانی بین هر دو قطار متوالی بزرگ‌تر یا مساوی آنچه خواهد بود که در جدول زمانی اولیه تعیین شده است. مابقی قطارها در این مساله در لحظه بروز اختلال هر کدام در موقعیت منحصر به فردی قرار دارند و اولین ایستگاهی که بعد از اختلال به آن وارد می‌شوند به عنوان ایستگاه مبدأ در مساله زمانبندی مجدد در نظر گرفته می‌شود، یعنی:

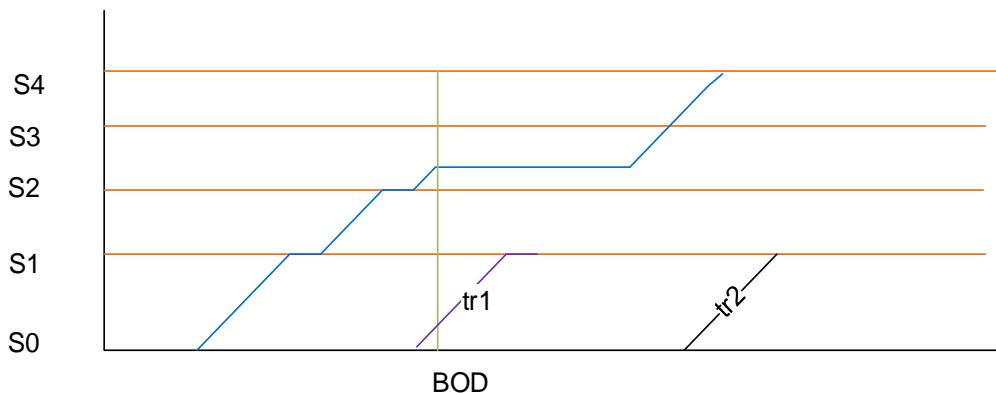
اگر فرض کنیم که RDS(i,s) زمان برنامه ریزی شده‌ی اعزام قطار آام از ایستگاه آام باشد و همچنین DS (i,s) متغیر تصمیم برای زمان اعزام قطار آام از ایستگاه S در برنامه جدید باشد و همچنین زمان

بروز خرابی را برابر با پارامتر BOD در نظر بگیریم، مبدأ حرکت برای قطار α م به شکل زیر تعیین می شود.

$Origin(i) = S+1$ If $RDS(i, s) < BOD \& RDS(i, s+1) \geq BOD$

$Origin(i) = S$ If $RDS(i, s) \geq BOD$

همانطور که در شکل زیر مشخص است اگر زمان اعزام یک قطار زودتر از زمان رخداد باشد، زمان اعزام از ایستگاه بعدی در جدول اولیه را به عنوان ورودی مساله در نظر میگیریم. با توجه به این فرضیات ایستگاه مبدأ و زمان اعزام از مبدأ برای قطار $TR1$ در شکل زیر برابر است با ایستگاه $S1$ و زمان اعزام آن هم برابر است با زمان اعزام برنامه ریزی شده برای این قطار در این ایستگاه. اما برای قطار $TR2$ ایستگاه مبدأ و زمان اعزام به ترتیب برابر است با ایستگاه $S0$ و زمان اعزام برنامه ریزی شده از ایستگاه $S0$ برای این قطار.



شکل (۱-۳) : زمان اعزام قطارها در بازه زمانی وقوع اختلال

فرض دیگری که در این مساله وجود دارد این است که در هنگام بروز حادثه لکوموتیوهایی که به عنوان لکوموتیو امداد در شبکه وجود دارند بالافاصله قادر به اعزام میباشند و همچنین بعد از عملیات کوپلینگ برای قطار مختل شده و لکوموتیو امدادی، قطار در جهت مقصد خود حرکت خواهد کرد.

۲-۲-۳- محدودیت‌ها

با بررسی ادبیات موضوع و شرایط موجود در شبکه ریلی کشور لازم است که برای توسعه مدل ریاضی به موارد زیر تحت عنوان محدودیت توجه شود:

- زمان شروع حرکت: در زمان بروز اختلال، به منظور زمانبندی مجدد لازم است که زمان اعزام هر یک از قطارها بزرگتر از زمان اعزام برنامه ریزی شدهی خود از ایستگاه مبداء جدید باشد. بعد از بروز حادثه هم برای قطارهای هم جهت با قطار مختل شده و هم برای قطارهای خلاف جهت با قطار مختل شده که لازم به زمانبندی مجدد آنهاست پس از تعیین مبداء حرکت، قطارها بایستی بعد از زمانی که به عنوان زمان اعزام از آن ایستگاه در جدول زمانی اولیه در نظر گرفته شده است حرکت کنند.
- توقف برنامه ریزی شده: قطارها در ایستگاههای مشخصی نیاز به توقف جهت سوار و پیاده کردن مسافر، سوختگیری، بازدید و ... دارند که به عنوان عددی ثابت و یا بازهای وارد مدل می‌شود.
- زمان سیر در بلاک: این محدودیت که به صورت محدودیت سرعت متوسط سیر در بلاک نیز می‌تواند در نظر گرفته شود برای رعایت حداکثر سرعت تعیین شده در بلاک با توجه به وضعیت مسیر و قوانین و مقررات موجود است.
- تلاقی قطارها: در سیرگاهی که اختلال رخداده است در مدت زمان اختلال از خط مقابل به عنوان مسیر دو طرفه بهره برداری می‌شود که لازم است در این بازه زمانی بین قطارهای رفت و برگشت تلاقی به وجود نیاید.
- اشغال بلاک: با توجه به مسائل ایمنی و سیر و حرکت قطارها، در هر لحظه تنها یک قطار می‌تواند در بلاک سیر کند و به محض خروج از بلاک، قطار بعدی می‌تواند وارد آن شود.
- سبقت قطارها: سبقت قطارهای هم جهت نیز مانند عملیات تلاقی تنها در ایستگاه می‌تواند انجام شود.
- تخصیص لکوموتیو: بایستی برای حل اختلال یک لکوموتیو به قطار مختل شده اختصاص داده شود.
- عدم تلاقی بین لکوموتیو امداد و قطارها: در هنگام اعزام لکوموتیو امداد به محل حادثه بایستی به عدم تلاقی بین لکوموتیو و قطارها توجه شود.
- برق قطار: برای تخصیص لکوموتیو بایستی به این محدودیت توجه شود که پس از تخصیص لکوموتیو برق قطار تامین شود (این امر یا به واسطه لکوموتیو انجام می‌شود یا به واسطه خود قطار که در هر صورت لازم است که به این موضوع توجه شود).
- عدم اعزام به سیرگاه مختل شده: در زمان اختلال هیچ قطاری نمی‌تواند از سیرگاه اشغال شده عبور کند تا زمانی که قطار مختل شده از آن بلاک عبور کند و به ایستگاه بعدی خود برسد.
- زمان اعزام قطار مختل شده: قطار مذکور زمانی می‌تواند حرکت کند که لکوموتیو امدادی به محل رخداد رسیده و عملیات کوپلینگ صورت گرفته شده باشد.

۳-۳-۳- مدل توسعه داده شده

۳-۱-۳- علائم و نشانه‌گذاری

در جداول زیر به تعریف مجموعه‌ها، اندیس‌ها و پارامترهای مورد استفاده پرداخته می‌شود:

جدول (۱-۳) علائم و نشانه‌گذاری‌های مورد استفاده در مدل ریاضی

| عنوان | توضیح |
|------------|---|
| I | مجموعه‌ی قطارهای هم جهت با قطار مختل شده (از ایستگاه S به ایستگاه $S+I$) |
| J | مجموعه‌ی قطارهای خلاف جهت با قطار مختل شده (از ایستگاه $S+I$ به ایستگاه S) |
| S | مجموعه‌ی ایستگاه‌ها |
| s | اندیس ایستگاه |
| B | مجموعه‌ی بلاک‌ها |
| b | اندیس بلاک |
| i, k | اندیس قطارهای رفت یا هم جهت با قطار مختل شده ($i \in I$) |
| td | اندیس قطار مختل شده |
| j | اندیس قطارهای برگشت یا خلاف جهت قطار مختل شده ($j \in J$) |
| L | مجموعه‌ی لکوموتیوها |
| l | اندیس لکوموتیو |
| $L1$ | زیر مجموعه لکوموتیوهایی که مسیر اعزامشان هم جهت با مسیر قطار مختل شده است |
| $L2$ | زیر مجموعه لکوموتیوهایی که مسیر اعزامشان خلاف جهت با قطار مختل شده است |
| $L3$ | زیر مجموعه لکوموتیوهایی که مولد برق دارند. |
| $BI(i,b)$ | بلاک‌هایی که قطار i ام بايستی طی کند. |
| $BJ(j,b)$ | بلاک‌هایی که قطار j ام بايستی طی کند. |
| $BL(l,b)$ | بلاک‌هایی که لکوموتیو b ام بايستی تا ایستگاه بلاک مسدود شده طی کند. |
| $ORG(i)$ | ایستگاه مبدأ قطار i |
| $ORGO(j)$ | ایستگاه مبدأ قطار j |
| $ORGL(l)$ | ایستگاه مبدأ لکوموتیو l |
| $DESI(i)$ | ایستگاه مقصد قطار i |
| $DESJ(j)$ | ایستگاه مقصد قطار j |
| M | یک عدد بزرگ |
| $PTS(i,b)$ | زمان سیر بلاک b ام توسط قطار i |

| | |
|--|------------|
| زمان سیر بلاک b ام توسط قطار λ ام | $PTO(j,b)$ |
| زمان توقف اجباری برای قطار ℓ م در ایستگاه α ام | $STS(i,b)$ |
| زمان توقف اجباری برای قطار λ ام در ایستگاه α ام | $STO(j,b)$ |
| زمان سیر بلاک b ام توسط لکوموتیو ℓ ام | $PTL(l,b)$ |
| زمان اعزام برنامه ریزی شدهی قطار λ ام از مبدأ جدید خود | $RDS(i)$ |
| زمان اعزام برنامه ریزی شدهی قطار λ ام از مبدأ جدید خود | $RDO(j)$ |
| زمان رسیدن قطار i ام به مقصد خود در جدول زمانی اولیه | $RAS(i)$ |
| زمان رسیدن قطار λ ام به مقصد خود در جدول زمانی اولیه | $RAO(j)$ |
| حداقل زمان سرفاصله بین عبور قطارها از سیرگاه b ام | $H(b)$ |
| زمان شروع اختلال | BOD |
| مدت زمان سیر لکوموتیو $L1$ از مبدأ بلاک مختل شده تا محل قطار بعلاوه زمان کوپلینگ یا اتصال بعلاوه زمان سیر تا انتهای بلاک | Ts |
| مدت زمان سیر لکوموتیو $L2$ از مبدأ بلاک مختل شده تا محل قطار بعلاوه زمان کوپلینگ یا اتصال بعلاوه زمان سیر تا انتهای بلاک | To |
| برابر ۱ اگر قطار مختل شده مولد برق داشته باشد و در غیر اینصورت برابر صفر است | $ELtd$ |

۳-۲-۳- متغیرها

جدول زیر متغیرهای تصمیمی مورد استفاده در مدل را شرح می‌دهد

جدول (۲-۳) متغیرهای مورد استفاده در مدل ریاضی

| عنوان | توضیح |
|-------------------|--|
| $as_{i,s}$ | زمان رسیدن قطار i ام به ایستگاه s /ام |
| $ds_{i,s}$ | زمان اعزام قطار i ام از ایستگاه s ام |
| $ao_{j,s}$ | زمان رسیدن قطار j ام به ایستگاه s ام |
| $do_{j,s}$ | زمان اعزام قطار j ام از ایستگاه s ام |
| $al_{l,s}$ | زمان رسیدن لکوموتیو l ام به ایستگاه s ام |
| $dl_{l,s}$ | زمان اعزام لکوموتیو l ام از ایستگاه s ام |
| Z_l | متغیر باینری و برابر است با ۱ اگر لکوموتیو l ام به قطار مختل شده تخصیص داده شود و در غیر اینصورت مقدار صفر خواهد گرفت. |
| $\lambda_{i,k,b}$ | متغیر باینری: برابر ۱ اگر قطار i زودتر از قطار K بلاک b را طی کند و در غیر اینصورت صفر خواهد بود |
| $\gamma_{i,j}$ | متغیر باینری: برابر ۱ اگر قطار رفت i زودتر از قطار برگشت ز بلاک تک خطه را طی کند و در غیر اینصورت برابر صفر خواهد بود. |
| $x_{i,l,b}$ | متغیر باینری: برابر ۱ اگر قطار رفت i زودتر از لکوموتیو $l \in L1$ بلاک b را طی کند و در غیر اینصورت برابر صفر خواهد بود. |
| $Y_{j,l,b}$ | متغیر باینری: برابر ۱ اگر قطار برگشت ز زودتر از لکوموتیو $l \in L2$ بلاک b را طی کند و در غیر اینصورت برابر صفر خواهد بود. |
| δ_i | متغیر باینری: برابر ۱ اگر زمان اعزام قطار i ام از ایستگاه ابتدایی بلاک مختل شده قبل از رسیدن قطار مختل شده به ایستگاه انتهایی بلاک مذکور باشد و در غیر اینصورت برابر صفر است |

-۳-۳-۳- مدل ریاضی

در ادامه مدل ریاضی توسعه داده شده شرح داده خواهد شد.

$$\text{Min } f = \sum_{i \in I, DESI(i)} (as_{i,s} - RAS_{i,s}) + \sum_{j \in J, DESJ(j)} (ao_{j,s} - RAO_{j,s}) \quad (1)$$

$$ds_{i,orgs_i} \geq RDS_{i,s} \quad \forall i \in I - \{td\} \quad (2)$$

$$as_{i,s+1} \geq ds_{i,s} + PTS_{i,s} \quad \forall i \in I, \forall b \in BI, \forall s \in Si \quad (3)$$

$$ds_{i,s} \geq as_{i,s} + STS_{i,s} \quad \forall i \in I, s \in Si \quad (4)$$

$$do_{j,orgs_j} \geq RDo_{j,s} \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$ao_{j,s} \geq do_{j,s+1} + PTO_{j,s} \quad \forall j \in J, \forall b \in BJ \quad (6)$$

$$do_{j,s} \geq ao_{j,s} + STO_{j,s} \quad \forall j \in J, s \in Sj \quad (7)$$

$$ds_{k,s} \geq as_{i,s+1} + H_b - M * (1 - \lambda_{i,k,b}) \quad \forall (i, k) \in I, s \in S, b \in BI \quad (8)$$

$$ds_{i,s} \geq as_{k,s+1} + H_b - M * \lambda_{i,k,b} \quad \forall (i, k) \in I, s \in S, b \in BI \quad (9)$$

$$do_{j,\hat{s}+1} \geq as_{i,\hat{s}+1} + H_{\hat{b}} - M * (2 - \gamma_{i,j} - \delta_i) \quad \forall i \in I - \{td\}, \forall j \in J \quad (10)$$

$$ds_{i,\hat{s}} \geq ao_{j,\hat{s}} + H_{\hat{b}} - M * (1 + \gamma_{i,j} - \delta_i) \quad \forall i \in I - \{td\}, \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{l \in L} z_l = 1 \quad (12)$$

$$z_l \leq EL_{td} \quad \forall l \in L - \{L_3\} \quad (13)$$

$$dl_{l,orgl_l} \geq BOD - M * (1 - z_l) \quad \forall l \in L \quad (14)$$

$$al_{l,s+1} \geq dl_{l,s} + PTL_{l,b} \quad \forall l \in L1, b \in BL, \forall s \in S \quad (15)$$

$$dl_{l,s} \geq al_{l,s} \quad \forall l \in L, \forall s \in S \quad (16)$$

$$dl_{l,s} \geq as_{i,s+1} + H_b - M * (2 - x_{i,l,b} - z_l) \quad \forall l \in L1, \forall s \in S, \forall b \in BL \cap BI \quad (17)$$

$$ds_{i,s} \geq al_{l,s+1} + H_b - M * (1 + x_{i,l,b} - z_l) \quad \forall l \in L1, \forall s \in S, \forall b \in BL \cap BI \quad (18)$$

$$al_{l,s} \geq dl_{l,s+1} + PTL_{l,b} \quad \forall l \in L2, b \in BL, \forall s \in S \quad (19)$$

$$dl_{l,s+1} \geq ao_{j,s} + H_b - M * (2 - y_{j,l,b} - z_l) \quad \forall l \in L2, \forall s \in S, \forall b \in BL \cap BJ \quad (20)$$

$$do_{j,s+1} \geq al_{l,s} + H_b - M * (1 + y_{j,l,b} - z_l) \quad \forall l \in L2, \forall s \in S, \forall b \in BL \cap BJ \quad (21)$$

$$as_{td,\hat{s}+1} \geq dl_{l,\hat{s}} + t_s - M * (1 - z_l) \quad \forall l \in L1 \quad (22)$$

$$as_{td,\hat{s}+1} \geq dl_{l,\hat{s}+1} + t_o - M * (1 - z_l) \quad \forall l \in L2 \quad (23)$$

$$ds_{i,\hat{s}} \leq as_{td,\hat{s}+1} + M * (1 - \delta_i) \quad \forall i \in I \quad (24)$$

$$ds_{i,\hat{s}} \geq as_{td,\hat{s}+1} - M * \delta_i \quad \forall i \in I \quad (25)$$

$$ds_{i,s}, as_{i,s}, do_{j,s}, ao_{j,s}, dl_{l,s}, al_{l,s} \geq 0 \quad (26)$$

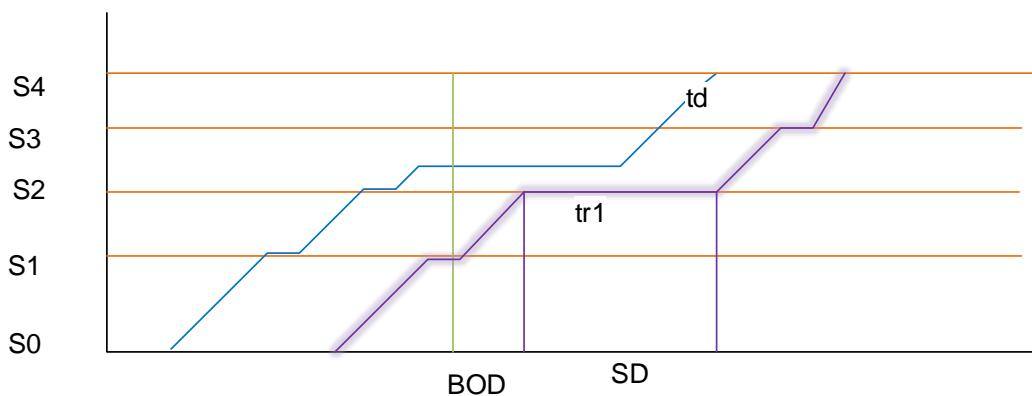
$$\lambda_{i,k,b}, \gamma_{i,j}, \delta_i, x_{i,l,b}, z_l, y_{j,l,b} \in \{0,1\} \quad (27)$$

عبارت شماره (۱) تابع هدف می‌باشد، که مجموع انحرافات از برنامه اولیه را کمینه می‌کند.

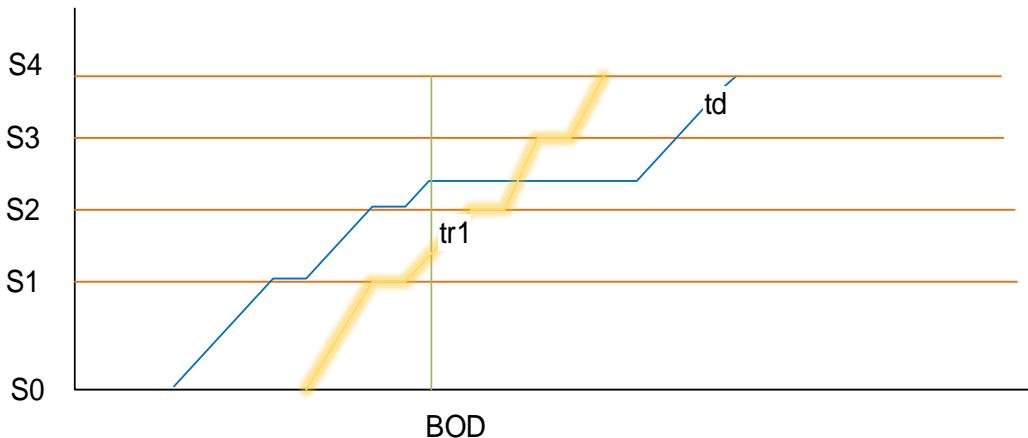
عبارات (۲) و (۵) زمان اعزام قطارها (قطارهای رفت و برگشت) از مبدأ را تعیین می‌کنند.

عبارات (۳) و (۶) به ترتیب سرعت سیر قطارها در بلاک و زمانهای توقف برنامه ریزی شده جهت پیاده و سوار کردن مسافران و... را به قطارها اعمال می‌کنند.

عبارات (۸) و (۹) در این محدودیتها به قطارها اجازه داده می‌شود تا بتوانند از همدیگر در ایستگاه‌ها سبقت بگیرند که این امر باعث می‌شود که تاخیرات ثانویه کمینه شوند. چرا که عدم اجازه تغییر ترتیب قطارها منجر به افزایش تاخیرات ثانویه می‌شود. شکل زیر این موضوع را بهتر شرح می‌دهد.

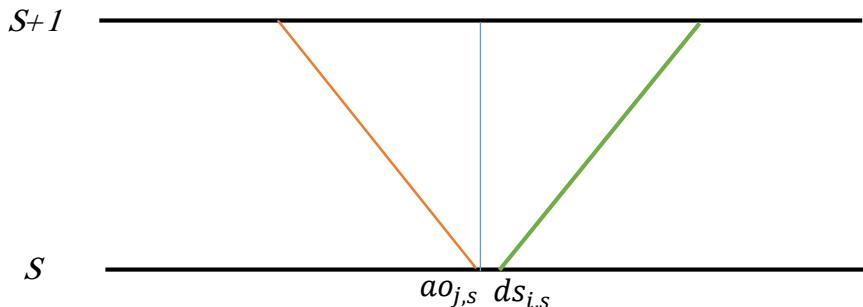


شکل (۲-۳) عدم اجازه سبقت به قطارها

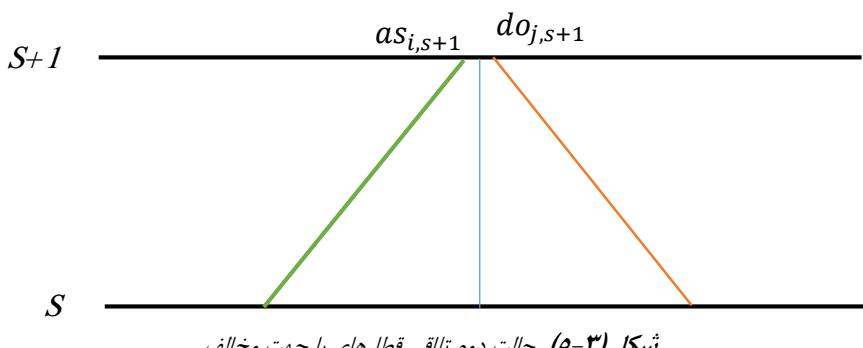


شکل (۳-۳) مجاز بودن قطارها برای سبقت از همدیگر

عبارات (۱۰) و (۱۱) باعث میشوند که اگر قطاری که در جهت قطار مختل شده است. در زمان اختلال به ایستگاه ابتدایی بلاک مسدود برسد میتواند از خط مقابل برای ترک ایستگاه فعلی و رسیدن به ایستگاه بعدی، استفاده کند لازم است به عدم تلاقی با قطارهای مختلف الجهت در این سیرگاه توجه شود که این محدودیت این موضوع را تضمین نمیکند. در این محدودیت یکی از دو حالت زیر رخ می دهد.



شکل (۳-۴) حالت اول تلاقی قطارهای با جهت مخالف



شکل (۳-۵) حالت دوم تلاقی قطارهای با جهت مخالف

عبارات (۱۲) بیان میدارد که باید و تنها یک لکوموتیو به قطار مختل اختصاص داده شود.

عبارت (۱۳): در این محدودیت اگر قطار مختل شده خود برق داشته باشد تمامی لکوموتیوها می توانند انتخاب شوند ولی اگر مولد برق نداشته باشد تنها لکوموتیوهایی می توانند به قطار اختصاص داده شوند که قادر به تامین برق قطار باشند.

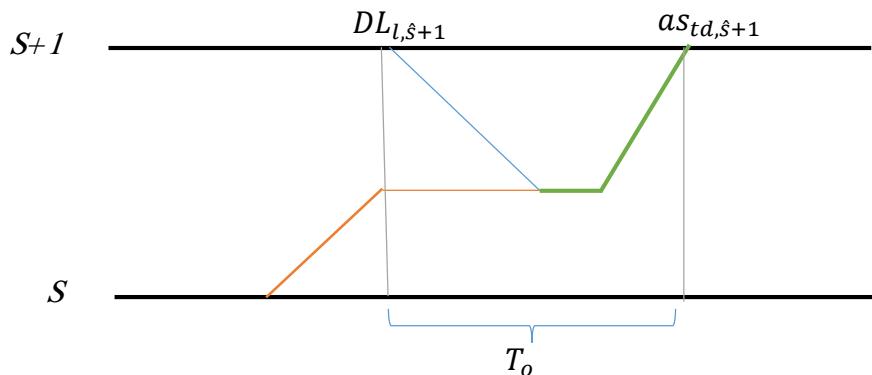
عبارت (۱۴): بیان میدارد که اگر لکوموتیوی جهت امداد انتخاب شود زمان اعزام آن از مبدأ خود باقیستی بعد از زمان بروز اختلال باشد.

عبارات (۱۵) و (۱۶) و (۱۹) تضمین میکنند که لکوموتیو زمانی میتواند به ایستگاه بعدی خود برسد که بلاک منتهی به ایستگاه بعدی را طی کند و همچنین زمانی میتواند از یک ایستگاه اعزام شود که به آن ایستگاه رسیده باشد.

عبارات (۱۷) و (۱۸) جهت عدم تلاقی لکوموتیو با قطارهای هم جهت با قطار مختل شده استفاده شده است. این دو محدودیت زمانی عمل میکنند که لکوموتیو انتخابی از لکوموتیوهای موجود در ایستگاههای قبلی قطار مختل شده اتخاذ شده باشد.

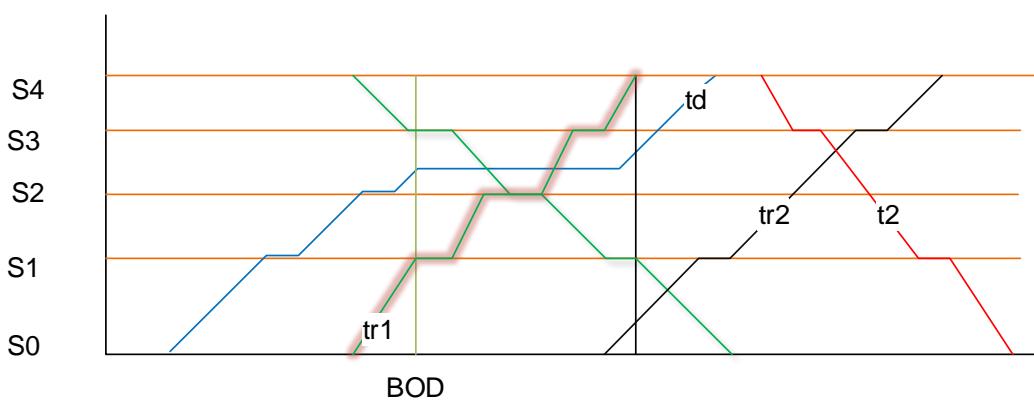
عبارات (۲۰) و (۲۱): این دسته محدودیتها همانند محدودیتهای ۱۷ و ۱۸ عمل میکنند با این تفاوت که اگر لکوموتیو امدادی از ایستگاههای بعدی قطار مختل شده انتخاب شده باشد.

عبارات (۲۲) و (۲۳): این دو محدودیت تضمین میکنند که قطار مختل شده زمانی میتواند به ایستگاه بعدی خود برسد که لکوموتیو امدادی به محل خرابی رسیده باشد و قطار را به ایستگاه بعدی برساند.



شکل (۶-۳) محدودیت زمان رسیدن قطار مختل شده به ایستگاه بعدی خود

عبارات (۲۴) و (۲۵) محدودیتهایی که تضمین میکنند تا زمانی که قطار مختل شده به ایستگاه بعدی خود نرسد بلکه به صورت تک خطه عمل کند و بعد از آزادی بلک قطارهای رفت از مسیر رفت برای سیر بلک استفاده کنند.



شکل (۷-۳) استفاده از مسیر برگشت به عنوان تک خطه تا تایپیان زمان انسداد

همانطور که از شکل فوق مشخص است در زمان مسدودی بلاک تا زمانی که قطار T1 به ایستگاه S2 نرسد قطار Tr1 نمی‌تواند اعزام بشود اما بعد از آزاد شدن بلاک قطارهای 2 و T2 بدون هیچ مشکلی مسیر خود را ادامه می‌دهند.

عبارات (۲۶) و (۲۷) : این دو محدودیت نیز نوع متغیرها را مشخص می‌کنند.

فصل چهارم

مطالعه موردی

راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران به ۱۹ ناحیه تقسیم شده است و در مجموع دارای ۱۰۴۵۹ کیلومتر خط اصلی و ۲۸۳۸ کیلومتر خط فرعی بوده که بر روی خود تعداد ۴۷۶ ایستگاه (۳۸۷ ایستگاه باز و ۸۹ ایستگاه بسته) را جای داده است. قسمت اعظم شبکه‌ی راه‌آهن کشور تک‌خطه می‌باشد که نیازمند برنامه‌ریزی و کنترل دقیق‌تر عملیات‌ها جهت افزایش کارایی می‌باشد، هرچند هدف‌گذاری مسئولین دوخطه‌سازی مسیرهای پرتردد جهت افزایش ظرفیت و بهبود وضعیت حمل و نقل ریلی کشور است. در این پژوهش یک مدل ریاضی توسعه داده شده که سازگار با شرایط و محدودیت‌های موجود در شبکه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران می‌باشد، در فصل قبل این مدل به طور کامل ارائه گردید و در اینجا قصد بر این است که برای قسمتی از راه‌آهن کشور مورد استفاده قرار گرفته و پیاده شود.

۱-۴- مطالعه موردنی

با توجه به مدل ریاضی توسعه داده شده و محدودیت‌های موجود و همچنین به منظور نشان دادن کارایی مدل قسمتی از راه‌آهن کشور که مسیر تهران - مشهد را شامل می‌شود انتخاب شده است. مسیر یاد شده دارای ۵۰ ایستگاه می‌باشد که در آن ۳۲ قطار از تهران به سمت مشهد (مسیر رفت) و ۳۲ قطار از مشهد به سمت تهران (مسیر برگشت) سیر می‌کنند. لازم به ذکر است که برای ۳۲ قطار رفت و ۳۲ قطار برگشت الزاماً مقصدشان به ترتیب مشهد و تهران نیست، ولی در این مسیر فعالیت می‌کنند.

اطلاعات ورودی مدل که مربوط به زمانبندی حرکت قطارها می‌باشند از جمله تعداد ایستگاه‌های مسیر، تعداد بلاک‌ها، زمان متوسط سیر بلاک، تعداد قطارهای موجود در هر مسیر، زمان توقف در هر ایستگاه و ... از معاونت سیر و حرکت راه‌آهن ج.ا.ا.ا اخذ شده‌اند که در ادامه به ارائه این اطلاعات پرداخته خواهد شد.

۴-۲-۴- ورودی‌های مدل

۴-۲-۱- برنامه زمانبندی حرکت قطارها

جدول زیر شامل تمامی قطارهاییست که در این محور فعالیت میکنند و ایستگاههای مبدأ و زمان اعزام هر کدام از مبدأ حرکت خود و همچنین ایستگاههای مقصد و زمان ورود به مقصد نیز مشخص می‌کند.

جدول (۴-۱) برنامه زمانی موجود حرکت قطارها در مسیر برنامه ریزی [۷]

| شماره قطار | زمان اعزام از مبدأ | زمان رسیدن به مقصد | مبدأ | شماره قطار | زمان اعزام از مبدأ | زمان رسیدن به مقصد | مبدأ | زمان اعزام از مبدأ | مبدأ | زمان رسیدن به مقصد |
|---------------|--------------------------|--------------------------|------|---------------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|
| ۳۱۶ | ۰۹:۴۵ | ۰۹:۲۵ | مشهد | ۳۱۷ | ۱۶:۰۵ | ۰۲:۲۵ | تهران | ۲۳:۲۵ | تهران | ۰۲:۲۵ |
| ۳۱۸ | ۲۱:۴۵ | ۱۹:۲۰ | مشهد | ۳۱۹ | ۰۷:۱۰ | ۱۹:۲۰ | تهران | ۰۹:۲۰ | تهران | ۰۹:۲۰ |
| ۳۲۰ | ۰۶:۰۵ | ۰۶:۴۰ | مشهد | ۳۲۱ | ۲۰:۲۰ | ۲۰:۵۵ | تهران | ۱۹:۵۵ | تهران | ۱۹:۵۵ |
| ۳۳۰ | ۰۲:۳۰ | ۲۲:۵۵ | مشهد | ۳۳۱ | ۱۲:۱۵ | ۱۲:۲۵ | تهران | ۱۶:۰۵ | تهران | ۱۶:۰۵ |
| ۳۳۴ | ۰۱:۲۰ | ۱۲:۲۵ | مشهد | ۳۳۵ | ۰۰:۵۵ | ۰۰:۳۵ | تهران | ۰۱:۲۰ | تهران | ۰۰:۵۵ |
| ۳۳۶ | ۰۰:۰۵ | ۰۹:۳۵ | مشهد | ۳۳۷ | ۲۲:۱۰ | ۰۹:۳۵ | تهران | ۰۰:۳۰ | تهران | ۲۲:۱۰ |
| ۳۳۸ | ۰۰:۳۰ | ۰۹:۵۵ | مشهد | ۳۳۹ | ۲۲:۳۵ | ۰۹:۵۵ | تهران | ۰۰:۳۰ | تهران | ۲۲:۳۵ |
| ۳۴۰ | ۰۰:۱۵ | ۰۳:۴۰ | مشهد | ۳۴۱ | ۱۷:۲۰ | ۰۳:۴۰ | تهران | ۲۰:۱۵ | تهران | ۱۷:۲۰ |
| ۳۴۲ | ۱۷:۵۵ | ۰۵:۲۰ | مشهد | ۳۴۳ | ۱۸:۵۵ | ۰۵:۲۰ | تهران | ۱۷:۵۵ | تهران | ۱۸:۵۵ |
| ۳۴۶ | ۲۱:۴۰ | ۰۶:۲۵ | مشهد | ۳۴۷ | ۱۹:۵۵ | ۰۶:۲۵ | تهران | ۲۱:۴۰ | تهران | ۱۹:۵۵ |
| ۳۴۸ | ۲۲:۰۰ | ۰۴:۳۰ | مشهد | ۳۴۹ | ۱۸:۳۰ | ۰۴:۳۰ | تهران | ۲۲:۰۰ | تهران | ۱۸:۳۰ |
| ۳۵۰ | ۱۵:۴۵ | ۲۳:۳۰ | مشهد | ۳۵۱ | ۱۲:۵۵ | ۲۳:۳۰ | تهران | ۱۵:۴۵ | تهران | ۱۲:۵۵ |
| ۳۵۴ | ۲۳:۰۵ | ۰۵:۴۵ | مشهد | ۳۵۵ | ۰۹:۲۰ | ۰۵:۴۵ | تهران | ۲۳:۰۵ | تهران | ۰۹:۲۰ |
| ۳۶۶ | ۲۱:۰۰ | ۰۴:۰۵ | مشهد | ۳۶۷ | ۱۷:۴۵ | ۰۴:۰۵ | تهران | ۲۱:۰۰ | تهران | ۱۷:۴۵ |
| ۳۶۸ | ۱۷:۵۵ | ۰۷:۵۰ | مشهد | ۳۶۹ | ۲۰:۴۰ | ۰۷:۵۰ | تهران | ۱۷:۵۵ | تهران | ۲۰:۴۰ |
| ۳۷۰ | ۱۵:۰۵ | ۲۳:۱۵ | مشهد | ۳۷۱ | ۱۰:۲۰ | ۱۳:۲۵ | تهران | ۱۵:۰۵ | تهران | ۱۰:۲۰ |
| ۳۷۲ | ۰۷:۰۵ | ۰۵:۲۰ | مشهد | ۳۷۳ | ۰۵:۲۰ | ۱۳:۲۵ | تهران | ۰۷:۰۵ | تهران | ۰۵:۲۰ |

| شماره قطار | زمان از مبدأ | مبدأ | زمان اعزام از مبدأ | مقصد | زمان رسیدن به مقصد | شماره قطار | زمان اعزام از مبدأ | مبدأ | زمان رسیدن به مقصد | مقصد | شماره قطار |
|---------------|-----------------|--------|--------------------------|--------|--------------------------|---------------|-----------------------|--------|--------------------------|--------|---------------|
| ۳۷۴ | تهران | مشهد | ۰۶:۰۰ | تهران | ۱۳:۴۰ | ۳۷۵ | مشهد | تهران | ۰۷:۲۰ | تهران | ۱۵:۳۵ |
| ۳۹۰ | تهران | مشهد | ۱۵:۱۵ | تهران | ۰۱:۴۰ | ۳۹۱ | مشهد | تهران | ۱۹:۱۰ | تهران | ۰۵:۰۵ |
| ۹۱۶ | تهران | پیشوای | ۰۵:۲۰ | تهران | ۰۶:۱۵ | ۹۱۷ | پیشوای | تهران | ۰۴:۰۰ | تهران | ۰۴:۵۰ |
| ۹۱۸ | تهران | پیشوای | ۰۷:۳۰ | تهران | ۰۸:۲۵ | ۹۱۹ | پیشوای | تهران | ۰۴:۵۵ | تهران | ۰۵:۴۵ |
| ۹۲۰ | تهران | پیشوای | ۱۰:۱۰ | تهران | ۱۱:۰۵ | ۹۲۱ | پیشوای | تهران | ۰۸:۳۰ | تهران | ۰۹:۲۰ |
| ۹۲۲ | تهران | پیشوای | ۱۲:۰۰ | تهران | ۱۲:۵۵ | ۹۲۳ | پیشوای | تهران | ۱۰:۳۰ | تهران | ۱۱:۲۰ |
| ۹۲۶ | تهران | پیشوای | ۱۷:۵۵ | تهران | ۱۸:۵۰ | ۹۲۷ | پیشوای | تهران | ۱۶:۲۵ | تهران | ۱۷:۱۵ |
| ۹۳۰ | تهران | گرمسار | ۱۳:۱۵ | تهران | ۱۴:۵۰ | ۹۳۱ | گرمسار | تهران | ۰۶:۱۵ | تهران | ۰۷:۴۵ |
| ۹۳۲ | تهران | گرمسار | ۲۰:۰۵ | تهران | ۲۱:۴۰ | ۹۳۳ | گرمسار | تهران | ۱۷:۱۵ | تهران | ۱۸:۴۵ |
| ۹۵۲ | تهران | سمنان | ۰۶:۰۰ | تهران | ۰۸:۳۵ | ۹۵۳ | سمنان | تهران | ۱۴:۳۵ | تهران | ۱۷:۰۵ |
| ۹۷۰ | ازادور | مشهد | ۱۴:۰۵ | ازادور | ۱۸:۰۰ | ۹۷۱ | مشهد | ازادور | ۰۶:۵۰ | ازادور | ۱۰:۴۵ |
| ۹۷۲ | تهران | پیشوای | ۲۰:۰۰ | تهران | ۲۰:۵۵ | ۹۷۳ | پیشوای | تهران | ۱۸:۱۰ | تهران | ۱۹:۰۰ |
| ۹۷۶ | تهران | گرمسار | ۰۵:۳۰ | تهران | ۰۷:۰۵ | ۹۷۷ | گرمسار | تهران | ۱۹:۲۵ | تهران | ۲۰:۵۵ |

۴-۲-۲-۲-۴-ایستگاه‌های مسیر

همانطور که پیش تر نیز ذکر شد این مسیر شامل ۵۰ تا ایستگاه می باشد که اطلاعات ایستگاه در جدول بعدی ذکر شده است. لازم به ذکر است که سیرگاه بین هردو ایستگاه به عنوان یک بلاک در نظر گرفته شده است پس مساله شامل ۵۰ تا ایستگاه و ۴۹ تا بلاک می باشد که تمامی این مسیر دو جهته است، به عبارت دیگر در مسیر اتخاذ شده بلاک تک خطه وجود ندارد. در این پژوهش در خصوص نامگذاری بلاک ها نیز از تهران به سمت مشهد، هر سیرگاه بین دو ایستگاه متولی با نام ایستگاه قبلی نشان داده ایم برای مثال سیرگاه مابین ایستگاه تهران - ری را بلاک تهران معرفی میکنیم.

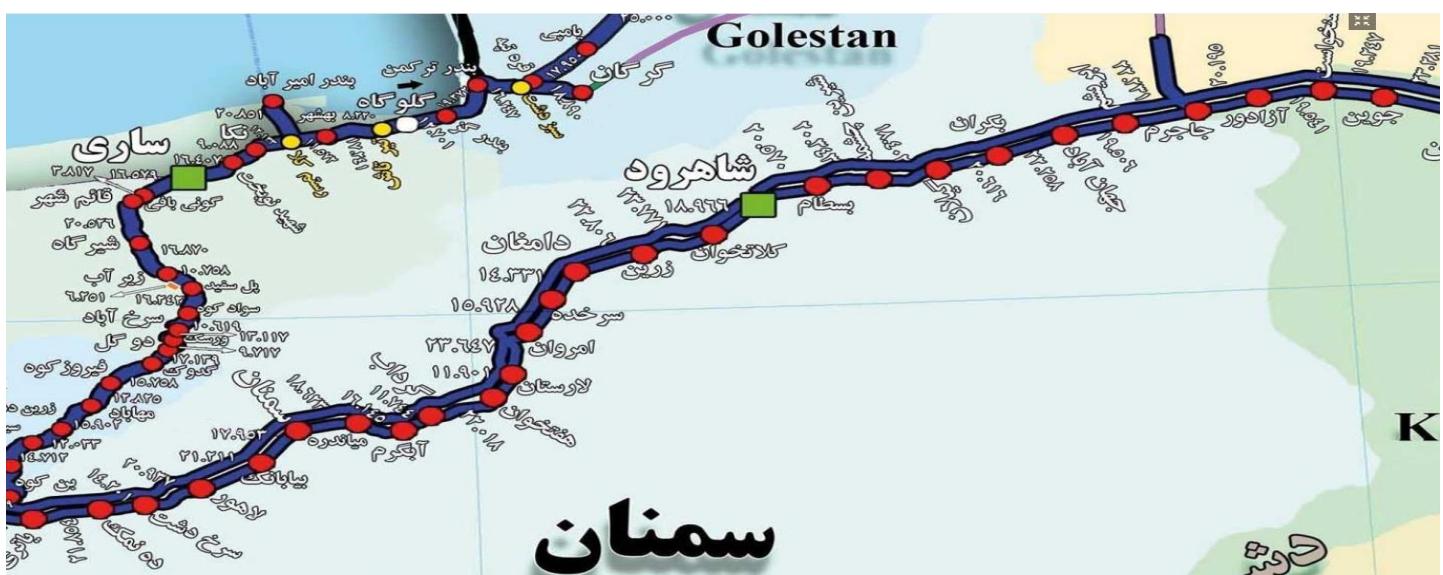
جدول (۴-۲) ایستگاه‌های موجود در مسیر موردنظر

| ردیف | ایستگاه | ردیف | ایستگاه | ردیف | ایستگاه | ردیف | ایستگاه | ردیف |
|------|---------|------|----------|------|------------|------|--------------|------|
| ۱ | تهران | ۱۴ | سمنان | ۲۷ | شیرین چشمہ | ۴۰ | فردوس | |
| ۲ | ری | ۱۵ | میاندرب | ۲۸ | گیلان | ۴۱ | عطار | |
| ۳ | بهرام | ۱۶ | آبگرم | ۲۹ | بکران | ۴۲ | فولاد خراسان | |
| ۴ | ورامین | ۱۷ | گرداب | ۳۰ | جهان آباد | ۴۳ | نیشابور | |
| ۵ | پیشوای | ۱۸ | هفتخوان | ۳۱ | ابریشم | ۴۴ | خیام | |
| ۶ | ابردز | ۱۹ | لارستان | ۳۲ | جاجرم | ۴۵ | کاشمر | |
| ۷ | کویر | ۲۰ | امروان | ۳۳ | آزادور | ۴۶ | ابومسلم | |
| ۸ | گرمسار | ۲۱ | سرخدہ | ۳۴ | سنخواست | ۴۷ | تربت | |
| ۹ | یاتری | ۲۲ | دامغان | ۳۵ | جوین | ۴۸ | فریمان | |
| ۱۰ | ده نمک | ۲۳ | زرین | ۳۶ | نقاب | ۴۹ | سلام | |
| ۱۱ | سرخدشت | ۲۴ | کلاتخوان | ۳۷ | اسفراین | ۵۰ | مشهد | |
| ۱۲ | lahor | ۲۵ | شهرود | ۳۸ | بیهق | | | |
| ۱۳ | بیابانک | ۲۶ | بسطام | ۳۹ | سبزوار | | | |

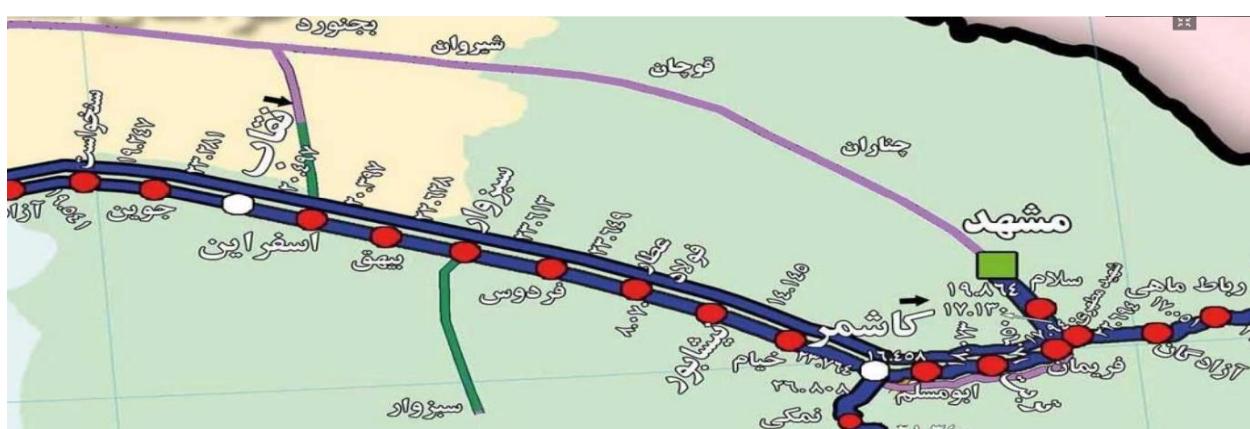
جدول فوق شامل تمامی ایستگاه‌های مسیر تهران - مشهد است که این مسیر خود متشکل از سه محور تهران (شکل ۱-۴)، از ایستگاه تهران تا ایستگاه گرمسار)، محور شمال شرق ۱ (شکل ۲-۴، از ایستگاه یاتری تا ایستگاه جوین) و محور خراسان (شکل ۳-۴، از ایستگاه نقاب تا مشهد) می‌باشد.



شکل (۴-۱) نقشه مسیر تهران - مشهد، محور تهران



شکل (۴-۲) نقشه مسیر تهران - مشهد، محور شمال شرق ۱



شکل (۴-۳) نقشه مسیر تهران - مشهد، محور خراسان

۴-۳-۲- اطلاعات مربوط به زمان حادثه

در بخش قبل اطلاعات جدول زمانی قطارها ارائه شد ولی لازم به ذکر است که برای مساله ما صرفاً این جدول زمانی به تنها بی مورد استفاده قرار نخواهد گرفت بلکه لازم است در زمان بروز حادثه تعیین شود که هر کدام از قطارها در چه بخشی از شبکه قرار دارند و بر اساس موقعیت آنها ورودی های مساله تعیین شود. به همین منظور بایستی زمان و تاریخ رخداد مشخص شود و براساس داده های به دست آمده مبداء و زمان اعزام از مبداء قطارها در جدول زمانی تعیین گردد. همانطور که در بخش ۱-۳ نیز بیان شد برای تعیین مبداء جدید هر قطار ابتدا زمان حادثه شناسایی شده و بعد از آن بررسی شده است که موقعیت هر قطار به چه صورت می باشد که اگر در زمان بروز رخداد قطار در ایستگاه باشد آن استگاه و زمان اعزام قطار از آن ایستگاه به عنوان ایستگاه مبداء و زمان اعزام آن به عنوان زمان اعزام در برنامه زمانبندی جدید در نظر گرفته می شود ولی اگر در هنگام بروز حادثه قطار در سیرگاه باشد اولین ایستگاهیکه به بدان می رسد به عنوان ایستگاه مبداء این قطار و زمان اعزام برنامه ریزی شده ای این قطار در آن ایستگاه به عنوان زمان اعزام از مبداء در جدول زمانی جدید در نظر گرفته می شود.

جدول زیر اطلاعات مربوط به تاخیر برای توقف به دلیل خرابی لکوموتیو را نشان می دهد. این رخداد در تاریخ ۱۳۹۷/۰۹/۰۴ ساعت ۱۲:۰۰ با مداد در سیرگاه امروان برای قطار شماره ۳۴۰ اتفاق افتاده است. یکی از ویژگی های مهم این قطار که از ورودی های مساله ما نیز هست نداشتن مولد برق می باشد. همانطور که در جدول زیر نیز قابل مشاهده است بخش زیادی از تاخیرات مربوط به این رخداد، مربوط به تاخیرات ثانویه می باشد که به دلیل مسدود بودن بلاک مجبور در ایستگاه یا سیرگاه شده اند.

در زمان وقوع حادثه به تعداد ۵ عدد لکوموتیو از نوع زیمنس در ایستگاه های تهران، گرمسار، سمنان، شهرود و نقاب وجود داشتند که این لکوموتیوها به عنوان لکوموتیوهای امدادی در نظر گرفته شده اند.

جدول (۴-۳) : تأخیرات مربوط به خرابی لکوموتیو در ۴ آذر ۹۷ [۷]

| شماره قطار | ایستگاه | عامل خرابی | نوع خرابی | توقف در ایستگاه | توقف در بلک |
|---------------|---------|------------|-------------------------------|-----------------|-------------|
| 340 | امروان | کشش | سرد شدن مبدأ به مبدأ | 0 | 285 |
| 340 | امروان | کشش | خرابی دیزل | 15 | 0 |
| 340 | امروان | کشش | تلقی ناشی از خرابی دیزل | 18 | 0 |
| 346 | امروان | کشش | تلقی ناشی از خرابی دیزل | 23 | 0 |
| 346 | لارستان | کشش | نرسیدن ناشی از خرابی دیزل | 0 | 12 |
| 347 | سرخده | کشش | تلقی ناشی از خرابی دیزل | 39 | 0 |
| 348 | امروان | کشش | تلقی ناشی از خرابی دیزل | 46 | 0 |
| 348 | لارستان | کشش | نرسیدن ناشی از خرابی دیزل | 2 | 0 |
| 354 | امروان | کشش | تلقی ناشی از خرابی دیزل | 42 | 0 |
| 354 | لارستان | کشش | نرسیدن ناشی از خرابی دیزل | 0 | 20 |
| 355 | دامغان | کشش | نرسیدن ناشی از خرابی دیزل | 33 | 0 |
| 357 | سرخده | کشش | تلقی ناشی از خرابی دیزل | 37 | 0 |
| 366 | امروان | کشش | تغییر مسیر ناشی از خرابی دیزل | 18 | 0 |
| 321 | سرخده | کشش | تلقی ناشی از خرابی دیزل | 44 | 0 |
| مجموع تأخیرات | | ۶۳۴ دقیقه | | | |

در خصوص جدول فوق لازم به یادآوری است که در زمان اجرایی قطار ۳۴۰ به واسطه لکوموتیو امداد ابتدا به ایستگاه قبلی خود برگشته است و پس از عملیات لازم دوباره اعزام شده است به همین دلیل سطر اول مربوط به بلک امروان و توقف قطار به دلیل خرابی لکوموتیو است و دیگر تأخیرات این قطار در ایستگاه امروان به دلیل عملیات لازمه و دیگر دلایل همچو توقف برای آزادی بلک، عدم تلاقی و ... می باشد. تأخیرات مربوط به مابقی قطارها همان تأخیرات ثانویه است که در راه آهن کدهای مخصوص خود را دارد.

همانطور که پیش تر ذکر شد در لحظه بروز رخداد برخی از قطارها فعالیت خود را به اتمام رسانیده اند و یا مسیر مختل شده را طی کرده اند که این قطارها در مساله زمانبندی مجدد جز ورودی های مساله به شمار نمی روند. جدول زیر مبداء جدید هر یک از قطارها و زمان اعزامشان از مبداء را نشان میدهد.

جدول (۴-۴) مبدأ جدید و زمان اعزام قطارها در جدول زمانی اولیه

| شماره قطار | مبدأ | شماره قطار | زمان اعزام از مبدأ | مبدأ | زمان اعزام از مبدأ |
|---------------|----------|---------------|-----------------------|---------|-----------------------|
| ۳۱۶ | ابردز | ۹۳۲ | ۰۰:۱۲ | تهران | ۱۷:۱۵ |
| ۳۱۸ | تهران | ۹۵۲ | ۰۹:۲۰ | تهران | ۱۴:۳۵ |
| ۳۲۰ | کلاتخوان | ۹۷۲ | ۰۰:۲۲ | تهران | ۱۸:۱۰ |
| ۳۳۶ | ری | ۹۷۶ | ۰۰:۱۶ | تهران | ۱۹:۲۵ |
| ۳۲۸ | تهران | ۳۱۹ | ۰۰:۳۰ | مشهد | ۰۷:۱۰ |
| ۳۴۰ | | ۳۲۱ | | ابریشم | ۰۰:۱۳ |
| ۳۴۶ | میاندرب | ۳۳۱ | ۰۰:۱۹ | مشهد | ۱۲:۱۵ |
| ۳۴۸ | سمنان | ۳۳۷ | ۰۰:۲۸ | عطار | ۰۰:۱۴ |
| ۳۵۴ | گرمسار | ۳۳۹ | ۰۰:۲۰ | نیشابور | ۰۰:۲۳ |
| ۳۶۶ | هفتخوان | ۳۴۷ | ۰۰:۲۱ | بکران | ۰۰:۱۲ |
| ۳۷۲ | تهران | ۳۴۹ | ۰۷:۰۵ | دامغان | ۰۰:۲۷ |
| ۳۷۴ | تهران | ۳۵۱ | ۰۷:۲۰ | مشهد | ۱۲:۵۵ |
| ۹۱۶ | تهران | ۳۵۵ | ۰۴:۰۰ | بسطام | ۰۰:۱۳ |
| ۹۱۸ | تهران | ۳۶۷ | ۰۴:۵۵ | امروان | ۰۰:۲۰ |
| ۹۲۰ | تهران | ۳۷۳ | ۰۸:۳۰ | مشهد | ۰۵:۲۰ |
| ۹۲۲ | تهران | ۳۷۵ | ۱۰:۳۰ | مشهد | ۰۶:۰۰ |
| ۹۲۶ | تهران | ۹۷۱ | ۱۶:۲۵ | مشهد | ۱۴:۰۵ |
| ۹۳۰ | تهران | | ۰۶:۱۵ | | |

۳-۴- خروجی‌های حل مدل

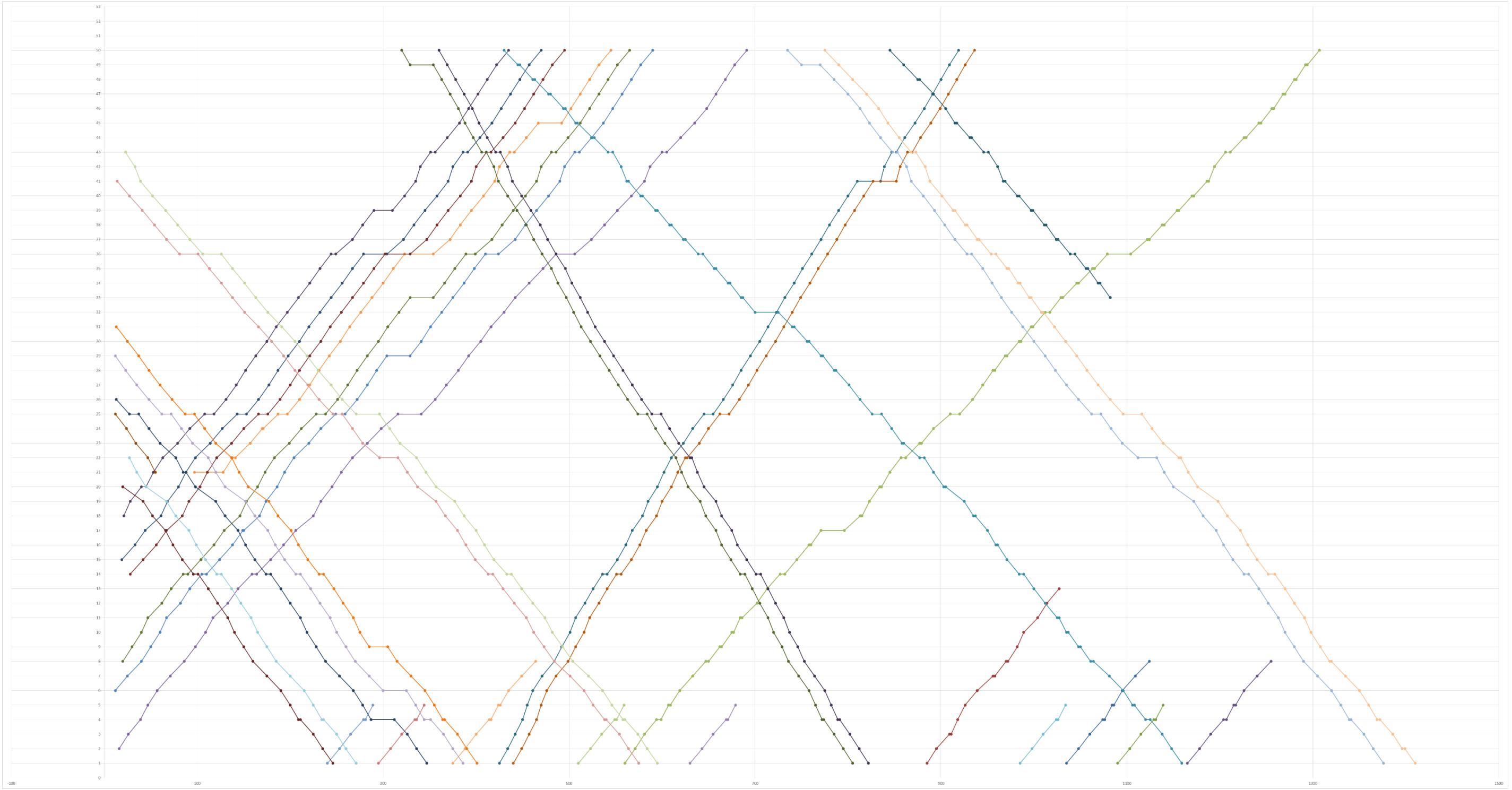
مدل توسعه داده شده در نرم‌افزار گمز ویرایش ۲۴,۱,۲ مدل‌نویسی شده و با استفاده از اطلاعات ورودی أخذ شده حل گشته که برنامه‌ی زمانی حرکت قطارها در مدت زمان ۲۴ ساعت به روز رسانی کرده است. یکی از فاکتورهای بسیار مهم در حل مساله زمانبندی مجدد زمان حل مساله است که خوشبختانه مدل توانسته است در زمان قابل توجه‌ای نتایج خوبی را برای مساله ما به ابعاد 50×50 تعداد سطرهای ماتریس مدل یا همان محدودیتها می‌باشد و 29793 نیز تعداد متغیرهای مساله را نشان می‌دهد) به همراه داشته باشد که در بخش بعد جزئیات ذکر خواهد شد.

۱-۳-۴- تابع هدف

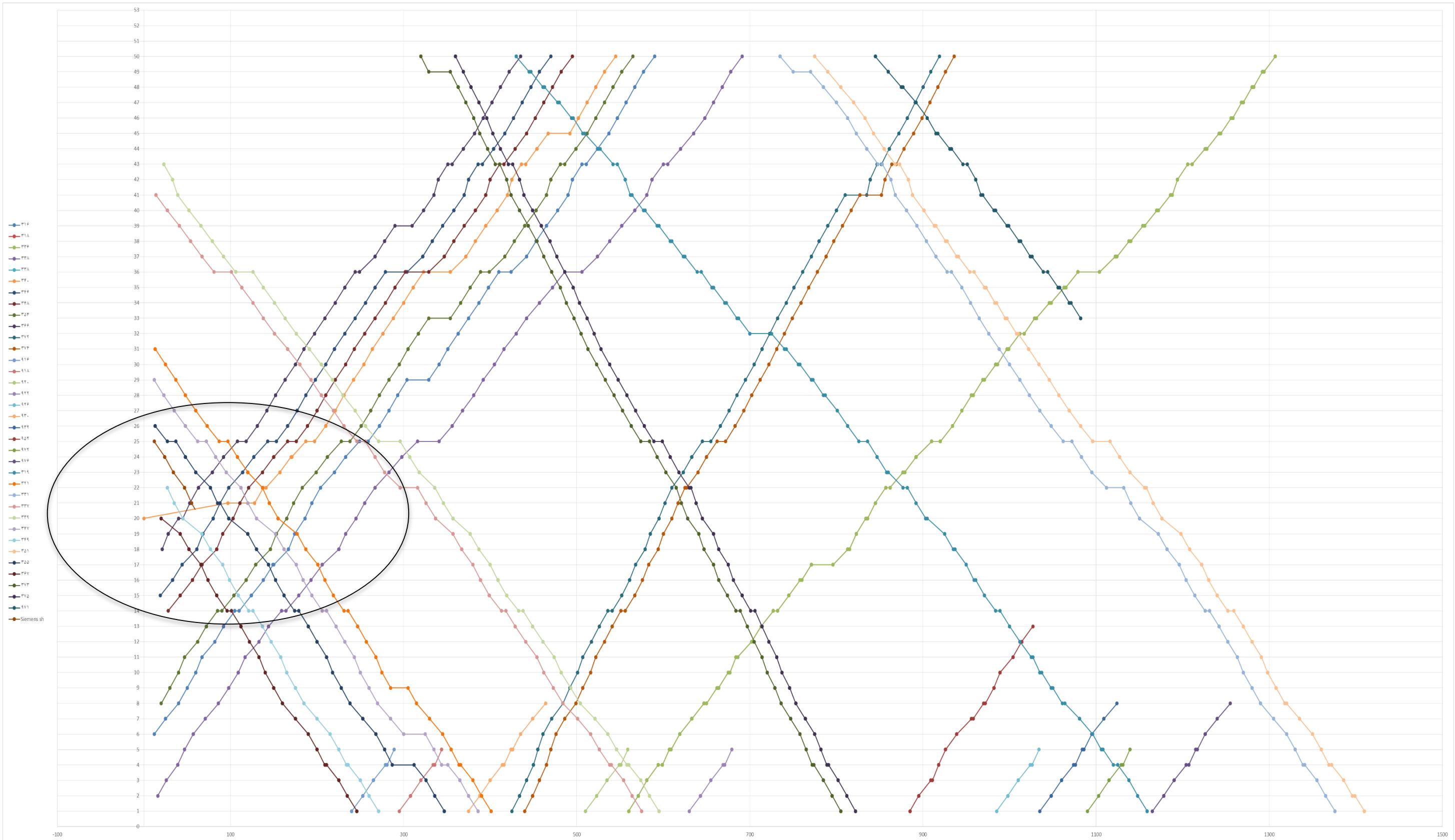
مجموع تاخیرات تابع هدف در مدل ارائه شده برابر با 169 دقیقه می‌باشد و این نشان می‌دهد که در خصوص این اختلال که در زمان اجرایی 634 دقیقه تاخیر به قطارها تحمیل شده است، مدل قادر به کاهش تاخیرات به میزان 465 دقیقه بوده است. لازم به ذکر است که در این مساله تاخیرات ثانویه با توجه به استراتژی به کار گرفته شده به میزان قابل توجهی کاهش یافته است که در بخش‌های بعدی این موضوع بیشتر بررسی خواهد شد.

۲-۳-۴- گراف حرکت قطارها

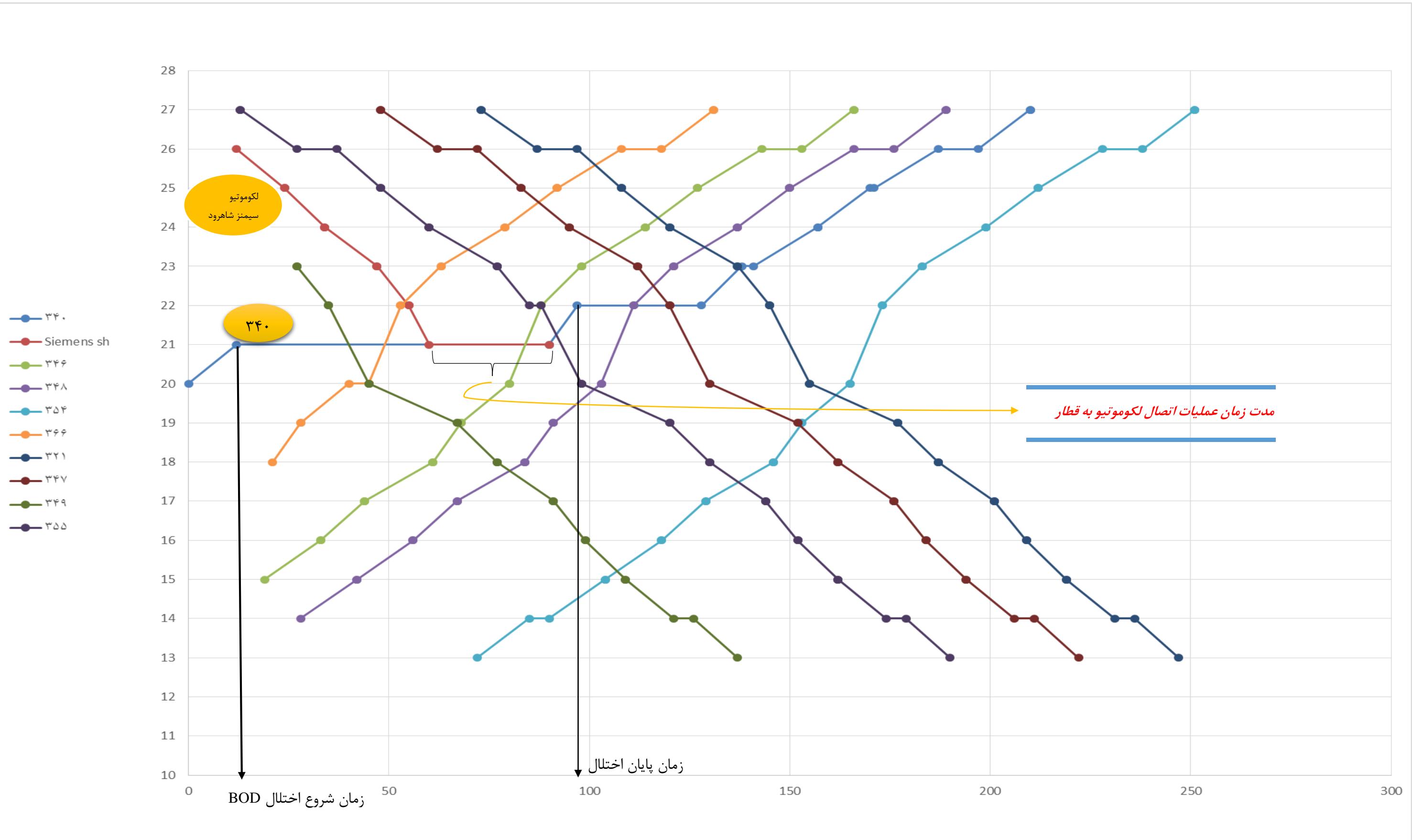
در ادامه نمودار حرکت قطارها در جدول زمانبندی مجدد ارائه می‌شود که نمودار اول (شکل ۳-۴) زمان‌های اعزام و رسیدن قطارها در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. نمودار دوم (شکل ۳-۴) حرکت تمامی قطارها با در نظر گرفتن بازه زمانی اختلال می‌باشد که برای بررسی بیشتر بازه زمانی اختلال می‌توان جزئیات را در شکل ۳-۴ مشاهده کرد، که در این نمودار قطار شماره 340 ، قطار مختل شده می‌باشد و با توجه به استراتژی پذیرش تاخیر و تغییر ترتیب حرکت قطارها، زمان اعزام این قطار بعد از سه قطار دیگریست که در جدول زمانبندی اولیه این سه قطار بعد از این قطار شماره 340 اعزام می‌شوند و همین امر موجب کاهش تاخیرات ثانویه به میزان قابل توجهی شده است.



شکل (۴-۲) نمودار حرکت قطعه‌ها در جدول زمانی جدید



شکل (ع-۳) نمودار حرکت قطعه‌ها با جزئیات زمان اختلال



شکل (۴-۴) نمودار حرکت قطارها در بازه زمانی اختلال

۴-۳-۳- بررسی تاخیرات

تاخیرات در این دسته از مسائل به دو دسته تقسیم میشوند، تاخیرات اولیه و تاخیرات ثانویه که این موضوع قبلًا نیز توضیح داده شده است. در این مثال عددی تاخیراتی که به قطار شماره ۳۴۰ یا همان قطار مختل شده اعمال می شود جزو تاخیرات اولیه و تاخیری که مابقی قطارها متحمل میشوند جزو تاخیرات ثانویه می باشد.

جدول زیر زمان رسیدن به مقصد نهایی برای قطارها هم در جدول زمانی اولیه و هم در جدول زمانبندی جدید نشان می دهد در این جدول قابل مشاهده است که هر قطار به چه میزان از برنامه اولیه خود انحراف داشته است. با مقایسه جدول زیر و جدول ۴-۳ به خوبی مشخص است که تاخیرات ثانویه برای قطارها به چه میزان کاهش یافته است.

جدول (۴-۵) انحراف از جدول زمانی اولیه

| انحراف از برنامه اولیه | زمان رسیدن به مقصد در زمانبندی جدید | زمان رسیدن به مقصد در برنامه اولیه | شماره قطار برنامه اولیه | انحراف از برنامه اولیه | زمان رسیدن به مقصد در زمانبندی جدید | زمان رسیدن به مقصد در برنامه اولیه | شماره قطار |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------|
| 0 | 1124 | 1124 | 932 | 5 | 585 | 590 | 316 |
| 0 | 1027 | 1027 | 952 | 0 | 1307 | 1307 | 318 |
| 0 | 1139 | 1139 | 972 | 0 | 691 | 691 | 336 |
| 0 | 1255 | 1255 | 976 | 0 | 721 | 721 | 338 |
| 1 | 1158 | 1159 | 319 | 153 | 392 | 545 | 340 |
| 0 | 401 | 401 | 321 | 0 | 470 | 470 | 346 |
| 0 | 1376 | 1376 | 331 | 2 | 493 | 495 | 348 |
| 0 | 575 | 575 | 337 | 0 | 565 | 565 | 354 |
| 0 | 595 | 595 | 339 | 5 | 430 | 435 | 366 |
| 0 | 386 | 386 | 347 | 0 | 919 | 919 | 372 |
| 0 | 271 | 271 | 349 | 0 | 936 | 936 | 374 |
| 0 | 1410 | 1410 | 351 | 0 | 289 | 289 | 916 |
| 3 | 344 | 347 | 355 | 0 | 344 | 344 | 918 |
| 0 | 246 | 246 | 367 | 0 | 559 | 559 | 920 |
| 0 | 805 | 805 | 373 | 0 | 679 | 679 | 922 |
| 0 | 822 | 822 | 375 | 0 | 1034 | 1034 | 926 |
| 0 | 1082 | 1082 | 971 | 0 | 464 | 464 | 930 |

جدول (۴-۷) زمان اعزام قطارهای رفت از هر ایستگاه (بر حسب دقیقه)

جدول (۷-۴) زمان اعزام قطارهای برگشت از هر ایستگاه (بر حسب دقیقه)

جدول (۴-۱) زمان رسیدن قطارهای رفت به ایستگاه (بر حسب دقیقه)

جدول (ع-۹) زمان رسیدن قطارهای برگشت به ایستگاه (بر حسب دقیقه)



فصل پنجم

جمع‌بندی و پیشنهادات

۱-۵- جمع‌بندی

در این پروژه که با عنوان زمانبندی مجدد حرکت قطارها انجام شد، هدف توسعه‌ی مدلی ریاضی جهت زمانبندی مجدد حرکت قطارها در بخش مسافری بوده است به طوری که هم کمترین میزان تأخیرات و انحراف از جدول زمانبندی اولیه وجود آید چرا که کاهش تاخیرات علاوه بر افزایش ظرفیت، رضایت مسافران را که یکی از مهم ترین فاکتورهای هر سیستم از جمله راهآهن می‌باشد، به همراه دارد. در این گزارش ابتدا مقدمه‌ای شامل تعریف مسئله، اهمیت مسئله، هدف پژوهش و روش و مراحل انجام آن ذکر گردید، مفاهیم پایه‌ای از جمله سلسله مراتب برنامه‌ریزی در راهآهن، تعاریف مربوط به زمانبندی و زمانبندی مجدد حرکت قطار، اصطلاحات مربوط به حمل و نقل ریلی، محدودیت‌های مسئله‌ی زمانبندی مجدد حرکت قطارها ارائه شد.

با توجه به گسترده بودن مسئله‌ی زمانبندی مجدد حرکت قطارها و کارهای علمی فراوانی که در این زمینه انجام گرفته، در بررسی ادبیات موضوع سعی شد که تحقیقات علمی را که بیشترین همخوانی با مساله ما دارد بررسی شود.

در فصل بعدی که با عنوان روش تحقیق ارائه گردید محدودیت‌های موردنیاز مسئله‌ی موردنظر بررسی و تعیین شدند، مدل توسعه داده شده به صورت کامل همراه با ارائه‌ی علائم و نشانه‌گذاری و متغیرها ارائه شد، محدودیت‌های آن و نحوه اعمال آن‌ها به طور کامل شرح داده شد و سپس به بررسی و ارائه‌ی نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن در ایران پرداخته شد. برای این منظور تعداد ۶۴ قطار در مسیر ریلی تهران تا مشهد که دارای ۵۰ ایستگاه می‌باشد مجدداً زمانبندی شدند. ورودی‌های برنامه و خروجی‌های آن به طور کامل ارائه شد و گراف‌های حرکت قطار ارائه گردید، همچنین برنامه‌ی زمانی حرکت قطارها نیز به صورت جدول ارائه شد تا بتوان درک بهتری از کارایی مدل داشت.

انجام زمانبندی مجدد حرکت قطارها با در نظر گرفتن محدودیت لکوموتیو و شرایط بررسی شده تا به حال بدین صورت انجام نشده و روند فعلی به این گونه است که مامورین اعزام بر اساس تجربه شخصی خود تصمیم به تغییر اولویت و تخصیص لکوموتیو می‌گیرند که جواب بهینه در این شرایط و حجم ترافیک شبکه به دست نخواهد آمد، این موضوع در مثال عددی که از راه آهن جمهوری اسلامی ایران اخذ شده بود نیز قابل تایید می‌باشد. ویژگی دیگری که مدل ارائه شده در مقایسه با پژوهش‌های پیشین دارد در نظر گرفتن نوع خاصی از اختلال است که با بررسی‌های انجام شده بیش از ۴۰٪ از تاخیرات موجود در محور تهران – مشهد مربوط به این امر است.

۲-۵- پیشنهادات

جهت انجام پژوهش‌ها و مطالعات آتی، پیشنهادات ذیل مطرح می‌گردد:

۱. مطالعه انجام شده در این پژوهش ارائه مدل ریاضی با استراتژی سبقت فقط برای قطارهای هم‌جهت با قطار مختل شده در محور دو خطه بوده است و این در حالیست که بیشترین بخش شبکه ریلی کشور ما را محورهای تک خطه تشکیل می‌دهد پس یکی از توسعه‌های کاربردی این مساله می‌تواند توسعه مدل برای محور تک خطه با در نظر گرفتن دیگر استراتژی‌ها همچون لغو، تغییر مسیر و ... باشد.
۲. یکی از محدودیت‌های مساله زمانبندی حرکت قطار در کشور ما ادای فریضه نماز است، به منظور کاربردی تر شدن مدل ارائه شده در نظر گرفتن این محدودیت می‌تواند نتایج مناسب‌تری را ارائه کند.
۳. از فرض‌های مساله انجام شده زمان اعزام لکوموتیو از ایستگاه اولیه خود است که بعد از زمان اختلال لکوموتیو می‌تواند بالاگسله اعزام شود و همچنین دیگر پارامترهای استفاده شده در این مدل به صورت قطعی می‌باشد و این در حالیست که در شرایط واقعی الزاماً زمان تعیین شده اتفاق نخواهد افتاد پس برای افزایش استواری مدل یکی از پژوهش‌های مفید و موثر در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت برای پارامترهای مدل به خصوص زمان اعزام لکوموتیو می‌باشد.
۴. بعد از اتصال لکوموتیو به قطار مختل شده جهت حرکت قطار با نحوه اتصال لکوموتیو به آن با اهمیت خاصی همراه است که اگر این دو یکسان نباشد لازم است که در ایستگاه‌هایی که قابلیت دور برای لکوموتیو وجود دارد این جهت اصلاح شود که در اصطلاح خود راه‌آهن این ایستگاه‌ها را ایستگاه مثلثی می‌نامند. در نظر گرفتن این محدودیت در این مساله می‌تواند شرایط را به واقعیت امر نزدیکتر کند.
۵. از دیگر ویژگی‌های شبکه ریلی کشور ما مشترک بودن خطوط ریلی مسافری با باری است، در نظر گرفتن قطارهای باری به همراه قطارهای مسافری و در نظر گرفتن ضریب اهمیت هر قطار می‌تواند به اجرائی تر شدن مدل کمک کند.
۶. همانطور که در بخش تعریف مساله نیز بررسی شد خرابی لکوموتیو یکی از بیشترین عوامل ایجاد تاخیر در شبکه ریلی کشور ما است و همچنین یکی از مهم ترین فاکتورهایی که بایستی در مبحث زمانبندی مجدد به آن توجه کرد زمان حل مدل است. یکی از توسعه‌های مهم و کاربردی ارائه‌ی روشن حل با در نظر گرفتن دیگر توسعه‌های مذکور برای مطالعات آتی است.

۷. در حال حاضر در هنگام بروز حادثه در محورهای مختلف شبکه ریلی کشور برنامه مدون و جامعی جهت تعیین نحوه ادامه حرکت قطارهای مختلف مسافری و باری وجود ندارد پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج پژوهش حاضر و پینهادات ارائه شده برای مطالعه آتی، یک سیستم جامع پشتیبان تصمیم به منظور زمانبندی مجدد حرکت قطارهای باری و مسافری در شبکه ریلی ایران طراحی گردد.

منابع

- [۱] V. Cacchiani *et al.*, "An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 63, pp. 15-37, 2014.
- [۲] J. Rodriguez, "A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 41, no. 2, pp. 231-245, 2007.
- [۳] M. P. Aghaei, "Train Scheduling in Single Track Railway Networks," PhD Thesis, Tarbiat Modares University, 1998.
- [۴] K. Hara, K. Kumazawa, and T. Koseki, "Efficient algorithm for evaluating and optimizing train reschedules by taking advantage of flexibility of quadruple track," in *The Third International Conference on Railway Traction Systems (RTS2007)*, 2007, pp. 91-97.
- [۵] R. Acuna-Agost, M. Boudia, N. Jozefowicz, C. Mancel, and F. A. C. Mora-Camino, "Passenger improver-A second phase method for integrated aircraft passenger recovery systems," in *TRISTAN VII 2010, 7th TRIennal Symposium on Transportation ANalysis*, 2010, pp. pp 1-4.
- [۶] I. Şahin", Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 33, no. 7, pp. 511-534, // 1999.
- [۷] "اطلاعات زمانبندی حرکت قطارها", اداره سیر و حرکت، راه آهن جمهوری اسلامی ایران, ۱۳۹۷
- [۸] M. Tammannaei, "Train Rescheduling in Disturbance," PhD Thesis, Tarbiat Modares University, 2015.
- [۹] M. K. Sameni, "Train Scheduling in Double Track Lines," MSc, School of Engineering, Tarbiat Modares, 2008.
- [۱۰] A. A. Assad, "Models for Rail Transportation," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 14, pp. 205-220, 1980.
- [۱۱] K. R. Baker, *Introduction to sequencing and scheduling*. John Wiley & Sons, 1974.
- [۱۲] A. Ahmadpor, "Modeling and Solving Railway Transportation Problems Using Job Shop Scheduling Problem," MSc, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, 2014.
- [۱۳] مقررات عمومی سیر و حرکت, ۱۳۹۱
- [۱۴] A. D'ariano, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, "A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network," *European Journal of Operational Research*, vol. 183, no. 2, pp. 643-657, 2007.
- [۱۵] م. ی. ج. لسان, برنامه‌ریزی عملیات حمل و نقل ریلی. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران, ۱۳۸۹
- [۱۶] S. Shiri, "A Model for Train Rescheduling," MSc thesis, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran, 2008.

- [¹⁷] Y. Cheng, "Hybrid simulation for resolving resource conflicts in train traffic rescheduling," *Computers in Industry*, vol. 35, no. 3, pp. 233-246, // 1998.
- [¹⁸] R. L. Burdett and E. Kozan, "A disjunctive graph model and framework for constructing new train schedules," *European Journal of Operational Research*, vol. 200, no. 1, pp. 85-98, 2010.
- [¹⁹] S.-C. Chang and Y.-C. Chung, "From timetabling to train regulation—a new train operation model," *Information and Software Technology*, vol. 47, no. 9, pp. 575-585, 2005.
- [²⁰] J. Tornquist and J. A. Persson, "Train traffic deviation handling using tabu search and simulated annealing," in *Proceedings of the 38th annual Hawaii international conference on system sciences*, 2005, pp. 73a-73a: IEEE.
- [²¹] C. Chiu, C. Chou, J. H.-M. Lee, H.-f. Leung, and Y. Leung, "A constraint-based interactive train rescheduling tool," *Constraints*, vol. 7, no. 2, pp. 167-198, 2002.
- [²²] L. Gély, G. Dessagne, and C. Lérin, "Modelling train re-scheduling with optimization and operational research techniques: results and applications at SNCF," in *World Congress on Railway Research*, 2006.
- [²³] J. Törnquist and J. A. Persson, "N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 41, no. 3, pp. 342-362, 2007.
- [²⁴] J. Törnquist Krasemann, "Design of an effective algorithm for fast response to the re-scheduling of railway traffic during disturbances," *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 62-78, 2012.
- [²⁵] M. Lüthi, G. Medeossi, and A. Nash, "Evaluation of an integrated real-time rescheduling and train control system for heavily used areas," in *International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (IAROR) 2007 Conference, Hannover, Germany*, 2007.
- [²⁶] A. Schöbel, "Integer programming approaches for solving the delay management problem," in *Algorithmic methods for railway optimization* : Springer, 2007, pp. 145-170.
- [²⁷] A. D'Ariano, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, "Assessment of flexible timetables in real-time traffic management of a railway bottleneck," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 16, no. 2, pp. 232-245. ²⁰⁰⁸,
- [²⁸] A. Schaafsma and M. Bartholomeus, "Dynamic traffic management in the Schiphol bottleneck," in *Proceedings Second International Seminar on Railway Operations Research*, 2007.
- [²⁹] H. Shimizu, H. Tanabe, and M. Yamamoto, "The proposal system for Shinkansen using constraint programming," in *Proceedings of the 8th World Congress of Railway Research*, 2008.
- [³⁰] C. Mannino and A. Mascis, "Optimal real-time traffic control in metro stations," *Operations Research*, vol. 57, no. 4, pp. 1026-1039, 2009.

- [^{۳۱}] A. Schöbel, "Capacity constraints in delay management," *Public Transport*, vol. 1, no. 2, pp. 135-154, 2009.
- [^{۳۲}] M. Schachtebeck and A. Schöbel, "To wait or not to wait—and who goes first? Delay management with priority decisions," *Transportation Science*, vol. 44, no. 3, pp. 307-321, 2010.
- [^{۳۳}] V. Cacchiani, A. Caprara, and P. Toth, "Scheduling extra freight trains on railway networks," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 44, no. 2, pp. 215-231, 2010.
- [^{۳۴}] C. Manino, "Real-time traffic control in railway systems," in *OASIcs-OpenAccess Series in Informatics*, 2011, vol. 20: Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- [^{۳۵}] L. C. Lamorgese and C. Mannino, "An exact decomposition approach for the real-time train dispatching problem ",*SINTEF Rapport*, 2012.
- [^{۳۶}] L. Lamorgese and C. Mannino, "The track formulation for the train dispatching problem," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 41, pp. 559-566, 2013.
- [^{۳۷}] R. Acuna - Agost, P. Michelon, D. Feillet, and S. Gueye, "A MIP - based local search method for the railway rescheduling problem," *Networks*, vol. 57, no. 1, pp. 69-86, 2011.
- [^{۳۸}] L. Meng and X. Zhou, "Robust single-track train dispatching model under a dynamic and stochastic environment: a scenario-based rolling horizon solution approach," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 7, pp. 1080-1102, 2011.
- [^{۳۹}] R. Acuna-Agost, P. Michelon, D. Feillet, and S. Gueye, "SAPI: Statistical Analysis of Propagation of Incidents. A new approach for rescheduling trains after disruptions," *European Journal of Operational Research*, vol. 215, no. 1, pp. 227-243, 2011.
- [^{۴۰}] Y.-H. Min, M.-J. Park, S.-P. Hong, and S.-H. Hong, "An appraisal of a column-generation-based algorithm for centralized train-conflict resolution on a metropolitan railway network," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 2, pp. 409-429, 2011.
- [^{۴۱}] F. Corman, A. D'Ariano, I. A. Hansen, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, "Dispatching trains during seriously disrupted traffic situations," in *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 323-328: IEEE.
- [^{۴۲}] T. NAKAMURA, "A practical train rescheduling algorithm using three predetermined factors," in *Proc. the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RailRome2011), Rome, Italy*, 2011.
- [^{۴۳}] E. J. Abbink, L. Albino, T. Dollevoet, D. Huisman, J. Roussado, and R. L. Saldanha, "Solving large scale crew scheduling problems in practice," *Public Transport*, vol. 3, no. 2 ,pp. 149-164, 2011.
- [^{۴۴}] F. Corman, A. D'Ariano, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, "Bi-objective conflict detection and resolution in railway traffic management,"

Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 79-94, 2012.

- [⁵⁰] M .Boccia, C. Mannino, and I. Vasilyev, "The dispatching problem on multitrack territories: Heuristic approaches based on mixed integer linear programming," *Networks*, vol. 62, no. 4, pp. 315-326, 2013.
- [⁵¹] A. R. Albrecht, D. M. Panton, and D. H. Lee, "Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using problem space search," *Computers & Operations Research*, vol. 40, no. 3, pp. 703-712, 2013.
- [⁵²] P. Pellegrini, G. Marlière, and J. Rodriguez, "Real time railway traffic management modeling track-circuits," in *ATOMOS 2012, 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, 2012, p. 12p.
- [⁵³] S. Dündar and İ. Şahin, "Train re-scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 27, pp. 1-15, 2013.
- [⁵⁴] I. Louwerse and D. Huisman, "Adjusting a railway timetable in case of partial or complete blockades," *European Journal of Operational Research*, vol. 235, no. , pp. 583-593, 2014.
- [⁵⁵] L. P. Veelenturf, M. P. Kidd, V. Cacchiani, L. G. Kroon, and P. Toth, "A railway timetable rescheduling approach for handling large-scale disruptions," *Transportation Science*, vol. 50, no. 3, pp. 841-862, 2015.
- [⁵⁶] L. Chen, C .Roberts, F. Schmid, and E. Stewart, "Modeling and solving real-time train rescheduling problems in railway bottleneck sections," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 1896-1904, 2015.
- [⁵⁷] L. Kang, J. Wu, H. Sun, X .Zhu, and B. Wang, "A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks," *Omega*, vol. 50, pp. 29-42, 2015.
- [⁵⁸] A. Toletti, V. De Martinis, and U. Weidmann, "What about train length and energy efficiency of freight trains in rescheduling models?," *Transportation Research Procedia*, vol. 10, pp. 584-594, 2015.
- [⁵⁹] S. Van Thielen, S. Burggraeve, and P. Vansteenwegen, "Optimal train rescheduling after conflict detection," in *Conference on Advanced Systems in Public Transport. Rotterdam*, 2015, pp. 19-23.
- [⁶⁰] S. Narayanaswami and N. Rangaraj, "A MAS architecture for dynamic, realtime rescheduling and learning applied to railway transportation," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 5, pp. 2638-2656, 2015.
- [⁶¹] S. Mladenović, "Heuristic approach to train rescheduling," *Yugoslav Journal of Operations Research*, vol. 17, no. 1, 2016.
- [⁶²] S. Mladenovic, S. Veskovic, I. Branovic, S. Jankovic, and S. Acimovic, "Heuristic Based Real - Time Train Rescheduling System ",*Networks*, vol. 67, no. 1, pp. 32-48, 2016.

- [^{۸۸}] A. Toletti and U. Weidmann, "Modelling customer inconvenience in train rescheduling," in *16th Swiss transport research conference (STRC)*, 2016, p. 270.
- [^{۸۹}] J. Yin, T. Tang, L. Yang, Z. Gao, and B. Ran" ,Energy-efficient metro train rescheduling with uncertain time-variant passenger demands: An approximate dynamic programming approach," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 91, pp. 178-210, 2016.
- [^{۹۰}] S. Binder, Y. Maknoon, and M. Bierlaire" ,Efficient exploration of the multiple objectives of the railway timetable rescheduling problem," in *17th swiss Transport Research Conference*, 2016.
- [^{۹۱}] N. Ghaemi, R. M. Goverde, and O. Cats, "Railway disruption timetable: Short-turnings in case of complete blockage," in *2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, 2016, pp. 210-218: IEEE.
- [^{۹۲}] D. Šemrov, R. Marsetič, M. Žura, L. Todorovski, and A. Srdic, "Reinforcement learning approach for train rescheduling on a single-track railway," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 86, pp. 250-267, 2016.
- [^{۹۳}] M. Tamannaei, M. Saffarzadeh, A. Jamili, and S. Seyedabrihami, "A novel train rescheduling approach in double-track railways: optimization model and solution method based on simulated annealing algorithm," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 139-150, 2016.
- [^{۹۴}] G. Cavone, M. Dotoli, N. Epicoco, and C. Seatzu, "A decision making procedure for robust train rescheduling based on mixed integer linear programming and Data Envelopment Analysis," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 52, pp. 255-273, 2017.
- [^{۹۵}] R. M. Lusby, J. T. Haahr, J. Larsen, and D. Pisinger, "A Branch-and-Price algorithm for railway rolling stock rescheduling," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 99, pp. 228-250, 2017.
- [^{۹۶}] J. C. Wagenaar, L. G. Kroon, and M. J. T. S. Schmidt, "Maintenance appointments in railway rolling stock rescheduling," *Transportation Science*, vol. 51, no. 4, pp. 1138-1160.
- [^{۹۷}] M. Shakibayifar, A. Sheikholeslami, F. Corman, and E. Hassannayebi, "An integrated rescheduling model for minimizing train delays in the case of line blockage," *Operational Research*, pp. 1-29, 2017.
- [^{۹۸}] T. Dollevoet, D. Huisman, L. G. Kroon, L .P. Veelenturf, and J. C. Wagenaar, "Application of an iterative framework for real-time railway rescheduling," *Computers & Operations Research*, vol. 78, pp. 203-217, 2017.
- [^{۹۹}] M. Fischetti and M. Monaci, "Using a general-purpose mixed-integer linear programming solver for the practical solution of real-time train rescheduling," *European Journal of Operational Research*, vol. 263, no. 1, pp. 258-264, 2017.

- [^V_•] B. Davydov, V. Chebotarev, and K. Kablukova, "Stochastic model for the real-time train rescheduling," *International Journal of Transport Development and Integration*, vol. 1, no. 3, pp. 307-317, 2017.
- [^V₁] F. A. Ortega, J. A. Mesa, M. A. Pozo, and J. Puerto, "Railway traffic disturbance management by means of control strategies applied to operations in the transit system," *International Journal of Transport Development and Integration*, vol. 2, no. 4, pp. 362-372, 2018.
- [^V₂] F. Donzella, M. del Cacho Estil-les, C. Bersani, R. Sacile, and L. Zero, "Train scheduling and rescheduling model based on customer satisfaction. Application to Genoa railway network," in *2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, 2018, pp. 593-600: IEEE.
- [^V₃] S. P. Josyula, J. T. Krasemann, and L. Lundberg, "A parallel algorithm for train rescheduling ",*Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 95, pp. 545-569, 2018.
- [^V₄] N. Ghaemi, A. A. Zilko, F. Yan, O. Cats, D. Kurowicka, and R. M. Goverde, "Impact of railway disruption predictions and rescheduling on passenger delays," *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2018.
- [^V₅] S. Hao, R. Song, S. He, and Z. Lan, "Train Regulation Combined with Passenger Control Model Based on Approximate Dynamic Programming," *Symmetry*, vol. 11, no. 3, p. 303, 2019.
- [^V₆] Z. Hou, H. Dong, S. Gao, G .Nicholson, L. Chen, and C. Roberts, "Energy-Saving Metro Train Timetable Rescheduling Model Considering ATO Profiles and Dynamic Passenger Flow," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019.
- [^V₇] S. Zhan, S. Wong, Q. Peng, and S. Lo" ,Train stop deployment planning in the case of complete blockage: An integer linear programming model," *Journal of Transportation Safety & Security*, pp. 1-27, 2019.
- [^V₈] Y. Zhu and R. M. Goverde, "Railway timetable rescheduling with flexible stopping and flexible short-turning during disruptions," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 123, pp. 149-181, 2019.