



دانشکده مهندسی صنایع

پروژه‌ی درس برنامه ریزی خطی پیشرفته

موضوع پروژه:

مدلسازی و حل مسالهی برنامه ریزی حرکت قطارها در شرایط عدم قطعیت

دانشجویان:

شیم مرادی مدیریان ۹۴۶۳۳۱۱۷

استاد مربوطه:

دکتر آرسین جبارزاده

زمنان ۹۵

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۸
فصل ۱: مقدمه	۱۰
۱-۱- مقدمه	۱۱
۲-۱- تعریف مسئله	۱۲
۳-۱- اهمیت مسئله	۱۵
۴-۱- مراحل انجام تحقیق	۱۶
فصل ۲: مسئله زمان بندی حرکت قطارها و مروری بر ادبیات موضوع	۱۷
۱-۲- مقدمه	۱۸
۲-۲- سلسله مراتب برنامه ریزی در راه آهن	۱۸
۳-۲- کلیات زمان بندی	۱۹
۱-۳-۲- کلیات زمان بندی حرکت قطارها	۲۰
۲-۳-۲- اطلاعات مورد نیاز برای زمان بندی حرکت قطارها	۲۲
۴-۲-۱- گراف قطارها	۲۵
۵-۲- مقدمه ای بر برنامه ریزی احتمالی	۲۷
۶-۲- اهمیت برنامه ریزی احتمالی	۲۹
۱-۶-۲- اهمیت مسائل برنامه ریزی احتمالی در حمل و نقل	۳۰

۳۱.....	۷-۲- مدل های برنامه ریزی احتمالی
۳۲.....	۷-۲-۱- مدل های ریکورس
۳۴.....	۷-۲-۲- مدل محدودیت های تصادفی
۳۵.....	۷-۲-۸- مروری بر ادبیات زمان بندی احتمالی حرکت قطارها
۴۳.....	۷-۲-۸-۱- دسته بندی منابع
۴۶.....	فصل ۳: مدل ریاضی مسئله و حل مدل های موجود و بررسی نتایج
۴۷.....	۳-۱- مقدمه ای بر مدل ریاضی مسئله
۴۸.....	۳-۵-۳- مدل کلی مساله برنامه ریزی حرکت قطارها
۴۸.....	۳-۵-۱- کلیات مدل
۴۹.....	۳-۵-۲- مفروضات مدل
۵۰.....	۳-۶-۳- مدل مرحله ی اول
۵۰.....	۳-۶-۱- پارامترها
۵۰.....	۳-۶-۲- متغیرهای تصمیم
۵۲.....	۳-۶-۳- تابع هدف مدل قطعی
۵۲.....	۳-۶-۴- محدودیتهای مدل قطعی
۵۴.....	۳-۷-۳- مدل مرحله ی دوم
۵۵.....	۳-۷-۳- تابع هدف مرحله دوم

۵۶.....	۳-۷-۴- محدودیت های مرحله دوم
۵۸.....	۳-۸- اطلاعات مسالهی موردی
۵۸.....	۳-۹- حل مدل
۵۹.....	۳-۹-۱- گام اول: حل مدل زمانبندی به صورت قطعی
۵۹.....	۳-۹-۲- گام دوم: حل مدل احتمالی با مقادیر ثابت زمانهای برنامه ریزی شده
۵۹.....	۳-۹-۳- گام سوم: حل مدل احتمالی به صورت دو مرحلهای
۶۰.....	۳-۱۰- خروجیها و نتایج
۶۰.....	۳-۱۰-۱- نتایج گام اول
۶۶.....	۳-۱۰-۲- نتایج گام دوم
۶۷.....	۳-۱۰-۳- نتایج گام سوم
۷۷.....	۳-۱۰-۴- مقایسه چهار مدل اجرا شده
۷۹.....	فصل ۴: جمع بندی و پیشنهادها
۸۰.....	۴-۱- مقدمه
۸۱.....	۴-۲- جمع بندی
۸۲.....	۴-۳ نوآوری
۸۲.....	۴-۴ پیشنهادات مطالعات آینده
۸۴.....	مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): نقشه خطوط ریلی موجود و در دست ساخت و مطالعه در شبکه راه آهن ایران ۱۳
- شکل (۲-۱): یک نمونه گراف رسم شده برای ۵ بلاک یک محور دو خطه ۲۶
- نمودار (۲-۱): احتمال تجمعی توزیع های تخمینی و عملی برای زمان ورود یک قطار مشخص در ایستگاه ۳۶
- نمودار (۲-۲): احتمال تجمعی توزیع های تخمینی و عملی برای زمان اعزام یک قطار مشخص ۳۶
- نمودار (۲-۳): میانگین تاخیرات تصادفی رویداده در مسیر تحت سه سناریوی متفاوت ۳۷
- نمودار (۴-۲): میانگین تاخیرات تصادفی در پایان هر سفر برای ۱۰ قطار ۳۸
- نمودار (۲-۵): رابطه میان میانگین تاخیرات مورد انتظار و زمان های مکمل ۴۰
- نمودار (۲-۶): اثرات روش های حل بر روی کیفیت جواب ها ۴۲
- نمودار (۲-۷): زمان محاسباتی الگوریتم های حل ۴۲
- نمودار (۱-۳) مسیر حرکت قطار ها و بلاک ها در مساله ۴۹
- نمودار (۲-۳) نحوه ورود به بلاک ۵۲
- نمودار (۳-۳) : مقایسه تاخیرات اعمال شده به قطارهای شمالی و جنوبی در حالت قطعی ۶۲
- نمودار (۴-۳): مقایسه تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارهای جنوبی و شمالی ۶۳
- نمودار (۵-۳): گراف حرکت قطارها در حالت قطعی ۶۵
- نمودار (۶-۳) مقایسه تاخیرات اعمال شده به قطار ها با ضریب واحد ۶۹
- نمودار (۷-۳) : تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارها در گام سوم با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم ۷۰
- نمودار (۸-۳) : کل تاخیرات اعمال شده به قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم ۷۰
- نمودار (۹-۳): گراف حرکت قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم ۷۱
- نمودار (۱۰-۳) : تاخیرات برنامه ای اعمال شده به قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم ۷۳
- نمودار (۱۱-۳) تاخیرات برنامه ای اعمال شده به قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم ۷۴
- نمودار (۱۲-۳): گراف حرکت قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم ۷۶

فهرست جداول

- جدول (۱-۱): مقایسه حمل و نقل ریلی و جاده‌ای ۱۳
- جدول (۲-۱): حالت‌های مختلف در سرفاصله بین قطارها ۲۵
- جدول (۲-۲): خلاصه مقالات منتشر شده مرتبط با برنامه‌ریزی احتمالی در حمل و نقل ریلی ۴۴
- جدول (۳-۱) پارامترهای مساله ۵۰
- جدول (۳-۲): متغیرهای پیوسته‌ی مدل قطعی (مرحله اول) ۵۱
- جدول (۳-۳) متغیر دودویی مدل قطعی (مرحله اول) ۵۱
- جدول (۴-۳) : پارامترهای مدل احتمالی (مرحله دوم) ۵۴
- جدول (۳-۵) : متغیرهای مدل احتمالی (مرحله دوم) ۵۵
- جدول (۶-۳) : تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارها در حالت قطعی ۶۱
- جدول (۷-۳): مجموع تاخیرات عملیاتی برای دودسته قطار جنوبی و شمالی در حالت قطعی ۶۳
- جدول (۸-۳): زمان سفر برای هر کدام از قطارها در حال قطعی ۶۳
- جدول (۹-۳) تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارها در مدل احتمالی با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم ۶۸
- جدول (۱۰-۳) : تاخیرات برنامه ای قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم ۷۲
- جدول (۱۱-۳) : زمان سفر قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم ۷۵
- جدول (۱۲-۳) : مقایسه‌ی میزان توابع هدف، تاخیرات عملیاتی و برنامه‌ریزی شده و زمان حل برای چهار حالت ۷۷

چکیده

امروزه حمل و نقل ریلی مورد توجه خاص دولت‌ها و مردم می‌باشد. در این میان سیستم‌های حمل و نقل ریلی به مانند هر سیستم دیگری نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و بهینه برای استفاده از حداکثر ظرفیت‌ها و امکانات موجود می‌باشند. در میان برنامه‌هایی که برای عملیات حمل و نقل ریلی انجام می‌شود، برنامه‌ریزی زمان‌بندی حرکت قطارها یکی از مهم‌ترین آن‌ها می‌باشد که بر سایر عملیات‌ها و برنامه‌ها در راه‌آهن تاثیر مستقیم دارد. در ادبیات موضوع و طی سالیان گذشته، پژوهشگران زیادی در این حوزه به مطالعه و بررسی پرداخته‌اند و نتایج حاصل از مطالعات خویش را منتشر نموده‌اند. در این میان در طی سال‌های اخیر و با پیچیده‌تر شدن سیستم‌های ریلی و به وجود آمدن تکنیک‌های برنامه‌ریزی عدم قطعیت، پژوهشگران، بیش‌تر بر روی مدل‌های عدم قطعیت متمرکز شده‌اند. در بین تکنیک‌های عدم قطعیت، برنامه‌ریزی احتمالی، یکی از رویکردهای موجود برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدلسازی ریاضی است. در سال‌های اخیر نیز برخی از پژوهشگران بر روی استفاده از این تکنیک در مسائل زمان‌بندی در حمل و نقل متمرکز شده‌اند. در حقیقت برنامه‌ریزی احتمالی قصد دارد تا با در نظر گرفتن پارامترهای تصادفی و متغیر موجود در مسائل دنیای واقعی، مدلسازی و نتایج حاصل از آن را به واقعیت نزدیک‌تر کند.

در این پژوهش پس از مطالعه‌ی مدل‌های موجود در ادبیات موضوع، مدلی در حوزه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی، متناسب با شرایط و ویژگی‌های راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران ارائه شده است. مدل مورد نظر قصد دارد تا با در نظر گرفتن زمان‌های متغیر سیر بلاک و تخصیص بهینه‌ی زمان‌های مکمل به آن‌ها، تاخیرات حاصل از این نوسانات بین برنامه‌ی زمان‌بندی و آن‌چه را که در عمل انجام می‌گیرد، تا حد ممکن کاهش دهد.

نکته ای که در این پروژه بسیار حائز اهمیت است این است که یکی از بزرگترین اهداف راه آهن رضایت مشتریان است و اگر در طول زمان سیر (بخش مسافری) توقفات بیشتر و بیشتر تر شود این امر از رضایت مسافرین می کاهد لذا در واقعیت آنچه که در دید مشتری تاثیر گذار است تعداد توقفات و زمان هر توقف است تا زمان سیر. لذا در این پروژه این موضوع دنبال می شود که با توجه به شرایط دنیای واقعی زمان بندی حرکت قطار ها به چه شیوه ای باشد که تاخیرات میان ایستگاهی به حداقل مقدار خود برسد برای تحقق این امر از مدل دو مرحله ای در برنامه ریزی احتمالی استفاده شده است که با در نظر گرفتن سناریو های مختلف زمان بندی اولیه حرکت به چه شیوه ای باشد که تاخیرات عملیاتی به کمترین مقدار خود برسد. متأسفانه به دلیل عدم دسترسی به موقع به داده های لازمه در مساله در این پروژه از شبیه سازی عددی برای بخش احتمالی استفاده شده است. و لازم به ذکر است که برای هر بخش فرض بر این بوده است که دیتاها از توزیع احتمالی خاصی پیروی میکنند. مثلاً زمان توقفات اجباری در هر ایستگاه به صورت سناریو های مختلف تعریف شده است که اعداد این سناریو ها فرض شده است که از توزیع نرمال پیروی کرده اند و برای مابقی پارامترهای احتمالی دیگر مساله نیز توزیع های احتمالی خاصی تعیین شده است.

واژه های کلیدی: حمل و نقل ریلی، برنامه ریزی، زمان بندی، عدم قطعیت.

فصل ۱: مقدمه

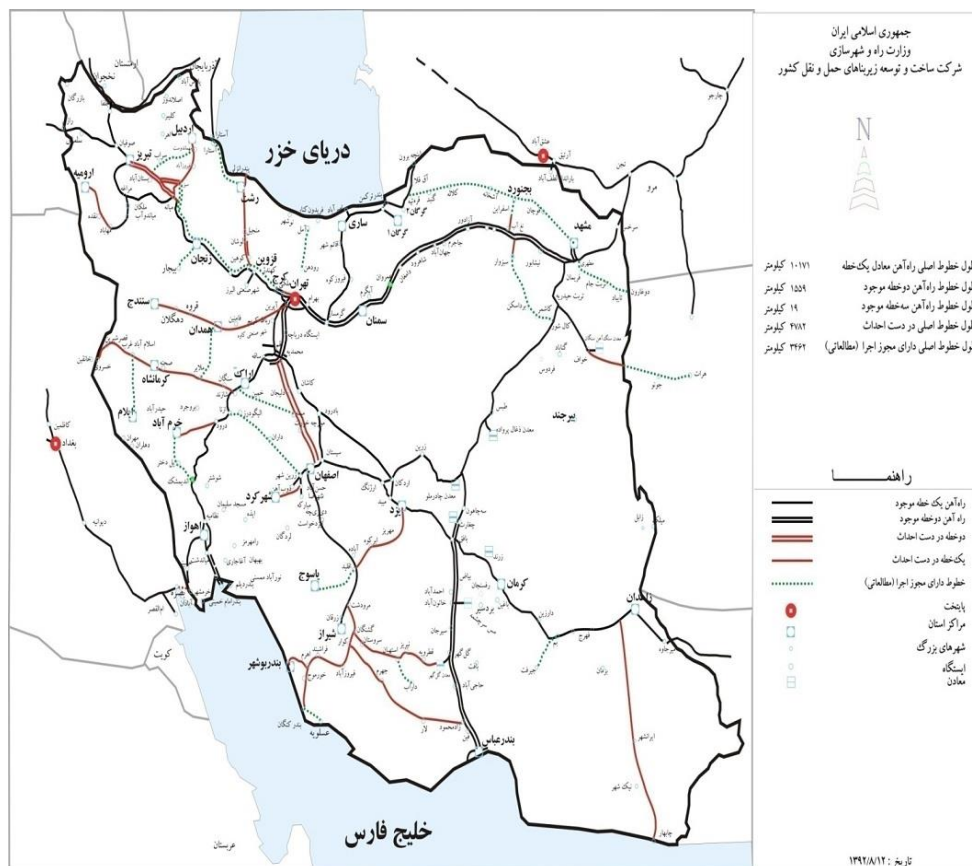
۱-۱- مقدمه

امروزه اهمیت موضوع برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بر کسی پوشیده نیست و شاید کمتر کشوری باشد که با مسئله‌ی حمل‌ونقل به عنوان یک چالش و مسئله‌ی مهم روبرو نباشد. این موضوع تا حدی مهم است که در بسیاری از دانشگاه‌های برتر دنیا دوره‌های آموزش عالی تدارک دیده شده است و مباحث و موضوعات در باب مسئله‌ی مذکور به طور کاملاً علمی و تخصصی مطالعه و بررسی می‌شوند. در این میان حمل‌ونقل ریلی با داشتن ویژگی‌های خاص و ممتاز نسبت به سایر مدهای حمل‌ونقلی، همچون ایمنی، راحتی و پاک بودن در بذل توجه دولت‌ها و اقشار مختلف مردم قرار گرفته است. اما از سوی دیگر حمل‌ونقل ریلی به دلیل داشتن شرایط و ویژگی‌های ویژه زیرساختی و سخت‌افزاری، نیازمند برنامه‌ریزی‌های عملیاتی دقیق و بسیاری می‌باشد. به گونه‌ای که در صورت نبود این برنامه‌ها و یا نداشتن کارایی کافی، سیستم حمل‌ونقل ریلی با مشکل جدی مواجه می‌شود. برنامه‌ریزی گروه‌بندی واگن‌ها، برنامه‌ریزی تشکیل قطارها، زمان‌بندی حرکت قطارها و یا برنامه‌ریزی تخصیص لکوموتیوها بخشی از این نوع برنامه‌ها هستند. در این میان موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها یکی از اساس‌ترین و مهم‌ترین مسائل مطرح در راه‌آهن هر کشوری می‌باشد. بدون شک در هر کاری عدم وجود یک برنامه‌ریزی دقیق و منظم باعث به وجود آمدن ناهماهنگی، اختلالات و به طور کلی کاهش چشمگیر کارایی کار انجام شده خواهد بود. تاکنون در حوزه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها تحقیقات و مطالعات بسیاری صورت گرفته است، اما شاید بسیاری از آن‌ها در عمل کارایی لازم رانداشته باشند، چراکه موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها، از موضوعات کاملاً عملیاتی می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود که دشواری برنامه‌ریزی در این حوزه بیش‌تر گردد، چرا که در نظر گرفتن شرایط واقعی عملیات در برنامه‌ریزی‌ها کار بسیار دشواری است، که در صورت امکان باعث پیچیده شدن برنامه‌ریزی انجام شده می‌شود. در این میان رویکردهای متفاوتی جهت مواجهه با این چالش به

وجود آمدند. یکی از این رویکردها استفاده از مفهومی به نام برنامه‌ریزی تصادفی و یا برنامه‌ریزی احتمالی است. به طور کلی رویکرد مذکور قصد دارد تا با در نظر گرفتن شرایط تصادفی و متغیر حاکم بر مسئله‌ی مورد بحث، خروجی حاصل از برنامه‌ریزی را به واقعیت نزدیک کند. هدف از ارائه این پروژه نیز آن است تا با بحث و مطالعه پیرامون این موضوع و ارائه‌ی یک مدل زمان‌بندی با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی به عنوان خروجی مطالعات انجام شده، گام تاثیرگذاری در نحوه‌ی زمان‌بندی و برنامه‌ریزی در این زمینه بردارد. برای آن که بتوان با فضای زمان‌بندی حرکت قطارها آشنا شد، نیاز است ابتدا تا مقدمه‌ای از مسائل مذکور مطرح شود.

۲-۱- تعریف مسئله

در ایران صنعت حمل و نقل ریلی در سال ۱۳۶۷ شروع به کار نمود. تا قبل از پیروزی انقلاب اسلامی، کل خط آهن کشور بالغ بر ۴۲۰۷ کیلومتر می‌شد [۱]. این رقم تا پایان سال ۱۳۹۲ طول خطوط اصلی به ۱۰۴۰۷ کیلومتر افزایش پیدا کرده است. در سال ۱۳۹۲ بیش از ۲۵ میلیون نفر مسافر و ۲۲ میلیارد تن کیلومتر بار در کشور جابجا شده است [۲]. این مطلب نشان از آن دارد که حمل و نقل ریلی نقش مهمی در حمل و نقل بار و مسافر به ویژه در بخش مسافری، در کشور ما ایفا می‌نماید. در جدول (۱-۱) مقایسه‌ای بین حمل و نقل جاده‌ای و ریلی انجام شده است.



شکل (۱-۱): نقشه خطوط ریلی موجود و در دست ساخت و مطالعه در شبکه راه آهن ایران [۳]

جدول (۱-۱): مقایسه حمل و نقل ریلی و جاده‌ای [۴]

ردیف	شاخص	حمل و نقل جاده‌ای	حمل و نقل ریلی
۱	نرخ سوانح	زیاد	کم
۲	هزینه‌ی ساخت	کم	بسیار زیاد
۳	هزینه‌ی کرایه	زیاد	ارزان (به ویژه در مسیرهای طولانی)
۴	اشتغالزایی	زیاد	کم
۵	شیب	شیب‌های تند قابل قبول است.	برای حمل و نقل انبوه، شیب باید حداقل باشد.
۶	طول مسافت‌ها	کم	زیاد
۷	ظرفیت حمل	مسافت‌های کوتاه	مسافت‌های طولانی
۸	کنترل عملیات‌ها	نیازی به کنترل‌های پیچیده نیست.	کنترل‌های متعددی نیاز است.

۹	اجازه ورود	همه می‌توانند وارد یا خارج شوند.	ورود برای همه آزاد نیست.
۱۰	تعمیر و نگهداری	نیازمند تعمیرات گاه گاهی	نیازمند تعمیرات دائم است.

همانطور که جدول (۱-۱) نشان می‌دهد، حمل و نقل ریلی به دلیل ویژگی‌هایی چون امکان حمل و نقل انبوه و ارزان بار و مسافر، آلودگی کمتر محیط زیست، مصرف سوخت بسیار کمتر نسبت به حمل و نقل جاده‌ای و هوایی و نیز ایمنی بیشتر از اهمیت بالایی برخوردار است، بطوریکه در کشورهای توسعه یافته درصد بالایی از عملیات حمل و نقل توسط این بخش از حمل و نقل صورت می‌گیرد. به همین جهت استفاده از برنامه‌ریزی‌های دقیق و بهینه در این بخش بسیار مهم می‌باشد. چرا که در صورت وجود برنامه‌ریزی بهینه، استفاده از ظرفیت‌ها و امکانات که خواست هر دولت و کشوری است افزایش یافته و به دنبال آن رضایت‌مندی مشتریان و سود کارگزاران این بخش افزایش خواهد یافت. در این میان نقش زمان‌بندی حرکت قطارها در ظرفیت حمل و نقل ریلی قابل توجه است.

برنامه‌ریزی زمان‌بندی حرکت قطارها را می‌توان از مهمترین و فعالیتهای راه آهن برشمرد که نقش به‌سزایی در استفاده از امکانات موجود، تعیین ظرفیت خطوط و خدمات ارائه شده دارد. به طوری که برنامه‌ی زمان‌بندی بهتر باعث صرفه جویی در هزینه‌ها و حمل بار و مسافر بیشتر با امکانات موجود خواهد شد. اما از سوی دیگر، زمان‌بندی حرکت قطارها از لحاظ ریاضیاتی بسیار مشکل است و دارای متغیرها و محدودیت‌های زیادی می‌باشد. از این رو محققان زیادی در سراسر دنیا به تحقیق و مطالعه پیرامون این موضوع پرداخته‌اند و در سال‌های اخیر تعداد مقالات منتشر شده در این موضوع افزایش قابل توجهی داشته است [۵].

هدفی که مسئله‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها دنبال می‌کند، تعیین زمان ورود و خروج قطارها از ایستگاه‌های مسیر می‌باشد. اغلب به دلیل بزرگی ناوگان و امکانات، مسئله دچار پیچیدگی زیادی می‌شود. در چنین شرایطی رویکردهای سنتی بهینه‌سازی برای حل این مسئله عملی نیستند. زیرا روش‌های دقیق عموماً در مسائلی با ابعاد کوچک کاربرد دارند. در ایران نیز زمان‌بندی حرکت قطارها به عنوان یکی از مسائل مهم راه‌آهنی دشوار مطرح است که همچنان به شیوه‌ی سعی و خطا انجام می‌شود. لذا در تعیین موضوع پایان‌نامه سعی شده است، علاوه بر قابلیت ارائه در مجامع علمی بین‌المللی، نتایج آن قابلیت استفاده کاربردی در ایران را نیز داشته باشد. بدین منظور با الهام گرفتن از مقالات ارائه شده در زمینه زمان‌بندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی، مدلی جهت زمان‌بندی حرکت قطارها در خطوط دو خطه ایران ارائه می‌گردد.

۱-۳-۱ اهمیت مسئله

در بین برنامه‌ریزی‌هایی که در راه‌آهن انجام می‌شود، زمان‌بندی حرکت قطارها، یکی از مهم‌ترین‌های آن‌ها است. زیرا این مسئله بر روی سایر مسائل برنامه‌ریزی تاثیر مستقیم داشته و مکمل مسائل مربوط به سیر و حرکت قطارها می‌باشد. هر چه سطح کیفی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها از کیفیت بالاتری برخوردار باشد، مسافران و صاحبان کالا، تمایل بیش‌تری برای انتخاب این سیستم حمل‌ونقلی برای دریافت خدمات از خود نشان می‌دهند. موضوع دیگر آن است که این مسئله پیش‌نیاز مسائل زمان‌بندی خدمه و تخصیص لکوموتیوها می‌باشد، که این باعث می‌شود، این مسئله بر سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در ناوگان نیز تاثیرگذار است. از آن‌جا که همیشه سیستم حمل‌ونقل ریلی در رقابت با سایر شیوه‌های حمل‌ونقلی به خصوص جاده‌ای می‌باشد، موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها دارای اهمیت ویژه‌ای است، بنابراین انتظار می‌رود با تهیه یک برنامه‌ی زمانی بهینه و عملیاتی و در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود، بر کارایی سیستم حمل‌ونقل ریلی افزوده شود.

۱-۴- مراحل انجام تحقیق

در ابتدا به منظور تکمیل مبانی نظری تحقیق و با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، مفاهیم و مدل‌های مرتبط با موضوع مورد مطالعه بررسی شده‌اند، بعد از آن با توجه به قوانین و شرایط راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران و مسئله‌ی مورد نظر مدل‌سازی مسئله انجام شده است. لازم به ذکر است که مدل پایه‌ای که برای بررسی این موضوع استفاده شده است و میتوان ادعا کرد که یکی از کامل‌ترین مدل‌های زمانبندی حرکت قطارها در ایران است مدل ارائه شده در رساله‌ی دکتری آقای [۱۷]، می‌باشد و همچنین به دلیل ذیغ بودن زمان برای پیاده‌سازی مدل دیتای‌های مربوط به مساله قطعی از پایان‌نامه‌ی مربوطه گرفته شده است و برای بخش احتمالی از طریق شبیه‌سازی داده جمع‌آوری شده است.

این مطالعه، به دلیل ارائه یک مدل ریاضی زمانبندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی، جزو پروژه‌های نظری به شمار می‌رود، همچنین به علت قابلیت آن در پاسخ دادن به مسائل واقعی در بخش حمل‌ونقل ریلی، جزو پروژه‌های کاربردی نیز محسوب می‌شود. مراحل انجام کار پروژه‌ی حاضر در زیر نشان داده شده است.

بررسی ادبیات موضوع

- (۱) انتخاب مدل مورد نظر جهت بررسی و مطالعه
- (۲) انجام اصلاحات مورد نیاز و متناسب سازی مدل مذکور با راه‌آهن ج.ا.ا
- (۳) جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز جهت پیاده‌سازی مدل مورد نظر
- (۴) پیاده‌سازی مدل با داده‌های جمع‌آوری شده
- (۵) تفسیر نتایج و مقایسه آن با شرایط قطعی

فصل ۲: مسئله زمان بندی

حرکت قطارها و مروری بر

ادبیات موضوع

در این فصل به منظور آشنایی بیش تر با فضای مسئله‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها، به بررسی برخی از مفاهیم مهم این موضوع و همچنین نحوه‌ی زمان‌بندی در ایران پرداخته خواهد شد. در ادامه نیز به مطالعه‌ی ادبیات موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی پرداخته شده است. در مطالعه‌ی ادبیات موضوع سعی شده است تا برخی از مقالاتی که موضوعات آن‌ها ارتباط نزدیک با موضوع مورد بحث نیز دارد بررسی شود.

۲-۲- سلسله مراتب برنامه‌ریزی در راه آهن

در سلسله مراتب برنامه‌ریزی راه آهن، در مرحله اول میزان و نوع تقاضای مشتری باید مشخص و بررسی شود. نتایج به دست آمده از این مرحله مشخص می‌کند که چه میزان مسافر بین یک مبداء و مقصد معین سفر می‌کنند. برنامه‌ریزی خط شامل تصمیم‌گیری در مورد مسیرها و خطوط است. این برنامه‌ریزی تعیین می‌کند که کدام خطوط و مسیرها و با چه فرکانسی باید مورد بهره‌برداری قرار گیرند. در مرحله برنامه‌ریزی حرکت قطار تمام زمان‌های ورود و خروج قطارها از خطوط معین می‌شود. جدول زمانی براساس مکان ابتدا و انتها و برنامه‌ریزی زمانی برای هر قطار به دست می‌آید. واگن‌ها و لکوموتیوهای که به خطوط تخصیص داده شده‌اند برای تشکیل قطار به هم متصل می‌شوند. این برنامه‌ریزی، برنامه‌ریزی آلات نقلیه نامیده می‌شود. فعالیت بعدی مدیریت خدمه است که توزیع پرسنل در قطارها را مشخص می‌کند. این برنامه‌ریزی باید به صورتی انجام شود که پرسنل مورد نیاز هر قطار را تامین کنند. 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. از نقطه نظر افق برنامه‌ریزی نیز سطوح مختلفی وجود دارند که تمام این مراحل با هم در ارتباط هستند. محاسبه جواب بهینه

در یک مرحله ممکن است جواب‌های موجه در مراحل بعدی را محدود کند. در برنامه‌ریزی استراتژیکی سرمایه‌های زیربنایی 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. شبکه‌ی زیربنایی اغلب در این مرحله توسعه پیدا می‌کند. تحلیل و آنالیز تقاضا و برنامه‌ریزی خط اغلب به این مرحله تعلق دارند. برنامه‌ریزی تاکتیکی بر تخصیص منابع متمرکز است. جریان ترافیک از اطلاعات تقاضای مصرف‌کننده و زیربنای بدست می‌آید. بیشتر جزئیات برنامه‌ریزی خط و برنامه‌ریزی حرکت قطار در این مرحله انجام می‌شوند. برنامه‌ریزی عملیاتی نیز همان برنامه‌ریزی روزانه است. در بعضی مواقع به علت خرابی خط یا قطار باید برنامه‌ریزی خط و پرسنل نیز دوباره انجام شود [۶].

۲-۳- کلیات 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 مسئله زمان‌بندی در صدد یافتن راه حلی موجه برای این دو نوع محدودیت است، بطوری که حل هر مساله زمان‌بندی، برابر با پاسخگویی به سوالاتی از قبیل اینکه کدام منبع برای انجام هر وظیفه تخصیص داده خواهد شد و یا هر وظیفه در چه وقت انجام خواهد شد، می‌باشد [۶].

۲-۳-۱- کلیات زمان‌بندی حرکت قطارها

زمان حرکت قطار، یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های زمان‌بندی در سطح میان‌مدت در راه‌آهن است. اهداف

زمان‌بندی حرکت قطار به شرح زیر است.

(۱) تعیین زمان اعزام قطار از ایستگاه مبدأ

(۲) تعیین مدت زمان سیر قطار در بلاک

(۳) تعیین زمان ورود و خروج و میزان توقف قطار در ایستگاه‌های بین راهی که شامل زمان توقف‌های

برنامه‌ای (سوار و پیاده‌شدن مسافرین) و توقف‌های اجباری (نظیر عملیات تلاقی و سبقت)

(۴) تعیین محل تلاقی و سبقت قطارها

(۵) تعیین زمان رسیدن قطار به ایستگاه مقصد

همچنین در زمان‌بندی حرکت قطار، باید جنبه‌های مختلفی نظیر موارد زیر در نظر گرفته شود:

(۱) رعایت اصول ایمنی در حرکت قطارها.

(۲) حداقل کردن زمان سیر قطارها از مبدأ به مقصد.

(۳) حداکثر کردن استفاده از خطوط، ایستگاه‌ها، ناوگان و مأمورین

(۴) تحقق بخشیدن به برنامه تشکیل قطار (برای زمان‌بندی قطارهای باری) [۷].

محدودیت‌های فیزیکی مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها عبارتند از:

- حداقل زمان سیر

این محدودیت حداقل زمان سیر بین یک ایستگاه تا ایستگاه بعد را نشان می‌دهد. زمانی که قطار فاصله بین دو ایستگاه را می‌پیماید، می‌بایست کوچک‌تر و یا مساوی این حداقل زمان باشد.

- حداقل زمان توقف در ایستگاه

زمان توقف در ایستگاه‌هایی که مسافر پیاده و سوار می‌شود می‌بایست بزرگ‌تر یا مساوی با حداقل مجاز باشد و در سایر ایستگاه‌ها که برای رفع تلاقی‌ها 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 می‌بایست یک قطار وجود داشته باشد.

- محدودیتهای سبقت

هنگامی که دو قطار با سرعت‌های مختلف در یک جهت حرکت می‌نمایند و قطار کندرو در جلوی قطار تندرو قرار دارد، ممکن است تلاقی روی دهد. در این صورت قطار کندرو می‌بایست در ایستگاه منتظر بماند تا قطار تندرو از آن سبقت بگیرد. سبقت تنها می‌تواند در ایستگاه‌ها انجام شود.

- حداقل سرفاصله

برای دلایل ایمنی، می‌بایست حداقل زمانی بین دو رویداد ورود/خروج در هر ایستگاه وجود داشته باشد.

- محدودیت عبور از سوزن

بین دو قطار که از یک سوزن عبور می نمایند، می بایست فاصله ای بزرگ تر یا مساوی حداقل مجاز باشد تا تلاقی روی ندهد.

- محدودیت تخصیص خط

اگر دو قطار متوالی به یک خط در ایستگاه تخصیص یافته باشند، حداقل فاصله زمانی بین رسیدن آنها می بایست وجود داشته باشد.

محدودیت هایی که در بالا اشاره شد محدودیت های اجباری برای هر نوع زمان بندی حرکت قطارها هستند. محدودیت های بسیاری با توجه به نوع مسئله نیز قابل تعریف هستند [۶].

۲-۳-۲- اطلاعات مورد نیاز برای زمان بندی حرکت قطارها

اطلاعات مورد نیاز برای زمان بندی حرکت قطارها، به سه دسته اطلاعات پایه ای، اطلاعات قطارها و اطلاعات سرفاصله و زمان حائل بین قطارها تقسیم می شود.

۱- اطلاعات پایه ای

اطلاعات پایه ای شامل موارد زیر است.

(۱) اطلاعات خطوط شبکه که شامل موارد زیر است:

ترتیب ایستگاه ها

اطلاعات مسیرها و زمان بندی مسدودی مسیرها جهت عملیات نگهداری و تعمیر محورهای موجود.

حداکثر سرعت مجاز واگن ها برای قطارهای مختلف در مسیر

۲) اطلاعات ایستگاه‌ها که شامل موارد زیر است:

نوع ایستگاه (تشکیلاتی یا غیر تشکیلاتی).

موقعیت ایستگاه‌ها از مرکز و ایستگاه قبلی و بعدی.

تعداد خطوط قبول و اعزام.

طول مفید هر یک از خطوط قبول و اعزام

وجود یا عدم وجود نمازخانه و گنجایش آن.

وجود یا عدم وجود پست بازدید فنی [۷].

۲- اطلاعات قطارها

✓ این اطلاعات شامل موارد زیر می‌باشد:

✓ طول قطار

✓ مبدأ و مقصد قطارها

✓ تعداد قطارهای پیش‌بینی شده برای هر مبدأ و مقصد (قطار باری بر اساس برنامه تشکیل و قطار مسافری بر

اساس برنامه‌ریزی خطوط مسافری)

✓ زمان مورد نظر یا فاصله زمانی قابل قبول برای اعزام قطارها.

✓ اولویت تردد قطارها.

✓ توقف‌های برنامه‌ای که خود شامل موارد زیر است:

✓ توقف‌های جهت ادای فریضه‌ی نماز، که باید در افق شرعی و در ایستگاه‌هایی که دارای نمازخانه هستند صورت

گیرد.

✓ توقف جهت سوار و پیاده‌شدن مسافران.

✓ توقف جهت تغییر آرایش قطار باری

✓ توقف جهت بازدید فنی

✓ توقف جهت آگیری (در فصل زمستان برای گرمایش قطارهای مسافری)

✓ توقف جهت کم یا اضافه کردن دیزل (برای مثال در ناحیه شمال برای مسیرهای دارای فرار زیاد انجام می‌شود).

✓ شماره‌ی قطارها

✓ زمان سیر قطارها و حداکثر سرعت مجاز آنها

برای محاسبه‌ی زمان سیر قطارها در مسیرها، از دو روش استفاده می‌شود. روش اول روش آماری است که در این روش، زمان سیر قطار در مسیر بر اساس آمار گذشته محاسبه می‌شود. روش دوم، شبیه‌سازی است که در این روش از طریق روابط ریاضی مربوط به نیروی کشش و نیروهای مقاومت، کوتاه‌ترین زمان سیر محاسبه می‌شود و یک مقدار زمان جبرانی باید به زمان به دست آمده اضافه شود [۸].

زمان جبرانی ذکر شده در شبیه‌سازی، به صورت درصدی از کوتاه‌ترین زمان سیر محاسبه شده در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، در آلمان سه تا هفت درصد در نظر گرفته می‌شود [۸]. زمان جبرانی می‌تواند به صورت یک عدد ثابت برای هر مسیر که بر اساس تجربه به دست آمده، تعیین شود. لازم به ذکر است زمان سیر برای مسیرهای رفت و برگشت مسیر، ممکن است بر اساس شیب و فراز، متفاوت باشد. همچنین وضعیت قطار در آغاز و پایان مسیر، می‌تواند در زمان سیر قطار تاثیر بگذارد. به عنوان مثال در صورت حرکت از حالت توقف، یک زمان شتاب‌گیری به زمان سیر قطار اضافه و در صورت توقف در ایستگاه پایانی، زمان ترمزگیری نیز به زمان سیر قطار اضافه شود [۷].

۹- سرفاصله و زمان حائل بین قطارها

سومین گروه از اطلاعات موردنیاز برای زمان‌بندی حرکت قطار، سرفاصله و زمان حائل بین قطارهاست. سرفاصله به حداقل فاصله‌ی زمانی اعزام یا قبول قطارها از یک بلاک به بلاک گفته می‌شود. سرفاصله‌ی بین قطارها را می‌توان به چهار نوع تقسیم کرد، که در جدول (۱-۲) نمایش داده شده است [۷].

به وجود آمدن تأخیر در حرکت یک قطار، باعث تغییر در کل برنامه‌ی زمانی قطارها می‌شود. برای جلوگیری از بروز این مشکل، زمان‌بندی حرکت قطارها بر اساس کمترین مقدار سرفاصله انجام نمی‌گیرد. برای اطمینان از اجرای برنامه‌ای که به طور معمول بر اساس سرفاصله قطارها تنظیم می‌شود، زمانی به نام زمان حائل به سرفاصله قطارها اضافه می‌شود [۷].

جدول (۱-۲): حالت‌های مختلف در سرفاصله بین قطارها [۷]

نوع سرفاصله	قطار اول	قطار دوم
A	اعزام به بلاک	اعزام به بلاک از مسیر یکسان با قطار اول
B	قبول از بلاک	قبول از بلاک از مسیر یکسان با قطار اول
C	قبول از بلاک	اعزام به بلاک در مسیر مخالف با قطار اول
D	اعزام به بلاک	قبول از بلاک از مسیر مخالف با قطار اول

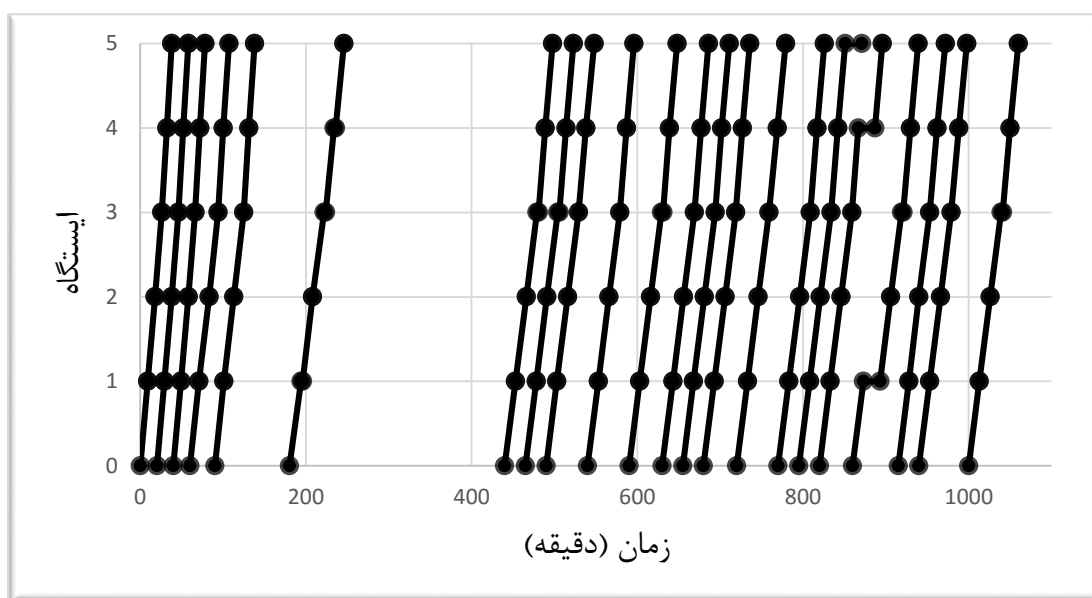
۱-۲-۴- گراف قطارها

اولین بار گراف قطارها در سال ۱۸۲۵ در بریتانیا به کار گرفته شد. گراف از دو محور مسافت و زمان تشکیل شده است که جهت نمایش برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها استفاده می‌شود و در حقیقت نمایش موقعیت زمانی- مکانی 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 [۶].

گراف قطارها به دو منظور استفاده می شود، یکی نمایش دادن حرکت قطارها و کنترل ترافیک و دیگری نمایش دادن برنامه‌ی حرکت قطارها. همچنین انواع گراف قطارها از نظر نحوه نمایش زمان و مسافت روی محورهای عبارتند از:

محور افقی یا طول برای نشان دادن زمان و محور عمودی یا عرض برای نشان دادن مسافت (مانند ایران)

محور افقی برای مسافت و عمودی برای زمان (کشورهایی اروپایی) [۶].



شکل (۱-۲): یک نمونه گراف رسم شده برای ۵ بلاک یک محور دو خطه

زاویه خطوط قطارها با خطوط افقی در گراف قطار، نشان‌دهنده‌ی سرعت قطار است. هرچه این زاویه بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی سرعت بیش‌تر قطار است. زیرا فاصله‌ی طی شده به نسبت زمان، بیشتر می‌شود خطوط قطارها روی گراف با رنگ‌های مختلفی مشخص می‌شوند، که این رنگ‌ها بر اساس نوع قطارها تعیین می‌شوند. در سال‌های اخیر و با توسعه سامانه‌های کامپیوتری، گراف قطار هم از این توسعه بی‌بهره نبوده است. در حال حاضر در راه‌آهن ایران گراف قطار با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری تهیه می‌شود [۷].

۲-۵- مقدمه‌ای بر برنامه‌ریزی احتمالی

همانطور که می‌دانیم بهینه‌سازی یک عنصر اصلی از بسیاری از پدیده‌های فیزیکی می‌باشد و به همین دلیل ما در دنیای پیرامونمان با مسائل مینیمم‌سازی و ماکسیمم‌سازی زیادی مواجه هستیم. ما به طور معمول به دنبال مینیمم یا ماکسیمم کردن چیزی‌هایی به مانند زمان سفر، سود و هزینه، تعداد کاری که در یک دوره مشخص زمانی می‌توانیم انجام بدهیم و مواردی از این دست هستیم. بنابراین ما به دنبال این هستیم که بهترین تصمیم را با در نظر گرفتن شرایط و معیارهای موجود حاکم بر شرایط مسئله بگیریم. بر این اساس تحقیق در عملیات به عنوان یکی از شاخه‌های مهم ریاضیات کاربردی به وجود آمده است و در طول دوران‌ها گسترش پیدا کرده‌است، این گسترش تا جایی بوده است که می‌توان گفت دامنه‌ی آن به حوزه‌های از قبیل اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، برنامه‌ریزی، مهندسی، زیست‌شناسی، فیزیک و شیمی رسیده است. اغلب تحقیق در عملیات بر روی موقعیت‌هایی تمرکز می‌کند که سیستم مورد بررسی از یک سری از تصمیمات خارج از سیستم اثر می‌پذیرد. بنابراین تحقیق در عملیات سعی دارد تا از طریق مدل کردن متغیرها و محدودیت‌های تاثیرگذار بر روی سیستم به بهترین جواب ممکن برسد. در واقع تعریف کردن درست و صحیح متغیرها و محدودیت‌ها اولین گام در مسائل بهینه‌سازی است و برای سایر مراحل بهینه‌سازی یک مسئله مهم به حساب می‌آید. اگر یک مدل بیش از اندازه ساده شده باشد اصلاً کاربردی نخواهد بود و اگر بیش از اندازه پیچیده باشد، قابل حل نخواهد بود. در این میان نکته‌ی قابل توجهی که وجود دارد، وجود اطلاعات صحیحی است که قرار است در مدل‌سازی از آن‌ها استفاده بشود، از آن جا که می‌دانیم اغلب به دست آوردن چنین اطلاعاتی کار ساده‌ای نخواهد بود، با چالشی به نام عدم قطعیت در مسائل روبرو می‌شویم، در طول ادوار گذشته کارهای زیادی صورت گرفته است تا بتوان عدم قطعیت موجود در محدودیت‌ها و متغیرها را مدل‌سازی کرد و آن‌ها را در حل مسائل در نظر گرفت، اما یکی از حوزه‌های

کابردی و قابل توجه دیگری که به عنوان زیر شاخه‌ای از تحقیق در عملیات به وجود آمد، برنامه‌ریزی احتمالی می‌باشد.

برنامه ریزی احتمالی در نیمه قرن بیستم به وجود آمد و به دنبال آن رویکردهای جدیدی در برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی به وقوع پیوست. خیلی سریع به این موضوع پی برده شد که عدم قطعیت در مسائل یک مسئله مهم می‌باشد و احتیاج است که برای مدل سازی و حل مسائل رویکرد جدیدی به کار گرفته شود. امروزه برنامه ریزی احتمالی شامل عدم قطعیت در شرایط حاکم بر مسئله و وجود متغیرهای تصادفی می‌شود. مدل‌های محدودیت‌های تصادفی، مسائل دومارحله‌ای و یا چند مرحله‌ای و یا مسائلی که شامل اندازه‌گیری مقدار ریسک نیز می‌باشد از حوزه‌های مهم برنامه‌ریزی احتمالی می‌باشد. به علت سختی ذاتی مسائل بهینه‌سازی احتمالی زمان زیادی طول می‌کشد تا روش‌های حل کارا در این حوزه بهبود داده شوند. در دو دهه‌ی گذشته شاهد تغییرات چشمگیری در حل مسائل برنامه‌ریزی احتمالی بوده‌ایم. همچنین در کنار این موضوع شاهد پیشرفت‌های محاسباتی و پیشرفته‌شدن تکنولوژی نیز بوده‌ایم [۹].

از آن‌جا که عدم قطعیت در مسائل دنیای واقعی یک جز کلیدی و جدا نداشتنی از مسائل مربوط به تصمیم‌گیری است، برنامه‌ریزی احتمالی در بسیاری از حوزه‌ها کاربرد دارد. برنامه‌ریزی مالی، زمان‌بندی حرکت هواپیماها و یا قطارها، سیستم‌های توان و الکتریکیسته، لجستیک و حمل و نقل تنها مثال‌های کوچکی از کاربردهای برنامه‌ریزی احتمالی می‌باشند.

۶-۲- اهمیت برنامه‌ریزی احتمالی

هدف برنامه‌ریزی احتمالی دقیقاً پیدا کردن تصمیم بهینه در مسائلی است که شامل عدم قطعیت در اطلاعات می‌باشند. با این تعریف برنامه‌ریزی احتمالی دقیقاً نقطه مقابل برنامه‌ریزی قطعی^۱ می‌باشد. و این یعنی اینکه بعضی از اطلاعات تصادفی می‌باشند و این درحالی است که برنامه‌ریزی اشاره به این دارد که قسمت‌هایی از مسئله می‌توانند به عنوان برنامه ریزی خطی و یا غیر خطی مدلسازی شود. این شاخه از ریاضیات به عنوان بهینه‌سازی تحت عدم قطعیت نیز شناخته می‌شود، که البته به سرعت در زمینه‌های مختلفی از جمله اقتصاد، تحقیق در عملیات، ریاضیات، آمار و احتمالات در حال توسعه می‌باشد. در واقع برنامه‌ریزی احتمالی یک رویکرد برای مسائل بهینه‌سازی احتمالی است که عدم قطعیت را شامل می‌شود. مدل‌های احتمالی در حالت کلی شبیه به هم هستند اما هر کدام سعی در این دارند که از توزیع‌های احتمالی برای متغیرهای تصادفی استفاده کنند. این توزیع‌ها از اطلاعات شناخته شده تخمین زده می‌شوند. اغلب این مدل‌ها برای پاسخ به این سوال به کار برده می‌شوند که کدام تصمیم فوراً و به طور تکراری در یک شرایط گرفته شود. و هدف این است که تصمیمی اتخاذ شود که به طور متوسط نتیجه‌ی اثربخشی داشته باشد. یک مثال خیلی خوب می‌تواند در مورد طراحی مسیر کامیون‌هایی که قصد دارند شیرهای پاکتی را روزانه با یک تقاضای احتمالی به دست مشتریان‌شان برسانند، باشد [۹].

در برنامه‌ریزی احتمالی، توزیع‌های احتمالی می‌توانند از داده‌های جمع‌آوری شده در طول زمان تخمین زده شوند. هدف این است که سیاستی اتخاذ شود که برای تمام یا حداقل بیشتر پارامترهای ممکن شذنی باشد و همچنین توابع مورد انتظار تصمیمات و متغیرهای تصادفی را ماکسیمم کند.

برنامه‌ریزی احتمالی همچنین می‌تواند در موقعی که یک تصمیم فقط یک بار باید گرفته شود، به کار گرفته شود. در اینجا یک مثال خیلی خوب می‌تواند ساختار یک سبد سرمایه‌گذاری برای ماکسیمم کردن نرخ

^۱ Deterministic Programming

بازگشت سرمایه باشد. همانند تحویل شیرها به طور روزانه، توزیع‌های احتمالی نرخ‌های بازگشت سرمایه در ابزارهای مالی شناخته‌شده در نظر گرفته می‌شوند، اما در غیاب اطلاعات از دوره‌های آینده، این توزیع‌ها باید از برخی از مدل‌های کمکی بیرون کشیده شوند. در ساده‌ترین نوع آن احتمالاً باید از طریق دیگر سرمایه‌گذاران که قبلاً تجربه‌ی سرمایه‌گذاری داشته‌اند، استفاده شود. [۹].

۲-۶-۱- اهمیت مسائل برنامه‌ریزی احتمالی در حمل و نقل

مدل‌های عملیاتی مسائل حمل و نقل و ترابری ارائه‌دهنده‌ی مجموعه نسبتاً کاملی از برنامه‌های کاربردی برای برنامه‌ریزی احتمالی می‌باشند، زیرا آنها معمولاً با فرآیندهای اطلاعاتی بسیار پویا مشخص می‌شوند. در حمل‌ونقل بار، این امر معمول است که یک روز قبل یا گاهی اوقات در همان روز با یک حمل‌کننده تماس گرفته شود تا درخواست انتقال یک محموله داده شود. در حمل و نقل با کامیون، تماس‌های تلفنی در آخرین لحظه با درخواست‌هایی ترکیب می‌شوند که چند روز قبل صورت گرفته‌اند و حمل‌کننده را در موقعیت تعهد به انتقال بارها بدون دانستن تقاضاها در آخرین لحظات قرار می‌دهد (گاهاً توسط مشتریان مهم آنها). در خطوط راه‌آهن، درخواست برای انتقال بار ممکن است یک هفته بعد باشد، اما انتقال یک واگن باری به مشتری ممکن است یک هفته زمان ببرد. اما اثری که در پی خواهد داشت متفاوت نخواهد بود [۹].

مدل‌های بهینه‌سازی در حمل و نقل و تدارکات همچنان که در عمل به کار برده می‌شوند، تقریباً همواره بر اساس مدل‌های قطعی تدوین و فرموله می‌شوند. این سوال مطرح است که آیا مدل‌های قطعی می‌توانند ضعف‌های اساسی را نه از دیدگاه آکادمیک بلکه از نظر محدودیت‌های عملی که توسط افراد در صنعت درک شده است، پوشش دهند [۹].

در زمینه‌ی اهمیت مسائل برنامه‌ریزی احتمالی در حوزه‌ی زمان‌بندی در حمل‌ونقل می‌توان گفت که غالباً در عمل به دلیل وجود اختلالاتی در اثر وجود شرایط متغیر آب‌وهوایی تأثیر گذار بر حمل‌ونقل، شرایط متغیر فیزیکی مسیرهای حمل‌ونقل، شرایط متغیر وسایط حمل‌ونقل و... امکان استفاده از مدل‌های قطعی وجود ندارد و یا در صورت امکان به گونه‌ای است که در صورت در نظر نگرفتن شرایط فوق این امکان وجود دارد که ما بین آنچه که زمان‌بندی شده است و آنچه که در عمل اتفاق می‌افتد، شکاف بزرگی به وجود آید، به گونه‌ای که زمان‌بندی تهیه شده قابل اطمینان نخواهد بود. و این خود باعث به وجود آمدن بی‌نظمی و در نتیجه کاهش کارایی سیستم می‌شود. برنامه‌ریزی احتمالی می‌تواند با در نظر گرفتن شرایط متغیر پارامترهای مختلف، خروجی قابل اطمینانی را ارائه دهد، به گونه‌ای که تفاوت بین زمان‌بندی تهیه شده و آنچه که در عمل اتفاق می‌افتد، به حداقل برسد.

۲-۲- مدل‌های برنامه‌ریزی احتمالی

در این بخش قصد داریم تا با مرور مسائل و مدل‌های مختلف احتمالی به بررسی انواع این مدل‌ها در برنامه‌ریزی احتمالی بپردازیم. از مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های احتمالی می‌توان از مدل‌های دو مرحله‌ای، چند مرحله‌ای، مدل‌های دارای محدودیت‌های تصادفی و مدل‌های ریکورس نام برد. در ادامه نحوه‌ی مدلسازی با استفاده از برخی از مهم‌ترین مدل‌های برنامه‌ریزی احتمالی را بررسی خواهیم کرد.

۲-۷-۱- مدل‌های ریکورس

مدل‌های ریکورس در برنامه‌ریزی احتمالی مدل‌های کاربردی هستند و گاهی اوقات با دیگر مدل‌های برنامه‌ریزی احتمالی ترکیب می‌شوند، ایده‌ی اصلی این مدل‌ها بر این اساس است که ابتدا در مسئله‌ی بهینه‌سازی احتمالی و در شرایط عدم قطعیت تصمیم گرفته شود، سپس پیامدهای حاصل از تصمیم و هزینه‌های مورد انتظار آن بهینه می‌گردد.

فرض کنید x برداری از تصمیمات است که ما می‌توانیم اتخاذ کنیم، و $y(w)$ برداری از تصمیمات است که پیامدها و فعالیت‌هایی را نشان می‌دهد که از نتایج تصمیم x بدست می‌آیند. به این نکته باید توجه کرد که مجموعه‌ای از y ها برای هر خروجی w انتخاب خواهد شد.

$$\text{Minimize } f_1(x) + \text{Expected Value } (f_2(y(w), w)) \quad (1-2)$$

$$\text{Subject to } g_1(x) \leq 0 \dots g_m(x) \leq 0 \quad (2-2)$$

$$h_1(x, y(w)) \leq 0 \text{ for all } w \text{ in } W \quad (3-2)$$

..

$$h_k(x, y(w)) \leq 0 \text{ for all } w \text{ in } W$$

$$x \text{ in } X, y(w) \text{ in } Y$$

مجموعه‌ای از محدودیت‌های h_1 تا h_k نشان‌دهنده‌ی ارتباط بین تصمیمات مرحله‌ی اول و اقدامات مرحله‌ی دوم می‌باشد. مدل‌های ریکورس می‌توانند به روش‌های مختلفی تعمیم داده شوند. به عنوان مثال یکی از این روش‌ها بدین صورت است که ما مراحل بیش‌تری را برای مدل‌سازی در نظر بگیریم. و این گونه مسائل تبدیل به مسائل

برنامه‌ریزی احتمالی چند مرحله‌ای می‌شوند، مسئله‌ای که در هر مرحله تحت شرایط عدم قطعیت تصمیمی اتخاذ می‌شود و وقتی عدم قطعیت مشخص شد، تصمیمی بهینه بر اساس آن چه که اتفاق افتاده است، در آن مرحله گرفته می‌شود [۱۰].

- مدل برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای

مدل‌های برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای از پرکاربردترین مدل‌های برنامه‌ریزی احتمالی هستند. در این مدل‌ها، تصمیمات در دو مرحله اتخاذ می‌شود. در مرحله‌ی اول تصمیماتی در غیاب پارامترهای عدم قطعیت اتخاذ می‌شود و در مرحله‌ی دوم و پس از مشخص شدن پارامترهای عدم قطعیت، هزینه‌های ناشی از تصمیم مرحله‌ی اول کاهش می‌یابد. این روند آن‌قدر ادامه می‌یابد تا بهترین تصمیم در مجموع دو مرحله اتخاذ شود. به طور مثال فرض کنید تصمیمی که در مرحله اول گرفته می‌شود در مورد طراحی یک سیستم است و تصمیم مرحله دوم در مورد عملیاتی است که در این سیستم تحت شرایط خاصی باید صورت بگیرد. به عنوان مثال هدف موردنظر می‌تواند پیدا کردن یک نقطه‌ی تعادل میان هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بلند مدت عملیاتی باشد. فرم کلی این مدل‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } c^T x + E_{\xi} Q(x, \xi) \quad (4-2)$$

$$s. t. Ax = b, \quad (5-2)$$

$$X \geq 0$$

که $Q(x, \xi)$ از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید :

$$Q(x, \xi) = \min\{q^T y \mid Wy = h - Tx, y \geq 0\} \quad (6-3)$$

ξ برداری است که از عناصر q^T و h^T و T تشکیل شده است. و E_{ξ} امید ریاضی^۱ و یا همان ارزش انتظاری

با در نظر گرفتن بردار ξ را نمایش می‌دهد. تابع هدف از دو جز تشکیل شده است، جز اول یا همان $c^T x$

^۱ Expected Value

نشان‌دهنده‌ی هزینه‌های تصمیم در مرحله‌ی اول می‌باشد. متغیر مرحله‌ی اول متغیری است که مقادیر آن در پایان مرحله‌ی اول مشخص می‌شود. در واقع به این قسمت از تابع هدف قسمت قطعی تابع هدف می‌گویند، بدین معنا که ضرایب متغیرهای مرحله‌ی اول یعنی X قطعی در نظر گرفته شده‌اند. اما جز دوم یعنی $Q(x, \xi)$ نشان‌دهنده‌ی جز احتمالی تابع هدف می‌باشد. و y را متغیر مرحله‌ی دوم و یا متغیر ریکورس می‌گویند، که در پایان مرحله‌ی دوم مشخص می‌شود. رابطه‌ی $Wy = h - Tx$ نیز محدودیتی است که در رابطه با متغیرهای مرحله‌ی دوم وجود دارد و جز قسمت احتمالی مدل می‌باشد.

۲-۷-۲- مدل محدودیت‌های تصادفی

مدل‌های دارای محدودیت تصادفی همانطور که از نام آن‌ها نیز برمی‌آید، دارای محدودیت‌هایی هستند که با احتمال خاصی رخ می‌دهند. بدون شک این مدل‌ها سختی و پیچیدگی بیش‌تری دارند. معمولاً فرم نوشتاری این محدودیت‌ها در مدل‌های احتمالی به صورت رابطه‌ی کلی زیر می‌باشد.

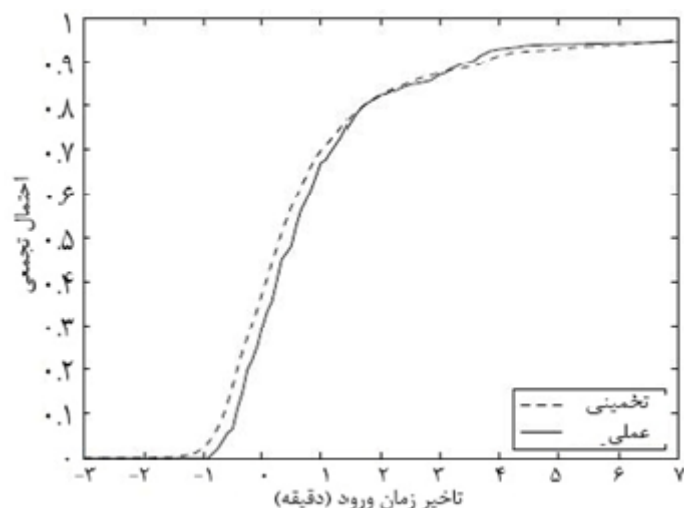
$$P(\{\xi / g(x, \xi) \leq 0\}) \geq \alpha \quad (7-2)$$

که در آن $g(x, \xi)$ برداری است که نشان‌دهنده‌ی مقدار آن محدودیت در صورت رخداد هر سناریوی^۱ خاص در بردار ξ می‌باشد. که مقدار احتمال رویداد این محدودیت حداقل به اندازه‌ی مقدار α می‌باشد. بنابراین این محدودیت هنگامی شدنی خواهد بود، که تحت یک سناریوی خاص تمام مقادیری که به ازای آن در بردار $g(x, \xi)$ به دست می‌آیند، کوچکتر از صفر باشند [۱۰].

۸-۲- مروری بر ادبیات زمان‌بندی احتمالی حرکت قطارها

در این بخش به بررسی مقالاتی که در زمینه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی و یا موضوعات مرتبط ارائه شده‌اند، پرداخته خواهد شد. یکی از مقالاتی که در زمینه‌ی تاخیر قطارها و در حوزه‌ی برنامه‌ریزی احتمالی منتشر شده است، مقاله‌ی یوآن^۱ و هانسن^۲ [۱۱] می‌باشد. موضوع این مقاله در حوزه‌ی بهینه‌سازی استفاده از ظرفیت ایستگاه‌ها از طریق تخمین تاخیراتی که در طول مسیر به طور احتمالی برای قطارها اتفاق می‌افتد، می‌باشد. این مقاله یک مدل احتمالی را در ارتباط با توزیع تاخیرات در ایستگاه‌ها ارائه می‌دهد. این تاخیرات از طریق اختلالات موجود در مسیر به وجود می‌آیند و باعث به وجود آمدن تاخیر در برنامه‌ی حرکت سایر قطارها می‌شوند. این مدل محدودیت‌های موجود در سیستم تابلوهای هشداردهنده و قوانین عملیات حفاظت از قطار را مورد بررسی قرار می‌دهد. متغیرهای احتمالی، زمان‌های اشغال مسیر به علت تغییرات سرعت قطار به سبب وجود تابلوهای کنترل سرعت متفاوت در قسمت‌های مختلف مسیر، در نظر گرفته شده‌اند. همچنین این مدل با به کارگیری یک نمونه‌ی واقعی از ایستگاه راه‌آهن داتچ هلند به ارائه‌ی نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل پرداخته است و در نهایت مهم‌ترین نتیجه‌گیری برای این مقاله آن است که وقتی زمان‌های بافر برنامه‌ریزی شده بین مسیرها در تقاطع‌ها کاهش می‌یابد، تاخیرات احتمالی تمام قطارهای عبوری به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در ادامه نمودارهای مربوط به نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل نشان داده شده است.

^۱Jianxin Yuan
^۲Ingo Hansen



نمودار (۲-۱): احتمال تجمعی توزیع‌های تخمینی و عملی برای زمان ورود یک قطار مشخص در ایستگاه [۱۱]

نمودار (۲-۱) احتمال تجمعی توزیع‌های تخمینی و عملی برای زمان ورود یک قطار مشخص را در ایستگاه

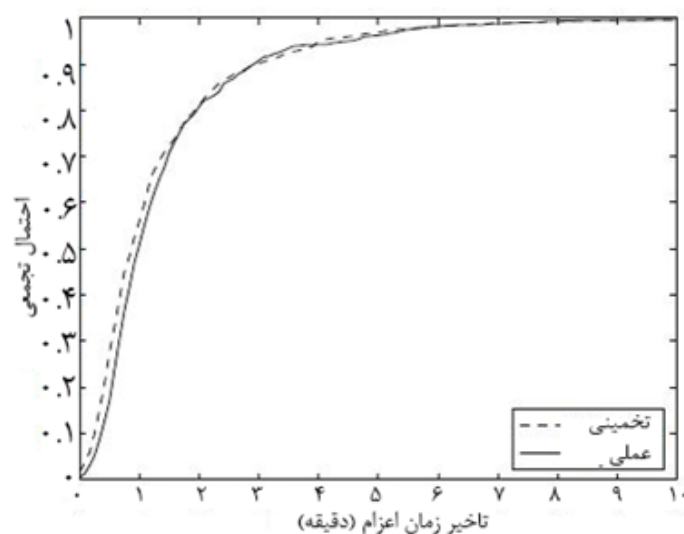
مورد بررسی نشان می‌دهد. تفاوت بین احتمال تجمعی عملی و تخمینی در تأخیرهای ۱، ۲، ۳ دقیقه، به ترتیب برابر

با ۸ درصد، ۳ درصد و ۰ می‌باشد. این نشان‌دهنده‌ی میزان دقت مدل ارائه شده می‌باشد.

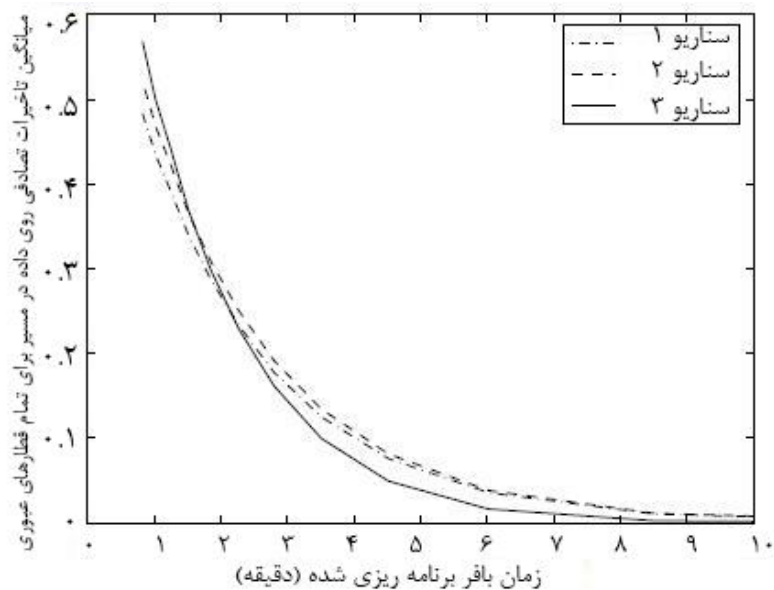
نمودار (۲-۲) احتمال تجمعی توزیع‌های تخمینی و عملی برای زمان اعزام یک قطار مشخص را در ایستگاه

مورد بررسی نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود توزیع‌های تخمین زده شده نسبت به آنچه که در عمل

اتفاق افتاده بسیار نزدیک می‌باشند.



نمودار (۲-۲): احتمال تجمعی توزیع‌های تخمینی و عملی برای زمان اعزام یک قطار مشخص [۱۱]



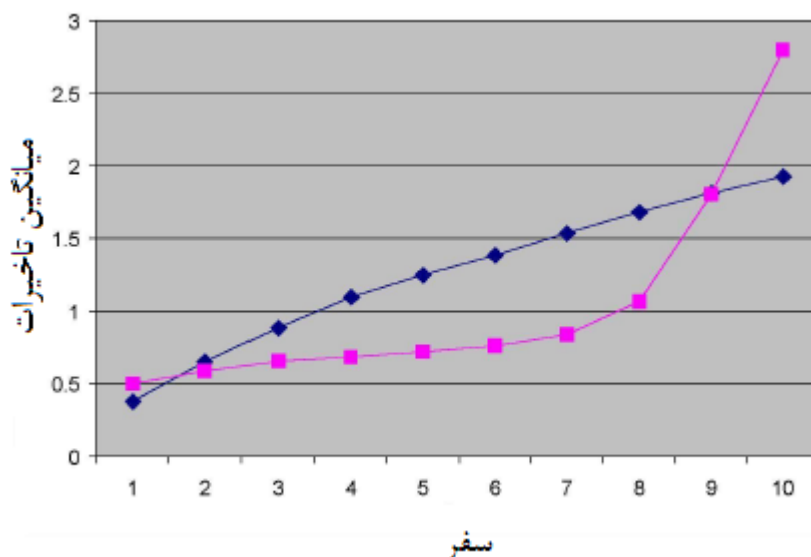
نمودار (۲-۳): میانگین تاخیرات تصادفی رویداده در مسیر برای تمام قطارهای عبوری بر حسب میزان زمان بافر برنامه ریزی شده تحت سه سناریوی متفاوت [۱۱]

نمودار (۲-۳) نیز میانگین تاخیرات تصادفی رویداده به دلیل اثرات متقابل قطارها، برای تمام قطارهای عبوری بر حسب میزان زمان بافر برنامه ریزی شده، تحت سه سناریوی متفاوت را نشان می دهد. مشاهده می شود که به طور کلی با افزایش میزان زمان بافر، میانگین تاخیراتی که باعث اختلال در برنامه زمان بندی می شوند به صورت نمایی کاهش می یابد. همانطور که دیده می شود، در صورتی که زمان های بافر برنامه ریزی شده به طور تقریبی ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شود، آن گاه تحت تمام سناریوها، تاخیرات به عدد صفر میل پیدا خواهد کرد [۱۱].

در مقاله ی کرون^۱ و همکاران [۱۲] به مسئله ی زمان بندی حرکت قطارها، تحت یک رویکرد مدل سازی احتمالی پرداخته شده است. در این مقاله یک مدل بهینه سازی احتمالی برای یافتن بهترین تخصیص برای زمان های مکمل یا جبرانی که یک قطار باید در یک سری از سفرها داشته باشد، ارائه می شود. هدف این مدل، کمینه کردن

^۱Kroon

میانگین تاخیر قطار، در این سری از سفرها می‌باشد. یکی از خروجی‌های ارائه شده در این مقاله نمودار (۴-۲) می‌باشد.



نمودار (۴-۲): میانگین تاخیرات تصادفی در پایان هر سفر برای ۱۰ قطار [۴]

این نمودار رابطه‌ی بین سفر و میانگین تاخیرات را نشان می‌دهد. خط محدب رسم شده از تخصیص نسبی زمان‌های مکمل بدست آمده است. خط مقعر نشان‌دهنده‌ی تخصیص بهینه‌ی زمان‌های مکمل می‌باشد. همانگونه که مشخص است در اکثر سفرها تخصیص بهینه دارای میزان تاخیرات کمتری نسبت به تخصیص نسبی زمان‌های مکمل است. اما در سفر آخر این موضوع متفاوت است و تاخیرات روی داده برای سفر آخر در تخصیص بهینه از تخصیص نسبی بزرگتر است. مقاله دلیل این امر را این موضوع می‌داند که مدل برای بهینه کردن تخصیص زمان‌های مکمل، این زمان را از سفر آخر به سفرهای قبلی انتقال می‌دهد [۱۲].

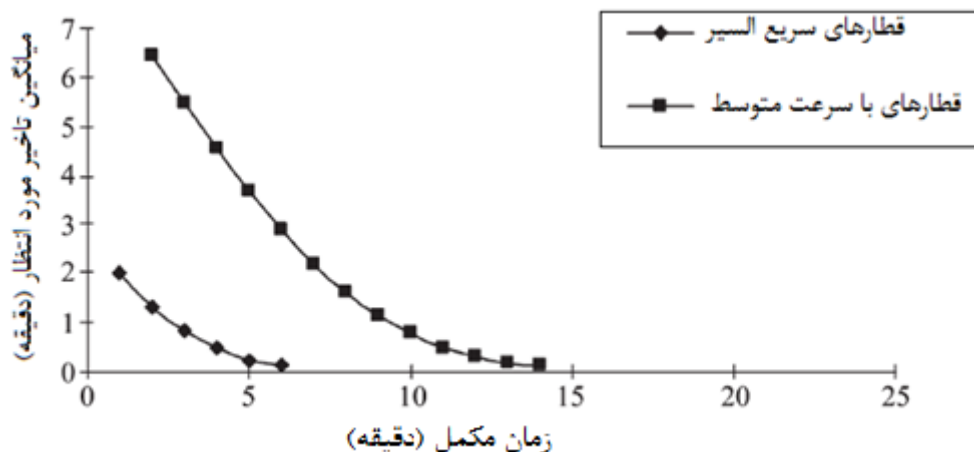
کرون و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۸ به بهبود مدل قبلی خود در زمینه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها پرداخته‌اند. در این مقاله یک مدل احتمالی ارائه شده است که میانگین وزنی تاخیر تمام قطارها را از طریق تخصیص زمان‌های بافر کمینه می‌کند. مدل ارائه شده در این مقاله ترکیبی از مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی می‌باشد.

این مقاله با پیاده‌سازی مدل احتمالی مذکور و در نظر گرفتن مورد مطالعاتی به مقایسه جدول زمان‌بندی بدست آمده از حل مدل و جدول زمان‌بندی موجود در مورد مطالعاتی می‌پردازد. مقاله عنوان می‌کند در مواردی که اختلالات کوچکتری اتفاق می‌افتد، جدول زمان‌بندی بدست آمده توسط مدل بهتر می‌تواند در مقابل این اختلالات عمل کند و دچار تاخیرات کمتری می‌شود. اما هنگامی که این اختلالات، مقادیر بزرگتری داشته باشند، تفاوت چندان چشمگیری بین جدول زمان‌بندی بدست آمده از حل مدل و جدول زمان‌بندی موجود وجود ندارد [۱۳].

در سال ۲۰۱۰ خان^۱ و ژو^۲ [۱۴] مقاله‌ای را با موضوع "مدل بهینه‌سازی احتمالی و الگوریتم حل برای مسئله رباست زمان‌بندی حرکت قطار دو مسیر" ارائه کردند. این مقاله یکی از مهم‌ترین مقالات ارائه شده در زمینه برنامه‌ریزی احتمالی است که یک مدل ریکورس دو مرحله‌ای زمان‌بندی قطار را ارائه کرده است. مدل ارائه شده مدلی است که از آن برای ارائه‌ی مدل نهایی ارائه شده در پروژه‌ی حاضر استفاده شده است. همانطور که در فصل پیش عنوان شد، اساس مدل‌های دو مرحله‌ای به گونه‌ای است که در مرحله‌ی اول تصمیم‌گیری می‌شود و در مرحله‌ی دوم تصمیم ارائه شده در مرحله‌ی اول پس از مشخص شدن برخی از شرایط اصلاح می‌شود. در این مدل ابتدا در مرحله‌ی اول جدول زمان‌بندی x با معیار حداقل کردن زمان‌های سفر بدست می‌آید. سپس در مرحله‌ی دوم با تعیین زمان‌های سیر بلاک تحت سناریوهای متفاوت، زمان‌های سناریویی رسیدن به مقصد مشخص می‌شود. در واقع در این مرحله مدل زمان‌های سناریویی رسیدن به مقصد را طوری تعیین می‌کند که فاصله بین این زمان‌ها و زمان‌های برنامه‌ریزی شده به حداقل برسد و در نتیجه میزان تاخیرات برنامه‌ای به حداقل برسد. این مدل با تعریف مفهوم زمان‌های مکمل سعی در کاهش زمان‌های تاخیر دارد. زمان‌های مکمل، زمان‌هایی

^۱ Khan
^۲ Zhou

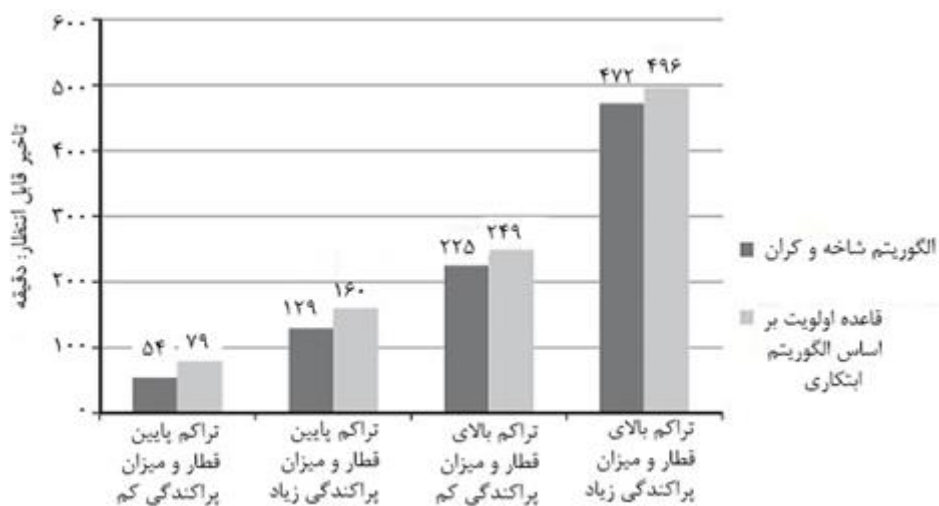
هستند که به عنوان ضربه گیر در برابر نوسانات سیر بلاک ها عمل کرده و باعث از بین رفتن تاخیرات احتمالی می شوند. هر چه قدر میزان زمان های مکمل در مدل افزایش یابد میزان تاخیرات کاهش می یابد.



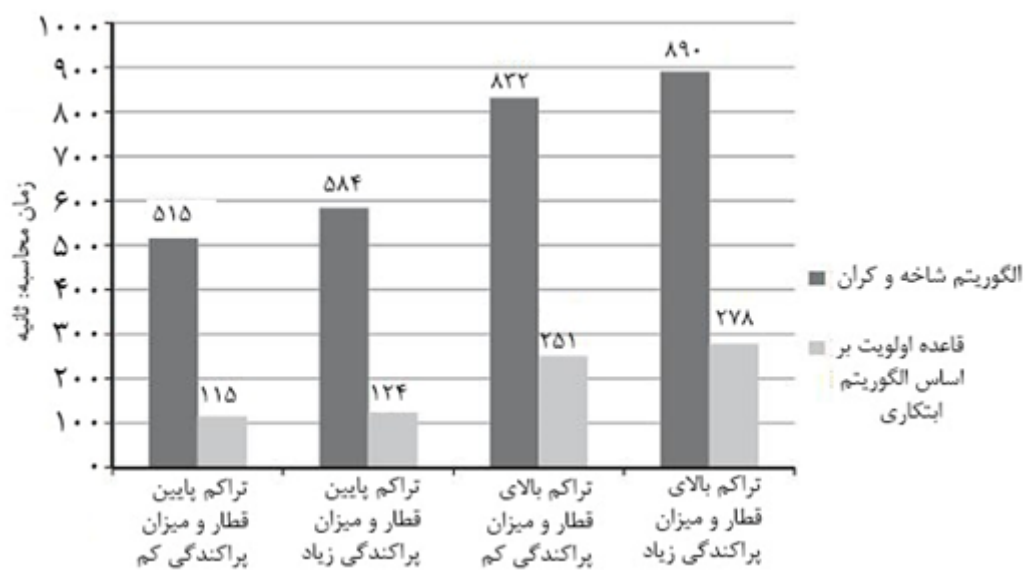
نمودار (۵-۲): رابطه میان میانگین تاخیرات مورد انتظار و زمان های مکمل [۱۴]

اما در عوض میزان زمان های سفر افزایش می یابد. بنابراین در واقع این مدل به یک مدل برای پیدا کردن زمان های مکمل برای رسیدن به یک تعادل بین زمان های تاخیر و زمان های سفر مبدل می شود. این مقاله برای حل مدل نیز یک راه حل ابتکاری ارائه می دهد و در نهایت نیز روند حل آن ها در کنار مثال های تصویری با داده هایی از کریدور ریلی پرسرعت چین به همراه نتایج عددی ارائه شده است. نمودار (۵-۲) یکی از نمودارهایی است که به عنوان خروجی مدل ارائه شده است. همانگونه که در این نمودار دیده می شود به ازای افزایش ۱۵ دقیقه ای زمان های مکمل میزان تاخیرات در قطارهای سریع السیر تقریباً صفر می شود. این مقدار برای قطارهای با سرعت متوسط ۵ دقیقه است و این نشان از آن دارد که میزان تاخیرات و یا به عبارتی نوسانات حاصل از سیر بلاک ها برای قطارهای با سرعت متوسط بیشتر می باشد [۱۴].

در سال ۲۰۱۱ منگ^۱ و ژو [۱۵] به ارائه‌ی مقاله‌ای پرداختند که در آن یک مدل برای زمان‌بندی حرکت قطارها تحت شرایط پویا و احتمالی ارائه کرده‌اند. این مقاله سناریوهای مختلف احتمالی را تحت رویکرد برنامه‌ریزی غلطان برای رسیدن به دو هدف معرفی می‌کند. ۱. شناسایی عدم اطمینان در داده‌های ورودی در ارتباط زمان‌های کاری و بیکاری پیش‌بینی شده قطارها ۲. شناسایی امکان مجدد زمان‌بندی بعد از دریافت اطلاعات به روز شده، این مقاله به ارائه‌ی مدلی می‌پردازد که به صورت دوره‌ای، زمان‌بندی‌ها را برای یک دوره‌ی بلند زمانی بهینه می‌کند. در ادامه نتایج برخی از مطالعات مؤلفان مقاله به صورت نمودار نمایش داده شده است. نمودار (۲-۶) تاثیر کیفیت روش‌های حل بر روی کیفیت جواب‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در هر ۴ حالت در نظر گرفته شده الگوریتم شاخه و کران جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم ابتکاری تولید می‌نماید. اما نکته‌ای که حائز اهمیت است زمان حل و به جواب رسیدن هر کدام از الگوریتم‌هاست. با توجه به نمودار (۷-۲) کاملاً مشخص است که زمان به جواب رسیدن الگوریتم ابتکاری ارائه شده در مقاله مورد بررسی بسیار کوتاه‌تر است، اگرچه این الگوریتم جواب‌های بدتری نسبت به الگوریتم شاخه و کران تولید می‌نماید، اما این تفاوت در جواب‌ها تا حدی قابل چشم‌پوشی است. اما تفاوت زمان‌های محاسباتی چشمگیر است و در الگوریتم ابتکاری ارائه شده بسیار کم‌تر می‌باشد. در نهایت مؤلفان این مقاله به ارائه‌ی نتایج حاصل از تحقیقات خود می‌پردازند و این گونه نتیجه‌گیری می‌کنند که حل کردن این مدل احتمالی بهتر از حل کردن یک مدل قطعی با داده‌های از پیش تعیین شده است [۱۵].



نمودار (۶-۲): اثرات روش‌های حل بر روی کیفیت جواب‌ها [۱۵]



نمودار (۷-۲): زمان محاسباتی الگوریتم‌های حل [۱۵]

مقاله‌ی دیگری که در زمینه‌ی زمان‌بندی احتمالی حرکت قطارها ارائه شده است، مقاله‌ی نیو^۱ و منگ [۱۶] می‌باشد که در سال ۲۰۱۴ به چاپ رسیده است. این مقاله نیز به مانند مدل خان و ژو، یک مدل زمان‌بندی دو مرحله‌ای را ارائه می‌کند. مدل ریاضی ارائه شده به گونه‌ای است که در مرحله‌ی اول به دنبال کمینه کردن زمان‌های مکمل می‌باشد. زمان‌های مکمل در واقع زمان‌هایی هستند که به ازای هر ایستگاه و برای هر قطار تخصیص داده می‌شوند و هدف از این کار این است که این زمان‌ها به مانند ضربه گیر عمل کرده و از اتفاقاتی که منجر به برهم خوردن نظم جدول زمان‌بندی می‌شوند، جلوگیری کنند. مرحله‌ی دوم مدل نیز به دنبال کمینه کردن تاخیرات روی داده حاصل از زمان‌بندی در مرحله‌ی اول می‌باشد که این تاخیرات برابر با اختلاف زمان‌های ورود برنامه‌ای و سناریویی است. روش حل انتخابی مولفان این مقاله برای مدل ارائه شده نیز استفاده از الگوریتم ژنتیک بوده است. مولفان دلیل این امر را پیچیدگی مدل ارائه شده و زمان حل طولانی با الگوریتم‌های دقیق و همچنین مزیت‌های ویژه الگوریتم ژنتیک از جمله انعطاف‌پذیری و سرعت بالای به جواب رسیدن می‌دانند. همچنین مدل ارائه شده به طور عملی در خطوط پرسرعت شهر گوانگ ژو^۲ پیاده‌سازی شده است. ترکیب قابلیت اطمینان و کاهش کل زمان سفر از اهدافی است که مولفان به عنوان مطالعات آینده از آن یاد کرده‌اند [۱۶].

۲-۸-۱- دسته‌بندی منابع

جدول زیر خلاصه‌ای از مقالات و تحقیقاتی را نشان می‌دهد که در زمینه‌ی کاربرد برنامه‌ریزی احتمالی در موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها منتشر شده است. همانطور که مشخص است، تمام مطالعاتی که در زمینه‌ی

Nio^۱
Guangzhou^۲

موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه ریزی احتمالی انجام شده است، در سال‌های اخیر صورت گرفته است. این مطلب حاکی از جدید بودن و البته کم بودن مطالعات صورت گرفته در این زمینه است.

جدول (۲-۲): خلاصه مقالات منتشر شده مرتبط با برنامه‌ریزی احتمالی در حمل‌ونقل ریلی

ردیف	سال	عنوان	خلاصه	شماره مرجع
۱	۲۰۰۷	بهینه‌سازی ظرفیت استفاده از ایستگاه‌ها از طریق تخمین تاخیرات قطارها	این مقاله یک مدل احتمالی در ارتباط با توزیع تاخیرات در ایستگاه‌ها ارائه می‌دهد.	[۱۱]
۲	۲۰۰۷	زمان‌بندی دوره‌ای قطارها: با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی	این مقاله یک مدل در ارتباط با کمینه کردن میانگین تاخیر قطارها ارائه می‌کند.	[۱۲]
۳	۲۰۰۸	بهبود احتمالی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها	این مقاله یک مدل احتمالی ارائه می‌دهد که میانگین وزنی تاخیر تمام قطارها را از طریق تخصیص زمان‌های بافر کمینه می‌کند.	[۱۳]

۴	۲۰۱۰	مدل بهینه‌سازی احتمالی و راه‌حل ابتکاری رباست برای مسیرهای دوخطه مسئله‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها	در این مقاله یک مدل ریکورس دو مرحله‌ای زمان‌بندی قطارها با هدف کاهش تاخیرات ارائه شده است.	[۱۴]
۵	۲۰۱۱	یک مدل رباست اعزام قطارها تحت شرایط پویا و احتمالی	در این مقاله یک مدل برای زمان‌بندی حرکت قطارها تحت شرایط پویا و احتمالی ارائه شده است.	[۱۵]
۶	۲۰۱۴	بهینه‌سازی تخصیص زمان‌های مکمل در زمان‌بندی حرکت قطارها: یک مدل احتمالی دو مرحله‌ای ریکورس	این مقاله یک مدل زمان‌بندی دو مرحله‌ای را با هدف کاهش زمان‌های تاخیر از طریق تخصیص بهینه‌ی زمان‌های مکمل ارائه می‌کند.	[۱۶]

فصل ۳: مدل ریاضی

مسئله و حل مدل های

موجود و بررسی نتایج

۳-۱- مقدمه‌ای بر مدل ریاضی مسئله

در فصل دوم ادبیات موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها بررسی شد. همانطور که دیده شد در زمینه‌ی موضوع برنامه‌ریزی احتمالی و در حوزه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها تاکنون مدل‌های نسبتاً کمی ارائه شده است. در میان مدل‌های ارائه شده نیز دو مدل وجود دارند که مستقیماً به مدل‌سازی ریکورس زمان‌بندی حرکت قطارها می‌پردازند. یکی از این مدل‌ها مدل آقایان خان و ژو [۱۴] می‌باشد. مولفان این مقاله با استفاده از برنامه‌ریزی ریکورس دو مرحله‌ای یک مدل زمان‌بندی برای خطوط راه‌آهن دو خطه ارائه نموده‌اند. مدل دیگری که در برنامه‌ریزی احتمالی ارائه شده است مدل آقایان نیو و منگ [۱۶] می‌باشد. که به لحاظ ساختاری، ساختار بسیار مشابهی با مدل آقایان خان و ژو دارد. مدل نهایی ارائه شده در این پروژه نیز با الهام از مدل آقایان خان و ژو [۱۴] ارائه شده است. در واقع در این پروژه سعی شده است تا با بهبود مدل‌های مذکور و بومی‌سازی آن‌ها مدلی متناسب با راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران ارائه گردد. لذا برای هم خوانی این موضوع مدل ارائه شده توسط دکتر آقای [۱۷] به عنوان مدل پایه انتخاب شده است و با توجه به رویکردهایی مدل‌هایی که عدم قطعیت رو بررسی نموده اند مدلی ارائه شده است که به زمان‌بندی حرکت قطار در شرایط عدم قطعیت می‌پردازد.

۳-۵- مدل کلی مساله برنامه ریزی حرکت قطارها

۳-۵-۱- کلیات مدل

- مسیری که می خواهیم برای آن زمانبندی حرکت قطارها را انجام دهیم به صورت یک خطه است که می تواند بعضی از قسمت های آن دو خطه باشد، بنابراین کل مسیر به دو بخش مسیر یک خطه ($P1$) و مسیر دو خطه ($P2$) تقسیم می شود.
- $P = \{P1 + P2\}$
- در این مسیر دودسته قطار وجود دارد که از ایستگاههای ابتدایی و انتهایی وارد شبکه می شوند و تمام مسیر را طی می کنند.
- قطارهای جنوبی (قطارهایی که از ایستگاه مقصد یا SL وارد شبکه می شوند):
- $I = \{1, 2, \dots, m\}$
- و قطارهای شمالی (قطارهایی که از ایستگاه مبدا وارد شبکه می شوند):
- $J = \{1, 2, \dots, n\}$
- ایستگاههای موجود در طول مسیر به صورت $S = \{1, 2, \dots, S_L\}$ نمایش داده می شوند. و جهت سهولت، بلاکها نیز به نام ایستگاه پایینی مربوط به خود نامیده می شوند و در حالت کلی با علامت K نمایش داده می شوند.
- ایستگاه مبدا قطار شمالی i به صورت O_i و ایستگاه مقصد آن به صورت D_i نمایش داده می شود.
- ایستگاه مبدا قطار جنوبی i به صورت O_i و ایستگاه مقصد آن به صورت D_i نمایش داده می شود.

۳-۶- مدل مرحله ی اول

۳-۶-۱- پارامترها

جدول (۳-۱) پارامتر های مساله

$STS_{i,k}$	زمان توقف اجباری (برنامه ریزی شده) قطار جنوبی i در ایستگاه k
$STN_{j,k}$	زمان توقف اجباری (برنامه ریزی شده) قطار شمالی j در ایستگاه k
$ESTS_i$	زودترین زمان ممکن برای حرکت قطار جنوبی i از ایستگاه مبدا SL
$LSTS_i$	دیرترین زمان ممکن برای حرکت قطار جنوبی i از ایستگاه مبدا SL
$ESTN_j$	زودترین زمان ممکن برای حرکت قطار شمالی j از ایستگاه مبدا $S1$
$LSTN_j$	دیرترین زمان ممکن برای حرکت قطار شمالی j از ایستگاه مبدا $S1$
PTS_i	حداکثر طول زمان سفر قطار جنوبی i از مبدا تا مقصد (زمان سیر)
PTN_j	حداکثر طول زمان سفر قطار شمالی j از مبدا تا مقصد (زمان سیر)
WS_i	ضریب جریمه تاخیر برای قطار جنوبی i
WN_j	ضریب جریمه تاخیر برای قطار شمالی j

۳-۶-۲- متغیرهای تصمیم

متغیرهای مساله به دو دسته تقسیم می شوند:

دسته اول: متغیرهای پیوسته و بیانگر زمان رسیدن و حرکت قطارها از ایستگاهها

جدول (۳-۲): متغیرهای پیوسته‌ی مدل قطعی (مرحله اول)

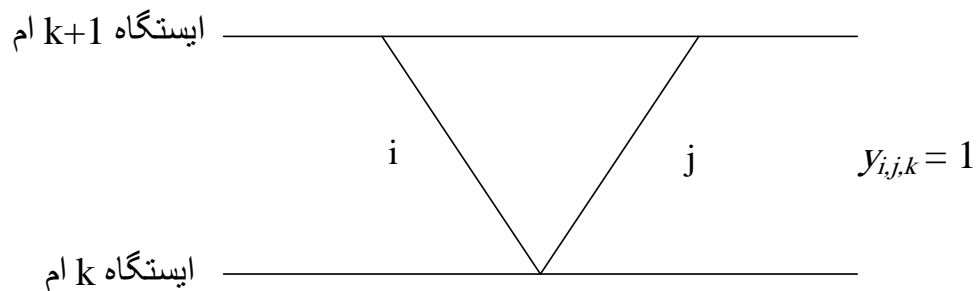
$DS_{i,k}$	زمان حرکت قطار جنوبی i از ایستگاه k
$AS_{i,k}$	زمان رسیدن قطار جنوبی i به ایستگاه k
$DN_{j,k}$	زمان حرکت قطار شمالی j از ایستگاه k
$AN_{j,k}$	زمان رسیدن قطار شمالی j به ایستگاه k

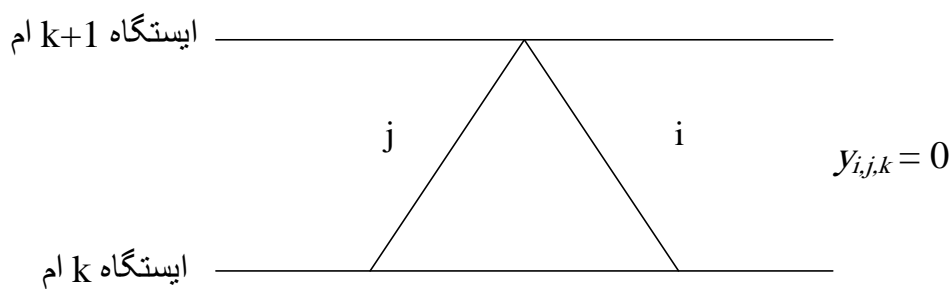
دسته دوم: متغیرهای صفر و یک

جدول (۳-۳): متغیر دودویی مدل قطعی (مرحله اول)

$Y_{i,j,k}$	مقدار یک می شود، اگر قطار جنوبی i زودتر از قطار شمالی j از بلاک k ام عبور کند، و در غیر اینصورت صفر می شود.
-------------	---

اشکال زیر چگونگی مقدار گیری متغیر دودویی را بهتر نمایش می دهند.





نمودار (۳-۲) نحوه ورود به بلاک

۳-۶-۳- تابع هدف مدل قطعی

$$\text{Min } Z = \sum_i WS_i (AS_{i.D_i} - DS_{i.O_i}) + \sum_j WN_j (AN_{j.D_j} - DN_{j.O_i})$$

قسمت اول و دوم تابع هدف، زمان سیر قطار با توجه به اولویت را حداقل می کند.

۳-۶-۴- محدودیت های مدل قطعی

محدودیت ۱ و ۲:

زمان شروع حرکت قطار به صورت یک بازه مشخص می شود و زمان دقیق آن توسط مدل بدست می آید. این

بازه زمانی به صورت زودترین زمان و دیرترین زمان ممکن برای اعزام قطار تعریف می شود.

$$ESTS_i \leq DS_{i.O_i} \leq LSTS_i$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$ESTN_j \leq DN_{j.O_j} \leq LSTN_j$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

محدودیت ۳ و ۴:

محدودیت تلاقی برای قطارهای که در خلاف جهت هم حرکت می کنند وجود دارد.

$$DS_{i,k+1} \geq AN_{j,k+1} - B^* y_{i,j,k}$$

$$DN_{j,k} \geq AS_{i,k} - B^*(1 - y_{i,j,k})$$

$$i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, SL - 1, k \in P1$$

محدودیت ۵ و ۶:

محدودیت جلوگیری از تلاقی برای قطارهای که در یک جهت حرکت می کنند.

$$DS_{i+1,k+1} \geq AS_{i,k}$$

$$i = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, SL - 1, k \in P1$$

$$DN_{j+1,k} \geq AN_{j,k+1}$$

$$j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, SL - 1, k \in P1$$

محدودیت ۷ و ۸:

بر اساس حداقل و حداکثر سرعت قطارها در بلاکها، زمان سیر بلاک در بلاکها نمی توان از یک حدی بیشتر و

یا از یک حدی کمتر باشد.

$$AS_{i,k} - DS_{i,k+1} = PTS_{i,k}$$

$$i = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, SL - 1$$

$$AN_{j,k-1} - DN_{j,k} = PTN_{j,k}$$

$$i = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, SL - 1$$

محدودیت ۹ و ۱۰:

محدودیت دیگر در مورد زمان تاخیرات برنامه ریزی شده ی قطار در هر ایستگاه است این زمان برای ادای نماز و سوختگیری و... در نظر گرفته می شود.

$$DS_{i,k} \geq AS_{i,k} + STS_{i,k}$$

$$DN_{j,k} \geq AN_{j,k} + STS_{j,k}$$

محدودیت های باینری بودن و مثبت بودن متغیرها

$$Y = \{0,1\}$$

$$DN > 0 \text{ AN, DS, AS,}$$

۳-۲- مدل مرحله ی دوم

جدول (۳-۴) : پارامترهای مدل احتمالی (مرحله دوم)

احتمال رخ دادن سناریوی ω	$P(\omega)$
تاخیر عملیاتی قطار جنوبی i از ایستگاه مبدا $O(i)$ طبق سناریوی ω	$\delta_{i,\omega}$
تاخیر عملیاتی قطار شمالی j از ایستگاه مبدا $O(j)$ طبق سناریوی ω	$\delta_{j,\omega}$
مدت زمان عملیاتی عبور قطار جنوبی i از بلاک k طبق سناریوی ω	$PTS_{i,k,\omega}$
مدت زمان عملیاتی عبور قطار شمالی j از بلاک k طبق سناریوی ω	$PTN_{j,k,\omega}$
زمان توقف عملیاتی قطار جنوبی i در ایستگاه k طبق سناریوی ω	$STS_{i,k,\omega}$
زمان توقف عملیاتی قطار شمالی j در ایستگاه k طبق سناریوی ω	$STN_{j,k,\omega}$

متغیرهای مساله به دو دسته تقسیم می شوند:

دسته اول: متغیرهای پیوسته و بیانگر زمان رسیدن و حرکت قطارها از ایستگاهها

جدول (۳-۵) : متغیرهای مدل احتمالی (مرحله دوم)

زمان حرکت قطار جنوبی i از ایستگاه k طبق سناریوی ω	$DS_{i,k,\omega}$
زمان رسیدن قطار جنوبی i به ایستگاه k طبق سناریوی ω	$AS_{i,k,\omega}$
زمان حرکت قطار شمالی j از ایستگاه k طبق سناریوی ω	$DN_{j,k,\omega}$
زمان رسیدن قطار شمالی j به ایستگاه k طبق سناریوی ω	$AN_{j,k,\omega}$
مقدار یک می شود، اگر قطار جنوبی i زودتر از قطار شمالی j از بلاک k ام عبور کند، و در غیر اینصورت صفر می شود.	$Y_{i,j,k,\omega}$

۳-۷-۳- تابع هدف مرحله دوم

$$\text{Min } Z = \sum_{\omega} P(\omega) \left(\sum_i PS_i (AS_{i,D_i,\omega} - AS_{i,D_i}) + \sum_j PN_j (AN_{j,D_j,\omega} - AN_{j,D_j}) \right)$$

قسمت اول تابع هدف مربوط به انحراف از برنامه به دست آمده برای قطارهای جنوبی با ضریب جریمه

PS_i و قسمت دوم مربوط به انحراف از برنامه به دست آمده برای قطارهای شمالی با ضریب جریمه PN_j می باشد.

همچنین کل تابع در احتمال رخداد هر سناریو ضرب شده است.

۳-۷-۴- محدودیت های مرحله دوم

محدودیت ۱ و ۲:

زمان شروع از ایستگاه مبدأ طبق هر سناریو ای باید برابر با زمان برنامه ای و مقداری تصادفی باشد که طبق آمار گذشته بدست می آید.

$$DS_{i.O_i.\omega} = DS_{i.O_i} + \delta_{i.\omega} \quad \forall i.\omega$$

$$DN_{j.O_j.\omega} = DN_{j.O_j} + \delta_{j.\omega} \quad \forall j.\omega$$

محدودیت ۳ و ۴:

محدودیت تلاقی برای قطارهایی که طبق هر سناریو در خلاف جهت هم حرکت می کنند.

$$DS_{i.k+1.\omega} \geq AN_{j.k+1.\omega} - B * y_{i.j.k.\omega} \quad \forall i.j.k \neq sl.\omega$$

$$DN_{j.k.\omega} \geq AS_{i.k.\omega} - B * (1 - y_{i.j.k.\omega}) \quad \forall i.j.k \neq sl.\omega$$

محدودیت ۵ و ۶:

محدودیت جلوگیری از سبقت برای قطارهایی که طبق هر سناریو در یک جهت حرکت می کنند.

$$DS_{i+1.k+1.\omega} \geq AS_{i.k.\omega} \quad \forall i.k \neq sl.\omega$$

$$DN_{j+1.k.\omega} \geq AN_{j.k+1.\omega} \quad \forall j.k \neq sl.\omega$$

محدودیت ۷ و ۸:

زمان سیر در بلاک ها طبق هر سناریو باید برابر با مقدار تصادفی حاصل از آمار گذشته باشد.

$$AS_{i.k.\omega} - DS_{i.k+1.\omega} = PTS_{i.k.\omega} \quad \forall i.k \neq sl.\omega$$

$$AN_{j.k.\omega} - DN_{j.k+1.\omega} = PTN_{j.k.\omega} \quad \forall j.k \neq sl.\omega$$

محدودیت ۹ و ۱۰:

محدودیت مربوط به زمان تأخیرات برنامه‌ریزی‌شده‌ی قطار طبق هر سناریو در هر ایستگاه. این زمان محدودیت برای ادای نماز و سوختگیری و... در نظر گرفته می‌شود.

$$DS_{i.k,\omega} \geq AS_{i.k,\omega} + STS_{i.k,\omega} \quad \forall i.k \neq sl.\omega$$

$$DN_{j.k} \geq AN_{j.k,\omega} + STN_{j.k} \quad \forall j.k \neq sl.\omega$$

محدودیت ۱۱ و ۱۲:

از آنجا که بلیط‌های مسافران بر اساس زمان‌های برنامه‌ریزی شده (مرحله اول) صادر شده است بنابراین زمان‌های اعزام قطارها از ایستگاه‌های که توقف برنامه‌ای دارند در عمل نمی‌تواند از زمان برنامه‌ای کوچکتر باشد.

$$DS_{i.k,w} \geq DS_{i.k} \quad \forall i.k \neq sl.\omega$$

$$DN_{j.k,w} \geq DN_{j.k} \quad \forall j.k \neq sl.\omega$$

محدودیت‌های باینری بودن و مثبت بودن متغیرها

$$Y = \{0,1\}$$

$$DN > 0 \text{ AN, DS, AS,}$$

۸-۳- اطلاعات مسالهی موردی

- برای این مدل مثال موردی محور جنوب راه آهن ایران مورد بررسی قرار گرفته که مفروضاتی به صورت زیر دارد:
- در محور تهران- جنوب ۵۲ ایستگاه و در نتیجه ۵۱ بلاک با طولهای متفاوت وجود دارد.
- ۳ بلاک اولیه این مسیر یعنی از تهران تا شهریار دو خطه بوده و مابقی مسیر یک خطه است.
- ۹ قطار از تهران به سمت جنوب (قطار شمالی) و ۹ قطار از جنوب به سمت تهران (قطار جنوبی) به صورت روزانه در حرکت است.
- برای هر قطار شماره قطار، ایستگاه مبدا، ایستگاه مقصد و زمان شروع حرکت از ایستگاه مبدا داده شده است.
- زمان شروع حرکت قطارها از ایستگاه مبدا زمان از ۱۲ نیمه شب به دقیقه می باشد.
- در هر لحظه تنها یک قطار می تواند وارد بلاک شود، سبقت قطارها از یکدیگر مجاز نمی باشد.

۹-۳- حل مدل

- مدل زمانبندی حرکت قطارها برای محور جنوب راه آهن ایران در سه گام به صورت زیر توسط نرم افزار GAMS حل شده است:

۳-۹-۱- گام اول: حل مدل زمانبندی به صورت قطعی

در این گام مدل قطعی داده شده (مدل مرحله اول) با استفاده از پارامترهای قطعی مدل نویسی و حل شده است.

۳-۹-۲- گام دوم: حل مدل احتمالی با مقادیر ثابت زمان‌های برنامه‌ریزی شده

در این گام زمان‌های برنامه‌ریزی شده‌ی حاصل از حل مدل قطعی به صورت پارامتر ورودی برای مدل احتمالی در نظر گرفته شده و فقط مدل مرحله دوم احتمالی حل شده است.

پارامترهای احتمالی برای این مرحله و مرحله بعد با استفاده از توزیع‌های احتمالی و با توجه به آمار گذشته در ۲۰ سناریوی مختلف شبیه‌سازی شده‌اند، احتمال رخداد تمام سناریوها برابر با مقدار ۰/۰۵ می‌باشد. همچنین در این مرحله ضرایب کلیه قطارها در تابع هدف برابر با عدد ۱ در نظر گرفته شده است.

۳-۹-۳- گام سوم: حل مدل احتمالی به صورت دو مرحله‌ای

در این گام مدل احتمالی دو مرحله‌ای حل می‌شود، تمام متغیرهای تصمیم مرحله یک نیز مجهول می‌باشند. اطلاعات مورد نیاز همان اطلاعات گام دوم می‌باشند. مدل احتمالی دوبار حل شده است، بار اول ضرایب تابع هدف کلیه قطارها در تابع هدف مرحله دوم مقدار ۱ و بار دوم این ضرایب ۳ در نظر گرفته شده است.

لازم به یادآوری است که دو دستور زیر برای محدود کردن زمان حل و گپ نسبی قبل از دستور Solve به مدل گمز اضافه شده است:

Option optcr=0.05;

Option reslim=1000000;

۳-۱۰- خروجی ها و نتایج

۳-۱۰-۱- نتایج گام اول

جدول (۳-۶) : تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارها در حالت قطعی

تاخیرات اعمال شده به قطارهای جنوبی		تاخیرات اعمال شده به قطارهای شمالی	
trs1	17	trn1	21
trs2	31	trn2	9
trs3	30	trn3	34
trs4	40	trn4	46
trs5	33	trn5	19
trs6	37	trn6	38
trs7	37	trn7	24
trs8	32	trn8	43
trs9	52	trn9	131

در جدول فوق برای هر قطار کل زمان تاخیر در ایستگاه ها که به زمان سیر آن اعمال شده، محاسبه شده است. در این تاخیرات شرایط احتمالی دیده نشده است یعنی نتایج بر گرفته از مدل Deterministic می باشد. لازم به ذکر است که این اعداد بیانگر زمان های توقف در مجموعه ای ایستگاه ها برای هر قطار است که در حین برنامه بر زمان سیر اضافه شده است یعنی:

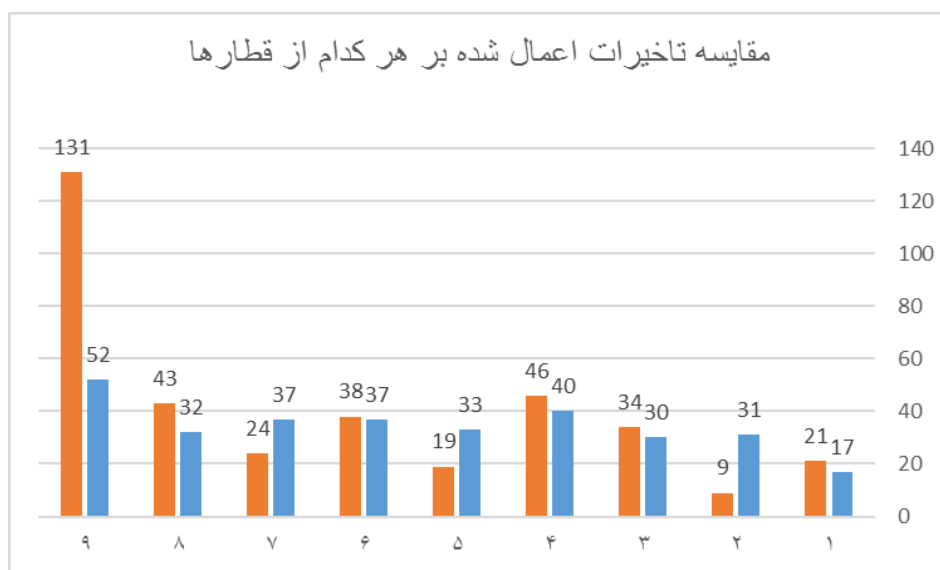
کل زمان های توقف اجباری- کل زمان های تاخیر در همه ی ایستگاه =تاخیرات اعمال شده

$$\text{تاخیرات اعمال شده بر قطار } i = \sum_{s=1}^{s52} (ds_{i,s} - as_{i,s}) - \sum_s sts_{i,s}$$

برای مثال تاخیرات اعمال شده بر قطار i ام طبق فرمول فوق محاسبه شده است.

در ادامه نمودار این تاخیرات آورده شده است که در این نمودار میتوان دید کلی به تاخیرات وارد شده به قطار ها داشت که نمودار های آبی رنگ بیانگر تاخیرات اعمال شده به قطارهای های جنوبی می باشد و نمودار های نارنجی رنگ قطارهای شمالی را نشان می دهند.

دلیل اختلافات می تواند ناشی از این امر باشد که چون مدل بر اساس مسیرهای تک خطه کار می کند، پس زمانی می توان یک قطار را به سمت ایستگاه بعدی اعزام نمود که قطاری که از جهت مخالف می آید به ایستگاه فعلی برسد و بلاک ما بین این دو ایستگاه آزاد شود و یا اینکه می تواند مبنی بر این موضوع باشد که زمانی می توان یک قطار را اعزام نمود که قطار قبلی به ایستگاه بعدی رسیده باشد و... پس دلیل اصلی همان عدم آزاد بودن بلاک یا مسیر ما بین ایستگاه فعلی و ایستگاه بعدی است.

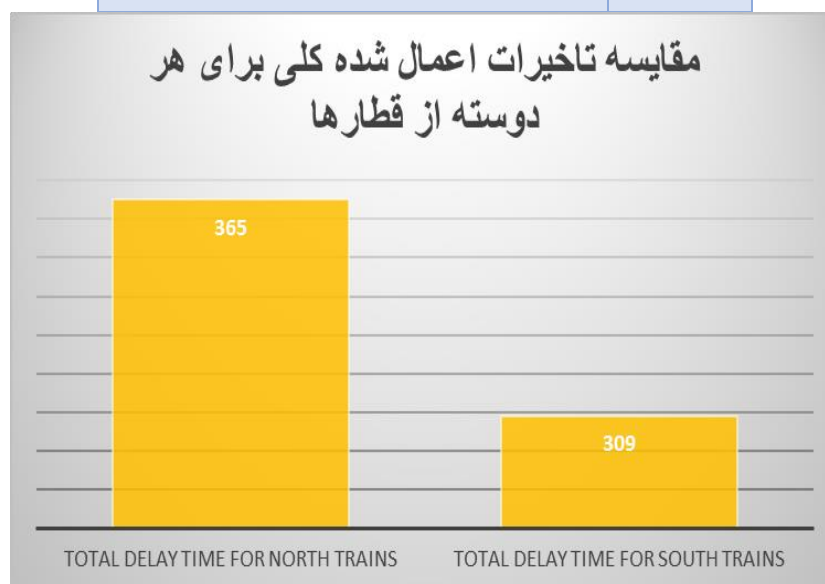


نمودار (۳-۳): مقایسه تاخیرات اعمال شده به قطارهای شمالی و جنوبی در حالت قطعی

جدول و نمودار بعدی نیز کل این تاخیرات را به ما نشان می دهند. یعنی تاخیرات اعمال شده به همه ی قطار های جنوبی و قطارهای شمالی.

جدول (۷-۳): مجموع تاخیرات عملیاتی برای دودسته قطار جنوبی و شمالی در حالت قطعی

Total delay time for south trains	309
Total delay time for north trains	365



نمودار (۴-۳): مقایسه تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارهای جنوبی و شمالی

نمودار فوق این موضوع را بیان می دارد که قطارهای شمالی تاخیرات بیشتری نسبت به قطارهای جنوبی به زمان سفرشان اضافه شده است.

لازم به ذکر است که هر کدام از این قطارها توقف اجباری دارند که بایستی حداقل به این مقدار در ایستگاه های میانی منتظر بمانند که چون این اعداد مقادیر ثابت و تحت عنوان توقف اجباری در داده های مساله آورده شده است لذا در اینجا نیز از آوردن این مقادیر خودداری میکنیم.

جدول (۸-۳): زمان سفر برای هر کدام از قطارها در حال قطعی

زمان سفر برای قطارهای جنوبی	زمان سفر برای قطارهای شمالی
جنوبی	شمالی

trs1	917	trn1	1018
trs2	1029	trn2	921
trs3	933	trn3	941
trs4	953	trn4	963
trs5	838	trn5	765
trs6	778	trn6	818
trs7	950	trn7	941
trs8	955	trn8	666
trs9	689	trn9	1058

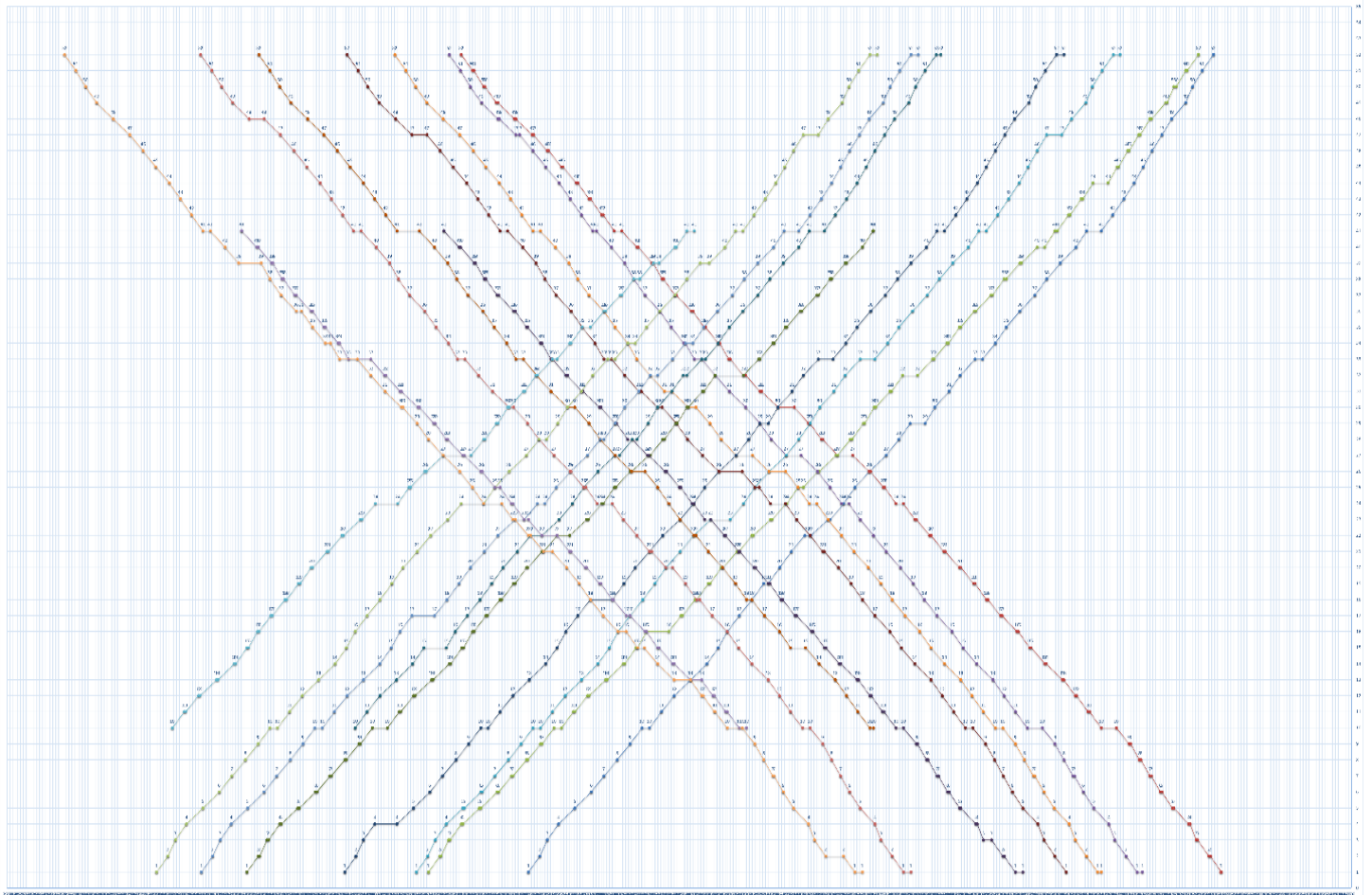
جدول فوق نیز بیانگر زمان سفر برای همه‌ی قطارهای شمالی و جنوبی می باشد. مجموع زمان سفر برای

همه‌ی قطارها برابر است با ۱۶۱۳۵ واحد زمانی که این عدد همان مقدار بهینه‌ی تابع هدف مدل Deterministic

با گپ ۵ درصد می باشد.

در ادامه نمودار اعزام و سیر همه‌ی قطارها تحت عنوان گراف زمان بندی حرکت قطارها آورده شده است که در

این نمودار محور عمودی نشان دهنده‌ی ایستگاه‌ها و محور افقی بیانگر زمان است.



نمودار (۳-۵): گراف حرکت قطارها در حالت قطعی

۳-۱۰-۲- نتایج گام دوم

با توجه به این که در مدل قطعی توجهی به رخداد های دنیای واقعی نمی شود لذا اگر بخواهیم زمان اعزام قطارها را بدون توجه به آنچه که در دنیای واقعی رخ می دهد برنامه ریزی کنیم طبیعتاً زمان رسیدن هر قطار به ایستگاه مقصد خود اختلافی با زمان رسیدن قطار در عمل خواهد داشت که در این گزارش از این امر تحت عنوان اختلاف عملیاتی یاد شده است.

با توجه به آنچه در فوق ذکر گردید می توان به این موضوع اشاره کرد که هدف از محاسبه ی مدل Second Stage به دست آوردن میزان اختلاف بین زمان برنامه ریزی با دنیای واقعی است یعنی اگر بخواهیم بدون توجه به آنچه که در واقعیت رخ می دهد برنامه ریزی کنیم زمان های رسیدن هر قطار با زمان های رسیدن قطار ها در واقعیت اختلافی خواهد داشت که این میزان اختلاف در مدل مذکور محاسبه می شود. همانطور که پیشتر نیز ذکر گردید از این اختلاف تحت عنوان تاخیرات عملیاتی یاد می شود که این اختلاف برابر است با 1453.05 واحد زمانی.

در این مدل خروجی های حاصل از مدل قطعی به عنوان ورودی های این مدل استفاده می شود تا اختلاف آن با عمل محاسبه گردد، چون این مدل در قبل نیز به طور کلی شرح داده شده است لذا در اینجا از آوردن جزئیات بیشتر خودداری می کنیم.

برای اینکه این مقدار را کاهش دهیم لازم است که مدلی ارائه گردد که در آن به رخداد های دنیای واقعی جهت برنامه ریزی توجه شود. پس به همین منظور از مدل دو مرحله ای^۱ استفاده شده است تا این اختلاف را به حداقل برساند.

۳-۱۰-۳- نتایج گام سوم

۳-۱۰-۳-۱- مدل گام سوم با ضریب ۱ برای تابع هدف مرحله دوم

همانطور که گفته شد هدف از این مدل این است که اختلافات عملیاتی را به حداقل برساند. در این مرحله ضریب بخش دوم تابع هدف برای کلیه قطارها برابر ۱ در نظر گرفته شده است که در ادامه نتایج حاصل از اجرای مدل آورده شده است.

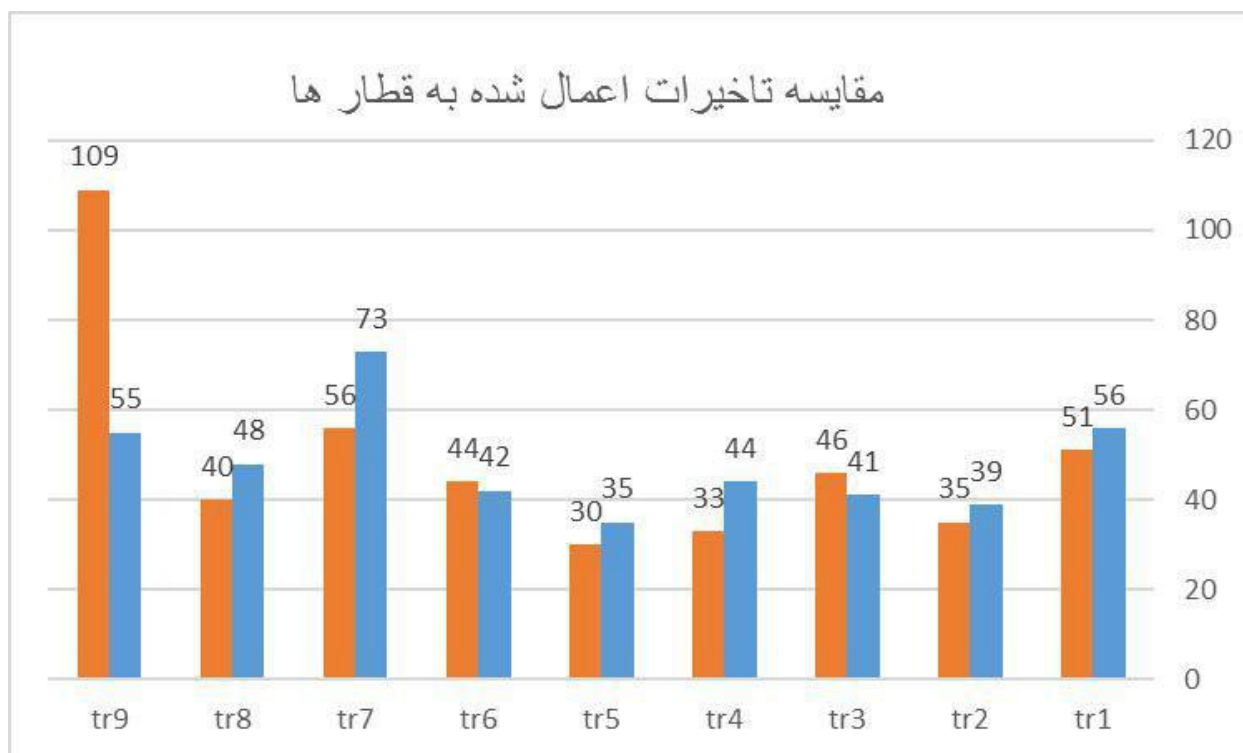
در جدول زیر تاخیرات اعمال شده به همه ی قطارها بیان می شود که این تاخیرات بدون توجه به زمان توقفات اجباری در ایستگاه ها به دست آمده است.

جدول (۳-۹) تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارها در مدل احتمالی با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم

تاخیرات اعمال شده به قطارهای جنوبی		تاخیرات اعمال شده به قطارهای شمالی	
trs1	56	trn1	51
trs2	39	trn2	35
trs3	41	trn3	46
trs4	44	trn4	33
trs5	35	trn5	30
trs6	42	trn6	44
trs7	73	trn7	56
trs8	48	trn8	40
trs9	55	trn9	109

با توجه به اینکه نحوه ی محاسبه مقادیر فوق در قبل گزارش شده است لذا در این جا از تکرار آن پرهیز می -

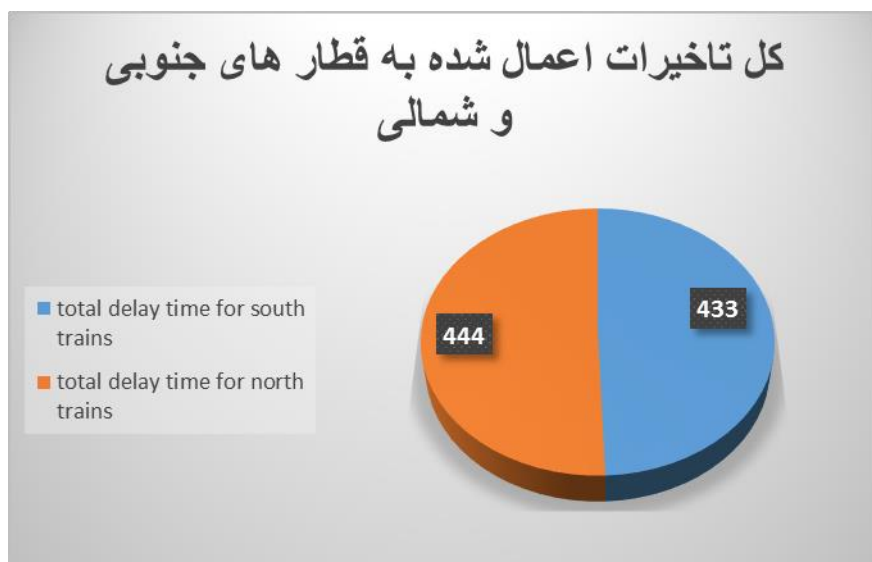
شود.



نمودار (۳-۶) مقایسه تاخیرات اعمال شده به قطار ها با ضریب واحد

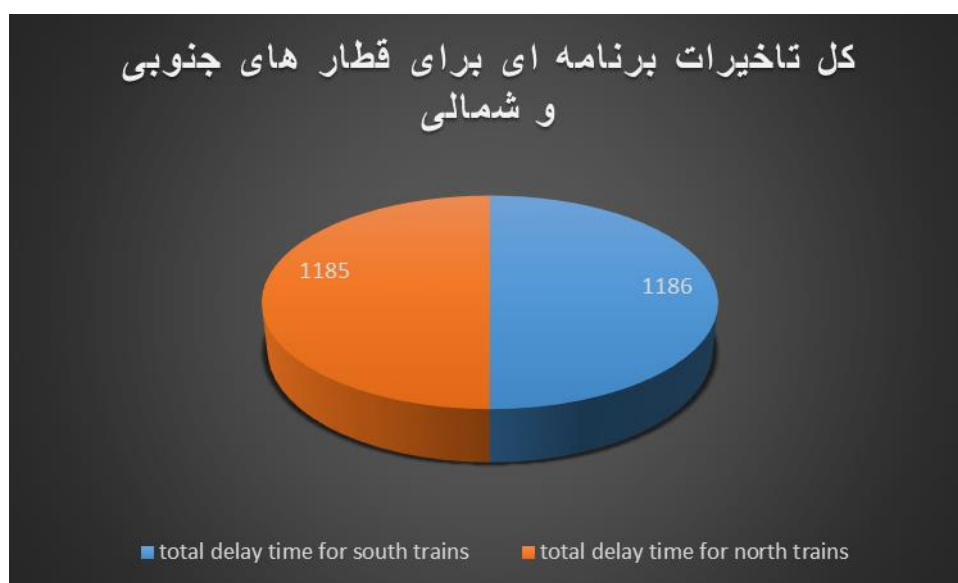
نمودار های آبی رنگ نشان دهنده ی قطار های جنوبی و نمودار های نارنجی رنگ نیز بیانگر قطارهای شمالی می باشند. همانطور که از نمودار فوق پیداست بیشتر تاخیر وارد شده به قطارها مربوط به قطار شماره ۹ شمالی است که به میزان ۱۰۹ واحد زمانی تاخیری علاوه بر توقفات اجباری بر زمان سفر آن اعمال شده است و دلیل این تاخیرات می تواند همان عواملی باشد که در نتایج مدل قطعی ذکر شد.

کل تاخیرات اعمال شده به همه ی قطار های جنوبی برابر است با ۴۳۳ واحد زمانی و همچنین کل تاخیرات وارد شده به زمان سفر همه ی قطارهای شمالی برابر ۴۴۴ واحد زمانی می باشد. که نمودار زیر این امر را به طور مشهودتری نشان می دهد.



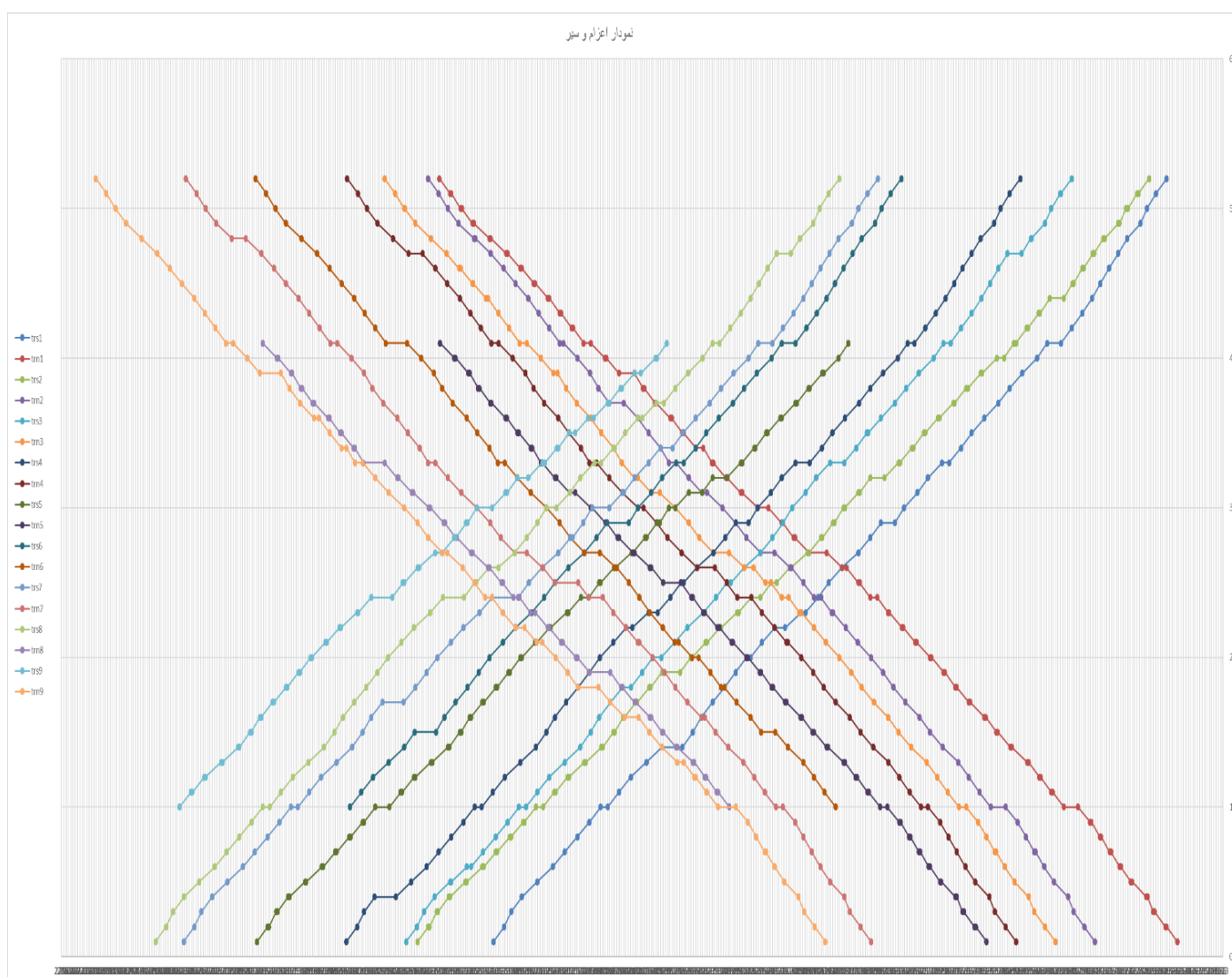
نمودار (۳-۷) : تاخیرات عملیاتی اعمال شده به قطارها در گام سوم با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم

که اگر توقفات اجباری برنامه ریزی شده نیز به این زمان ها اضافه شود میتوان سهم تاخیر هر دسته از قطار ها را در کل برنامه مشاهده نمود.



نمودار (۳-۸) : کل تاخیرات اعمال شده به قطارها درمدل گام سوم با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم

در مدل دو مرحله ای با ضریب واحد برای تابع هدف مرحله ی دوم جوابی که با درصد اختلاف ۵ درصد از جواب بهینه به دست آمده است برابر است با 17240.95 واحد زمانی که از این مقدار 901.950 واحد زمانی مربوط به تاخیرات عملیاتی و 16339 واحد زمانی نیز مربوط به زمان سفر قطار هاست که شامل زمان سیر بعلاوه ی زمان توقفات برنامه ای می باشد و همچنین میزان توقفات برنامه ای نیز برابر با 2371 واحد زمانی است. در ادامه نمودار زمان سیر و اعزام قطار ها آورده شده است.



نمودار (۳-۹): گراف حرکت قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۱ برای تابع هدف دوم

۳-۱۰-۲- مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف مرحله دوم

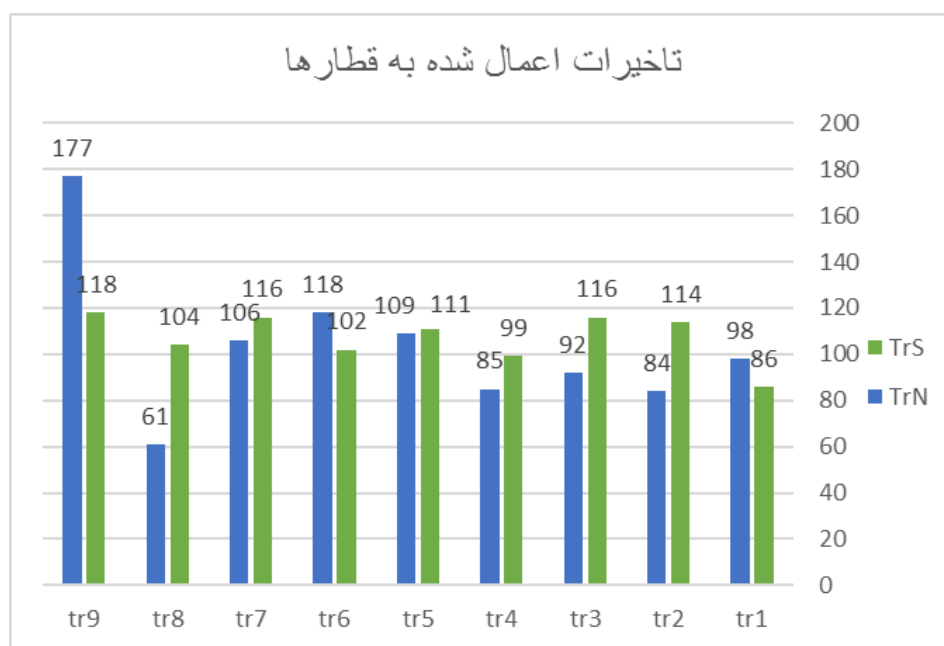
هدف از این مرحله این است که سعی بر این باشد که زمان اعزام قطارها به گونه ای تعیین گردد که تاخیرات عملیاتی به حداقل برسد لذا هرچقدر که تابع هدف مرحله دوم بیشتر جریمه گردد طبیعتاً مدل سعی بر این دارد که اعزام قطارها رو به زمان هایی بنیدازد که اختلاف زمان رسیدن قطارها به ایستگاه مقصد کمترین اختلاف را با عمل داشته باشد. اما آنچه که انتظارش می رود این است که تاخیرات برنامه ای افزایش یابد که در ادامه بیشتر این موضوعات بررسی می گردد.

جدول (۳-۱۰) : تاخیرات برنامه ای قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم

تاخیرات اعمال شده به قطارهای جنوبی		تاخیرات اعمال شده به قطارهای شمالی	
trs1	86	trn1	98
trs2	114	trn2	84
trs3	116	trn3	92
trs4	99	trn4	85
trs5	111	trn5	109
trs6	102	trn6	118
trs7	116	trn7	106
trs8	104	trn8	61
trs9	118	trn9	177

همان طور که انتظار می رفت تاخیرات برنامه ای نسبت به مدل های قبلی افزایش یافته است و دلیل این امر این است که چون در سناریوهایی که تعریف شده است زمان اعزام قطارها از ایستگاه ها متفاوت است لذا مدل به سمتی حرکت می کند که اعزام قطارها در مدل مرحله اول کمترین اختلاف را با زمان اعزام قطارها در حالت سناریویی داشته باشد و این امر موجب می شود که قطارها زمان بیشتری را در هر ایستگاه سپری کنند و در نهایت تاخیرات بیشتری را متحمل شوند.

اگر بخواهیم یک ارزیابی بین قطارها به عمل بیاوریم که به کدامین یک از قطارها زمان تاخیر بیشتری وارد شده است نمودار زیر می تواند کار ما را تسهیل بخشد.

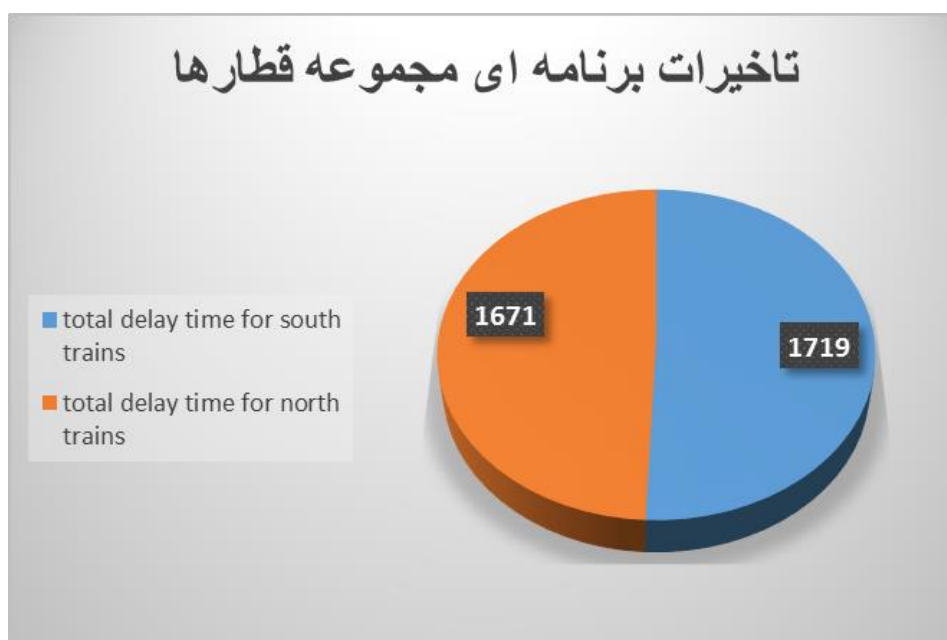


نمودار (۳-۱۰): تاخیرات برنامه ای اعمال شده به قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم

در شکل فوق نمودارهای سبز رنگ بیانگر قطارهای شمالی و نمودارهای آبی رنگ قطارهای جنوبی را نشان می دهند. آنچه که در این نمودار می تواند در ارزیابی به ما کمک کند این است که به کدام یک از قطارها تاخیرات بیشتری اعمال شده است و آمدن این اطلاعات در این گزارش به این دلیل می تواند پر اهمیت باشد

که با نگاهی ساده به نمودار می توان از این موضوع با خبر شد که هر چقدر این اختلافات برنامه ای برای قطاری بیشتر باشد می تواند مبنی بر این موضوع باشد که زمان های اعزام و سیر قطار مربوطه در سناریو های مختلف، اختلاف چشم گیری با هم دیگر دارند.

با توجه به داده های فوق میزان تاخیرات یا توقفات قطارها در ایستگاه برای قطارهای جنوبی برابر است با 966 واحد زمانی و برای قطارهای شمالی برابر است با 930 واحد زمانی. پس اگر توقفات اجباری که در حین برنامه ریزی در مساله به عنوان پارامتر دیده شده نیز به این ارقام اضافه کنیم خواهیم داشت:



نمودار (۳-۱۱) تاخیرات برنامه ای اعمال شده به قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم

که ۵۱ درصد یا 1719 واحد زمانی مربوط به قطارهای جنوبی و ۴۹ درصد یا 1671 واحد زمانی مربوط به قطارهای شمالی است. لازم به ذکر است که در این زمان ها توقفات اجباری برنامه ریزی شده برای قطارها دیده شده است که مجموعاً 3390 واحد زمانی تاخیر برنامه ای داشته ایم.

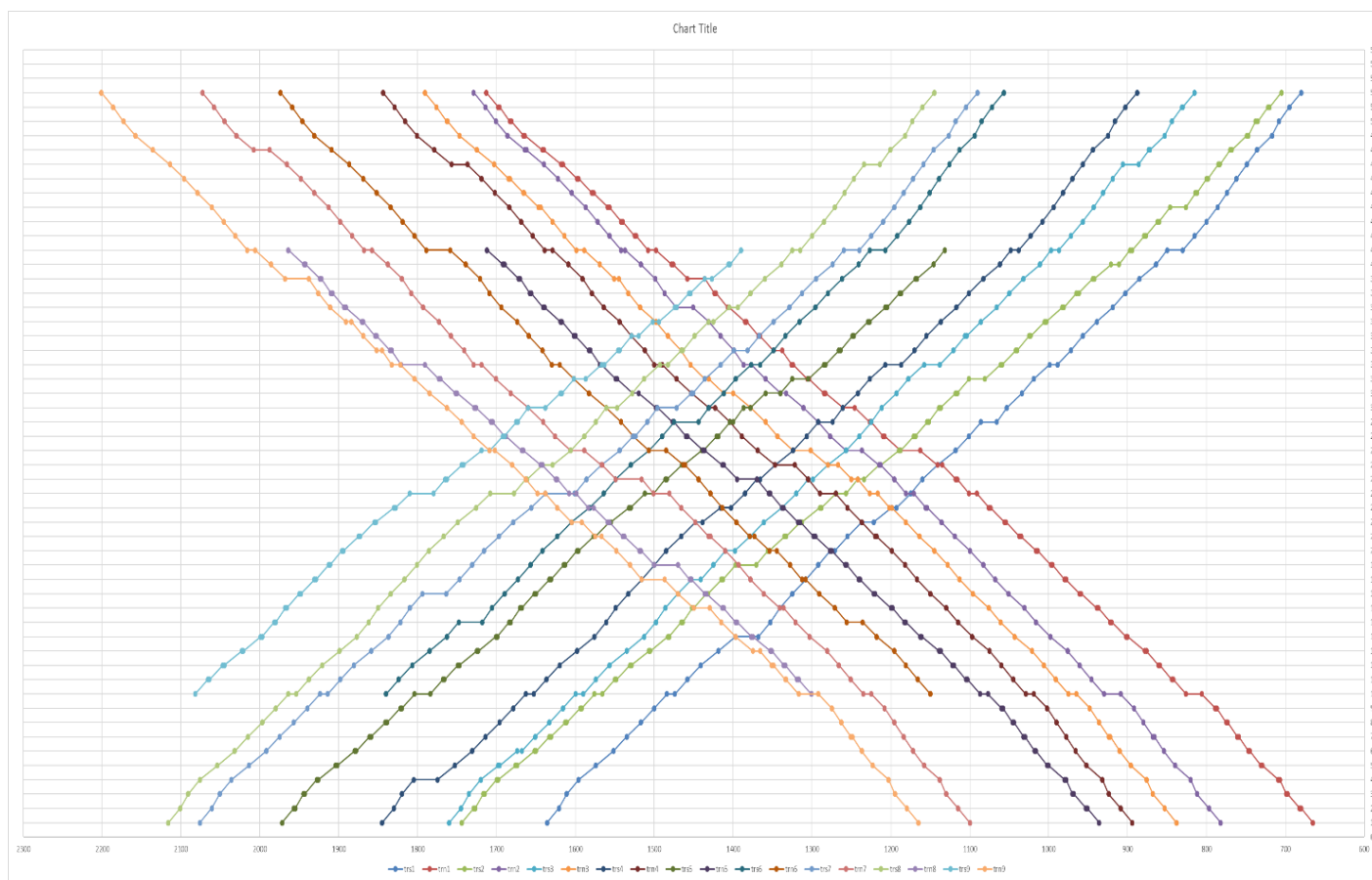
در این مدل تاخیرات عملیاتی به میزان چشم گیری نسبت به حالت قبل کاهش یافته است و دلیل این امر نیز پیشتر ذکر گردید که این مقدار برابر است با 65.6 واحد زمانی و همچنین مجموع زمان سفر برای تمامی قطارها برابر با 17353 واحد زمانی شده است.

در ادامه جدول زمان سفر قطارها آمده شده است.

جدول (۳-۱۱) : زمان سفر قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم

زمان سفر برای قطارهای جنوبی		زمان سفر برای قطارهای شمالی	
trs1	986	trn1	1095
trs2	1112	trn2	996
trs3	1019	trn3	999
trs4	1012	trn4	1002
trs5	916	trn5	855
trs6	843	trn6	898
trs7	1029	trn7	1023
trs8	1027	trn8	684
trs9	755	trn9	1104

که اگر بخواهیم به صورت نموداری این زمان ها را تجزیه کنیم گراف زمان بندی حرکت قطار این امر را به خوبی نشان می دهد که در ادامه آورده شده است.



نمودار (۳-۱۲): گراف حرکت قطارها در مدل گام سوم با ضریب ۳ برای تابع هدف دوم

در نمودار فوق محور عمودی بیانگر ایستگاه و محور افقی بیانگر زمان می باشد. از جمله اطلاعاتی که این

گراف در اختیار ما می گذارد، توقفات اجباری در ایستگاه ها برای کلیه قطارها است برای مثال در ایستگاه ۲۳

از ۱۸ قطار موجود در مجموعه، ۱۰ قطار در ایستگاه مذکور توقف داشته اند که از این ۱۰ قطار ما در برنامه فقط

برای ۶ قطار توقف اجباری داشته ایم و مابقی به دلیل عدم آزاد بودن بلاک است که قطار در ایستگاه می ایستد

تا بلاک بعدی که قصد سفر به آن را دارد، آزاد گردد، حال اگر تعداد قطارها در مجموعه ی مورد بررسی زیاد

باشد این گراف می تواند بلاک های بحرانی (بلاک هایی که امکان اعزام قطار از ایستگاه ابتدایی آن و ایستگاه

انتهایی آن در بازه زمانی خاصی وجود دارد) را به ما شناسایی کند که اگر تصمیم به دوخطه شدن بلاکی گرفته شد این بلاک ها در اولویت بالاتری قرار بگیرند.

۳-۱۰-۴- مقایسه چهار مدل اجرا شده

جدول (۳-۱۲) : مقایسه‌ی میزان توابع هدف، تاخیرات عملیاتی و برنامه‌ریزی شده و زمان حل برای چهار حالت

#	Model	Scheduled delay	Operational delay	Relative gap	Absolute gap	Best possible	Final Solve	Elapsed time
1	First Stage	2168	---	0.04991	596.382241	15538.61776	16135	0:00:02:703
2	Second Stage	2168	1453.05	0.04991	849.845724	16738.2042	17588.05	0:01:30:956
3	Stochastic1	2371	901	0.04991	858.737	16382.212	17240.95	2:06:11:643
4	Stochastic2	3390	65.6	0.04991	877.007	16694.79	17571.8	0:49:51:972

لازم به ذکر است که ردیف اول مربوط به مدل قطعی، ردیف دوم مدل احتمالی با پارامترهای قطعی در واقع همان مدل میانگین در مسائل برنامه ریزی احتمالی - دو مرحله ای، ردیف سوم مدل احتمالی دو مرحله ای با ضریب ۱ برای تابع هدف (هدف تطبیق برنامه عملیاتی با برنامه ی جدول زمان بندی) مرحله دوم و ردیف چهارم مدل احتمالی دو مرحله ای با ضریب ۳ تابع هدف مرحله دوم می باشد.

در جدول فوق ستون اول نوع مدلی را که مورد بررسی قرار گرفته است نشان می دهد، ستون دوم مربوط به تاخیرات برنامه ای است که همانطور که انتظار هم می رفت در مدل های دو مرحله ای این اعداد بیشتر از مدل قطعی می باشند. و این امر به این دلیل است که در مدل های احتمالی شرایط دنیای واقعی که تحت عنوان سناریو

در مساله آورده شده است، دیده می شود و مدل دو مرحله ای سعی بر این دارد که در برنامه توقفات را به گونه ای سازمان دهی کند که تاخیرات عملیاتی کاهش یابد.

آنچه که ما در این گزارش آن را به عنوان هدف در نظر گرفته ایم تعیین زمان اعزام قطارها از هر ایستگاه است به گونه ای که تاخیرات عملیاتی کاهش یابد که ستون سوم این موضوع را نشان می دهد. در ستون سوم اگر بخواهیم بین مدل قطعی و دو مرحله ای با ضریب ۳ برای تابع هدف بخش دوم مقایسه به عمل بیاوریم مشاهده می شود که تاخیرات عملیاتی به میزان چشم گیری کاهش یافته است یعنی این تاخیرات از ۱۴۵۳ واحد زمانی به ۶۵ واحد زمانی کاهش یافته است و این امر خاصیت استفاده از مدل احتمالی را برای ما روشن می کند.

ستون چهارم بیانگر درصد اختلاف جواب یافته شده با جواب بهینه در فضای مساله است که طبیعتاً هرچقدر این عدد کاهش یابد زمان حل مساله افزایش می یابد چرا که مدل بایستی زمان بیشتری را برای یافتن جواب بهتر هزینه کند. لذا ما در این گزارش برای اینکه بتوانیم جواب های خوبی را در زمان قابل قبولی پیدا کنیم از این میزان درصد گپ استفاده کرده ایم.

ستون پنجم نیز بانگر این موضوع است که جواب یافته شده با این درصد اختلاف به این میزان از بهترین جواب ممکن در فضای مساله اختلاف دارد. برای مثال در مدل قطعی جوابی که با درصد گپ مذکور پیدا شده است برابر ۱۶۲۳۵ واحد زمانی است که فاصله اش با بهترین جواب ممکن در فضای مساله برابر است با ۵۹۶ واحد زمانی، یعنی مدل تا ۵۹۶ واحد زمانی دیگر نیز می تواند کاهش پیدا کند بدون اینکه از فضای مساله یا همان فضای موجه خارج شود. در ستون ششم بهترین جواب ممکن در فضای جواب هر مساله را نشان می دهد و ستون هفتم مربوط به جواب های یافته شده با درصد گپ مذکور است و در نهایت ستون آخر بیانگر زمان اجرا توسط نرم افزار Gams است که برای خواندن اطلاعات، زمان حل الگوریتم Cplex و چاپ خروجی های مورد انتظار در Excel، سپری کرده است.

فصل ۴: جمع‌بندی و

پیشنهاده‌ها

موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها یکی از مسائل مهم در سطح برنامه‌ریزی‌های میان مدت و عملیاتی در راه‌آهن هر کشوری می‌باشد. عملیات اصلی راه‌آهن که جابه‌جایی بار و مسافر می‌باشد توسط یک برنامه‌ی از پیش تعیین شده و مدون صورت خواهد گرفت. هر چقدر این برنامه دارای دقت و نظم بیش‌تری باشد، در عمل عملیات راه‌آهن با کارایی و اثر بخشی بیش‌تری انجام خواهد گرفت. هدف از ارائه این پروژه آن بود تا با با ارائه‌ی یک مدل زمان‌بندی با رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی و بررسی وضع موجود در راه‌آهن جمهوری اسلامی راهکار و ایده‌ی تازه‌ای برای بهبود وضع موجود ارائه کند. در این قسمت به ارائه‌ی آن‌چه که در پروژه‌ی حاضر انجام شده است، پرداخته خواهد شد.

در فصل اول این پروژه به ارائه‌ی مقدمه‌ای از مباحث زمان‌بندی حرکت قطارها، مفاهیم اصلی آن، اهداف، محدودیت‌ها و سایر موضوعات مرتبط پرداخته شد.

در فصل دوم این پروژه ادبیات موضوع مورد مطالعه بررسی شد. در این فصل به علاوه برخی از مفاهیم پایه‌ای و مهم پیرامون برنامه‌ریزی احتمالی و دلایل استفاده از این نوع تکنیک در مسائل به خصوص مسئله‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها عنوان شد. خلاصه‌ای از مفاهیم و نتایج مقالاتی که تا زمان تهیه این پروژه انتشار یافته بودند، بررسی شدند. در این فصل مقالاتی در حوزه‌ی زمان‌بندی احتمالی و یا حتی مباحث مرتبط با زمان‌بندی به مانند بررسی تاخیرات احتمالی در قطارها نیز بررسی شدند. در انتهای این فصل نیز جدولی جهت ارائه‌ی خلاصه‌ای از آن‌چه که تاکنون در ادبیات موضوع آمده است، تهیه شده است.

در فصل سوم به تشریح و توضیح مدل ارائه شده در پروژه‌ی حاضر پرداخته شده است. در این فصل ابتدا مقدمه‌ای در مورد مدل ارائه شده آورده شده است سپس مسئله‌ی مورد نظر برای مدل‌سازی تشریح شده است. در قسمت‌های بعد نیز مدل به همراه تمام متغیرها، پارامترها و محدودیت‌های استفاده شده در آن به طور کامل تشریح

شده است. اصلاحات و تغییراتی که نسبت به مدل اصلی صورت گرفته است بخشی از موضوع این فصل را به خود اختصاص داده است. در انتها نیز نحوه‌ی تعریف سناریوهای تصادفی بررسی شده است.

۴-۲- جمع‌بندی

مهم‌ترین جنبه‌ی ارائه شده در این پروژه استفاده از یک شیوه‌ی جدید برای مسئله‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها می‌باشد. بنابراین آنچه که می‌بایست در انتهای این پروژه پاسخ داده شود این است که آیا استفاده از این تکنیک مقرون به صرفه است و یا به عبارتی دیگر در نحوه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارها بهبود چشمگیری را به وجود خواهد آورد. برای پاسخ به این سوالات بدون شک باید به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل‌های ارائه شده و همچنین مقایسه‌ی آن‌ها با وضع موجود پرداخت. اما پیش از آن باید خلاصه‌ای از مدل احتمالی مورد نظر و نحوه‌ی مدل‌سازی آن بازگو شود. همانطور که در فصل سوم ارائه شد، مدل احتمالی ارائه شده یک مدل احتمالی دو مرحله‌ای ریکورس است که در مرحله‌ی اول با معیار کمینه کردن زمان‌های سفر یک جدول زمان‌بندی می‌سازد و در مرحله‌ی دوم که از آن به مرحله‌ی ریکورس یاد می‌شود، جدول زمان‌بندی ساخته شده در مرحله‌ی اول را بهینه می‌کند. نحوه‌ی این کار بدین شکل است که در مرحله‌ی دوم با در نظر گرفتن زمان‌های سیر سناریوی، زمان‌های رسیدن به مقصد قطارها را طوری تعیین می‌کند که حداقل تاخیر را از جدول زمان‌بندی ساخته شده در مرحله‌ی اول را داشته باشد. بدیهی است که تاخیرات حاصل شده فقط تاخیراتی است که به دلیل نوسانات سیر بلاک‌ها و یا به عبارتی در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای زمان‌های سیر حاصل شده است. اما در عمل تاخیرات دیگری نیز وجود دارد که به دلیل وجود نوسانات در زمان‌های توقف در ایستگاه‌ها به وجود می‌آید. در این مدل از اینگونه تاخیرات صرف‌نظر شده است.

۳-۴ نوآوری

همانطور که گفته شد موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها یکی از موضوعات مهم در راه‌آهن هر کشوری است، بنابراین طبیعی است که حجم مقالات و مطالعات در این زمینه نیز بالا باشد، اما استفاده از تکنیکی به نام برنامه‌ریزی احتمالی برای انجام عمل زمان‌بندی و پیاده‌سازی آن با استفاده از داده‌های راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران یکی از جنبه‌های ویژه نوآوری این پروژه است. همانطور که در فصل دوم بررسی شد، حجم مطالعات صورت گرفته در این زمینه در ادبیات موضوع در سطح جهانی نیز بسیار پایین است. به خصوص مقالاتی که مستقیماً به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی پرداخته باشند. این میزان برای مقالات و مطالعات داخلی تا زمان انجام تحقیقات مربوط به این پروژه تا آن‌جا که ما می‌دانیم در حد صفر است. می‌توان گفت که پروژه‌ی حاضر جز نخستین پروژه‌هایی است که یک مدل زمان‌بندی احتمالی را در راه‌آهن ایران و در یکی از خطوط اصلی و پرتراфик آن یعنی خط تهران-جنوب پیاده‌سازی **نموده** است. در نهایت مقایسه‌ی نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل با زمان‌بندی فعلی نیز بر جنبه‌ی نوآوری مدل می‌افزاید، چرا که با مقایسه‌ی این دو، می‌توان به کارایی و کیفیت زمان‌بندی راه‌آهن پی برد.

۴-۴ پیشنهادات مطالعات آینده

همانطور که در قسمت‌های قبل نیز عنوان شد موضوع مورد مطالعه در این پروژه یکی از جدیدترین مطالعاتی بود که تاکنون انجام شده است، از این رو بدیهی است امکان بررسی تمام جنبه‌های موضوع مورد مطالعه در پروژه‌ی حاضر وجود نداشته باشد و از این جهت باب تحقیق و بررسی در حوزه‌ی موضوع مورد مطالعه باز است. در این قسمت به عنوان بخش پایانی پروژه‌ی حاضر موضوعاتی جهت انجام مطالعات و تحقیقات بیش‌تر در آینده توصیه می‌شوند.

مدلی که در این پروژه ارائه شده است تمامی پارامترهای موجود در محدودیت‌ها را به صورت غیر قطعی فرض نموده است لذا این امر موجب می‌شود که حجم مسأله به خودی خود بزرگ شود و زمان حل را کاهش دهد که برای فرار از این موضوع تعداد سناریو‌ها را کم در نظر گرفته که طبیعتاً این امر از کیفیت جواب می‌

کاهد لذا در نظر گرفتن تعداد سناریوی بیشتر کیفیت بهتری ایجاد خواهد کرد و میتوان از روش های حل فراابتکاری در حل این مساله کمک گرفت.

مدلی که ارائه شده است با رویکرد برنامه ریزی احتمالی می باشد و همان طور که پیشتر نیز ذکر شد با افزایش تعداد سناریو مساله حجیم و حجیم تر می شود لذا استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار برای چنین مساله ای می تواند کیفیت زمانی بهتر و جواب بهتری را ایجاد کند.

یکی از چالش های روبرو برای راه آهن هر کشوری و از جمله راه آهن جمهوری اسلامی ایران تعیین سرعت ها یا به عبارت دیگر زمان های سیر بلاک ها می باشد. در مدل ارائه شده زمان های سیر با توجه به زمان های مکمل بر اساس دو معیار کمینه کردن زمان های سفر و همچنین کمینه کردن تاخیرات مورد انتظار تعیین می شود. اما یکی دیگر از معیارهای مهم که می توان برای تعیین زمان سیر بلاک ها در نظر گرفت، میزان بهینه مصرف سوخت است، چرا که عموماً ممکن است میزان مصرف در سرعت های پایین و یا سرعت های بالا بهینه نباشد. پیدا کردن مقدار بهینه با سه معیار مطرح شده، مدل را به مدل کامل تری تبدیل خواهد کرد.

مراجع

- [۱] راه آهن (۱۳۸۶)، امکانات و عملکرد راه آهن جمهوری اسلامی ایران، سالنامه آماری تهران.
- [۲] راه آهن (۱۳۹۳)، سالنامه آماری حمل و نقل ریلی کشور.
- [۳] شرکت ساخت و توسعه زیر بنای حمل و نقل کشور، ۱۳۹۲.
- [4] Rangwala, S., Principles of railway engineering. 1998, Charotar publishing house.
- [5] Cordeau, J.F., Toth, P. and Vigo, D., 1998. A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation science*, 32(4), pp.380-404.
- [۶] ملودی خادم ثامنی، ۱۳۸۷، " زمان بندی حرکت قطارها در مسیرهای دو خطه"، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس.
- [۷] مسعود یقینی و جواد لسان، ۱۳۸۹، برنامه ریزی عملیات حمل و نقل ریلی (ترجمه و گرد آوری)، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [8] Pachl, J., *Railway operation and control*. 2002.
- [9] Powell, W.B. and Topaloglu, H., 2003. Stochastic programming in transportation and logistics. *Handbooks in operations research and management science*, 10, pp.555-635.
- [10] Birge, J.R. and Louveaux, F., 2011. *Introduction to stochastic programming*. Springer Science & Business Media.
- [11] Yuan, J. and Hansen, I.A., 2007. Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(2), pp.202-217.
- [12] Kroon, L., Maróti, G., Helmrich, M.R., Vromans, M. and Dekker, R., 2008. Stochastic improvement of cyclic railway timetables. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6), pp.553-570.
- [13] Kroon, L., Maróti, G., Helmrich, M.R., Vromans, M. and Dekker, R., 2008. Stochastic improvement of cyclic railway timetables. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6), pp.553-570.
- [14] Khan, M.B. and Zhou, X., 2010. Stochastic optimization model and solution algorithm for robust double-track train-timetabling problem. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 11(1), pp.81-89.
- [15] Meng, L. and Zhou, X., 2011. Robust single-track train dispatching model under a dynamic and stochastic environment: a scenario-based rolling horizon solution approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(7), pp.1080-1102.
- [16] Niu, Y.T. and Meng, L.Y., 2014. Optimizing Slack Time Allocation in Train Timetable: A Two-Stage Stochastic Recourse Model. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT2013)-Volume I* (pp. 245-252). Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Pourseyed Aghaei, M. (1998). Train Scheduling in Single Track Railway Networks, Tarbiat Moddres University.

