

زمان‌بندی حرکت قطارها بر اساس میزان تقاضا مسافر با استفاده تئوری صف

میلاد نظری^۱، علی عبدی^۲، حسن ذوقی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات.

^۲ دانشیار عمران راه و ترابری، دانشگاه بین المللی امام خمینی.

^۳ استادیار عمران راه و ترابری، دانشگاه آزاد واحد کرج.

نام نویسنده مسئول:

میلاد نظری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۶

چکیده

مترو به عنوان راه حل ترافیک، یک وسیله حمل و نقل عمومی سنگین و مهم در دنیا امروز، به یک ضرورت تبدیل شده است. نیاز به مدیریت ترافیک و برنامه ریزی امری اجتناب ناپذیر است. هدف از زمان‌بندی قطارها حداقل کردن زمان سیر قطارها از مبدأ به مقصد، جلب رضایت مسافران و صاحبان منافع، با کم کردن تاخیرات در ایستگاه‌ها و حداکثر کردن استفاده از ظرفیت خطوط، ایستگاه‌ها و ناوگان است. در این تحقیق، مطالعه موردی قطاری شهری بین تهران و کرج است. با استفاده از تئوری صف با الگو $M/G/C/C$ ، یک برنامه زمان‌بندی برای هدوی قطار بر اساس سه سناریو پیشنهاد شده است. در واقع با استفاده از عدم قطعیت در سرفاصله زمانی و ظرفیت، به زمان‌بندی حرکت قطار پرداخته شده است. پارامتر دیگر زمان انتظار مسافر است. رضایت‌مندی مسافر به زمان انتظار کوتاه و همچنین فضای کافی برای سوار شدن در قطار بستگی دارد. سود شرکت نیز به این دو پارامتر بستگی دارد، البته در ساعات مختلف، تقاضا مسافر متفاوت است، بنابراین برای ساعات مختلف باید هدوی تنظیم گردد. هدوی پیشنهاد شده بین بازه ۶-۳۰ دقیقه در سناریوهای مختلف برای ساعات مختلف است.

واژگان کلیدی: تهران، مترو، سرفاصله زمانی، برنامه زمان‌بندی، تئوری صف، زمان انتظار.

مقدمه

مترو به عنوان راه حل ترافیک و یک وسیله حمل و نقل عمومی سنگین و مهم در دنیا امروز تبدیل به یک ضرورت شده است. نیاز به مدیریت ترافیک و برنامه ریزی امری اجتناب ناپذیر است. برنامه ریزی کوتاه مدت ترافیک، مستلزم درک درست و مناسب از شرایط آنی مسیرها در بازه های کوتاه مدت است و بلند مدت است و بدون در اختیار داشتن تخمین های نزدیک به واقعیت، برنامه ریزی معنای نخواهد داشت. برای مرتفع ساختن این مشکل می توان تخمین های را بر پایه ی مشاهدات قبلی ارائه نمود که به نحوه قابل قبول حقیقت آتی را نمایش دهند. این ابزار به تصمیم گیران کمک می کند، با درک مناسب شرایط در آینده، تصمیماتی را اتخاذ نمایند که به بهترین وجه ممکن از ظرفیت های موجود استفاده گردد. در سیستم های مترو شهری، اختلالات تصادفی ناشی از افزایش تقاضای سفر و یا تغییرات زمان سفر رخ می دهند که سبب ایجاد عدم قطعیت در مقدار زمانی سرفاصله زمانی قطارها می گردد. در این شرایط بهبود ارائه کیفیت خدمات و حفظ استواری از طریق به حداقل رساندن زمان انتظار مسافری یک چالش واقعی است. یک برنامه زمان بندی قطار برنامه ریزی زمان های ورود و خروج قطارها را در سکوها، ایستگاه ها و تقاطع ها بیان می کند. از نقطه نظر ادارات راه آهن برنامه زمانی قطارها به عنوان یک داده ورودی اساسی برای استفاده بهینه از لوکوموتیوها و فرآیند زمان بندی خدمه است. از طرف دیگر افزایش سطح سرویس قطار فاکتور مهمی است که بر تصمیم مسافر و تصمیمات مربوط به شرکت ها برای انتخاب قطار به عنوان یک مد حمل و نقل قابل قبول تأثیر می گذارد. پس هدف از زمان بندی قطارها حداقل کردن زمان سیر قطارها از مبدأ به مقصد، جلب رضایت مسافران و صاحبان کالا با کم کردن تاخیرات در ایستگاه ها و حداکثر کردن استفاده از ظرفیت خطوط، ایستگاه ها، ناوگان و خدمه است. یک نگرش با در نظر گرفتن تمام عواملی که در شبکه بر روی زمان حرکت قطارها تأثیر گذار می باشند می تواند ما را به سمت تولید یک برنامه ریزی در جهت نیل به اهداف ذکر شده سوق دهد. رقابت در عرصه حمل و نقل بین المللی، افزایش سهم حمل و نقل ریلی در اقتصاد کشورها و افزایش سرعت کامپیوترها باعث شده که محققان هر روز روش های جدیدی برای حل مسئله ارائه دهند و استفاده از تکنیک های بهینه سازی نیز می تواند برنامه ریزان قطار را در ساخت سریع برنامه های زمان بندی کارآمد برای کاهش هزینه های راه آهن کمک کند. در این مطالعه سناریوهای مختلف از نگاه مسافر، شرکت مترو با استفاده از برنامه ریزی خطی، برای ایجاد یک برنامه زمان بندی مناسب صورت خواهد گرفت. همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت در هدوی قطارهای و سرعت قطارها و تقاضا مسافر و ظرفیت قطار سعی بر آن است تا بتوان پیش بینی عملی تری و زمان بندی بهتری برای حرکت قطارها به دست آورد. برای مثال ظرفیت قطار در ساعات پرازدحام افزایش می یابد و از ظرفیت ۱۸۸ مسافر به ۲۰۰ یا ۲۱۰ نفر در هر واگن می رسد، در مورد عدم قطعیت هدوی، با توجه به خطاهای راننده قطار و اپراتورهای شبکه سبب اختلالاتی در سیستم می گردد که موجب تاخیرات می گردد؛ بنابراین حداقل دو نوع عدم قطعیت وجود دارد که در این مطالعه مورد بررسی قرار می گیرد.

در ساعات پیک ترافیک سیستم مترو ظرفیت مشخصی ندارد، این مقدار حدود ۱۰-۲۰٪ به گفته کارشناسان مترو تغییر می کند، از این رو در این مطالعه ظرفیت به عنوان یک ثابت پرداخته نمی شود و آن را به عنوان یک متغیر در نظر می گیریم. این متغیر تأثیر زیادی بر سطح رضایت مسافران دارد، از این رو در روش تحقیق، سناریوسازی برحسب این متغیر صورت می گیرد. در هر واگن دو نوع ظرفیت ایستاده و نشسته وجود دارد. ظرفیت نشسته در هیچ زمانی تغییر نمی کند اما ظرفیت ایستاده در هر واگن قابل تغییر است.

در صورت اطلاع رسانی مناسب به استفاده کنندگان سیستم حمل و نقل و مطلع ساختن آن ها از شرایط ترافیکی در نقاط مختلف شبکه ی حمل و نقلی و در مواردی در بازه های زمانی پیش رو، این امکان برای استفاده کنندگان فراهم می آید که با برنامه ریزی های شخصی مبتنی بر این اطلاعات، از مسیرهای سریع تر برای رسیدن به مقصد استفاده کنند. میوا^۱ مسئله برنامه ریزی حرکت قطارها را از دیدگاهی دیگر مورد بررسی قرار داده است به این صورت که با توجه به تقاضای مسافری در ایستگاه های متفاوت در طول شبانه روز قطارها به دو دسته سریع و عادی تقسیم شده و هدف تعیین تواتر حرکت آن ها و تعیین ایستگاه هایی است که می بایست جهت پیاده و سوار کردن مسافر توقف نمایند. بطوری که زمان سفر کل مسافری حداقل گردد، مسئله مورد نظر در قالب یک مدل شبکه و به صورت یک مسئله برنامه ریزی عدد صحیح مخلوط مدل سازی گشته است [1، 2]. هیگینز^۲ و همکاران مسئله زمان بندی حرکت قطارها را در یک شبکه تک خط به صورت برنامه ریزی عدد صحیح مخلوط، مدل سازی نموده اند؛ به این

صورت که تابع هدف به صورت حداقل کردن مجموعه تأخیرات وزنی قطارها به همراه هزینه‌های عملیاتی آنها به صورت یک تابع غیرخطی مطرح شده و محدودیت‌های تلاقی، سبقت، توالی و سرعت به صورت روابط خطی عنوان گشته‌اند[۳-۵]. روش‌های جستجو، روش‌هایی هستند که در کل فضای موجه جواب با توجه به پارامترهایی که مدنظر دارند به جستجو پرداخته و جواب‌های نسبتاً خوبی را برای مسئله پیدا می‌کنند. روش‌های نوینی که اخیراً در این عرصه ارائه شده است، بخشی از فضای جواب را مدنظر قرار داده و با استفاده از ابزارهای در دست سعی می‌کنند در کوتاه‌ترین زمان جواب خوبی را حاصل سازند، به عبارت دیگر در این روش‌ها، جستجو هدایت شده می‌باشد. فوکوموری و همکاران بر اساس روش سعی و خطای هوش مصنوعی[۶] تینگ و مارتینلی از روش شبکه‌های عصبی چیانگ و همکاران با تکنیک اصلاح مجدد و مکرر محدودیت‌ها نیکلسون و بود از الگوریتم ژنتیک[۷] گورمن از الگوریتم ژنتیک قصیری و مرشد سلوک از الگوریتم مورچه که همگی روش‌های نوین جستجو هستند استفاده کرده‌اند و برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها جواب‌های خوبی را به دست آورده‌اند، ولی هیچ‌کدام از آنها تضمین نکرده‌اند که جواب به دست آمده بهینه می‌باشد[۸-۱۰]. میس^۳ با استفاده از مسئله تخصیص منابع، رویکرد دیگری را مدنظر قرار داده است به این صورت که بلاک‌های راه‌آهن به عنوان منابع در نظر گرفته شده که این منابع در زمان‌های موردنظر به قطارها تخصیص می‌یابند، در این مدل فرض شده است که برنامه‌ریزی بر روی یک شبکه تک خط برای یک زمان معینی صورت می‌گیرد و زمان شروع حرکت قطارها نیز ثابت می‌باشد. مدل ریاضی مربوط یک مسئله بهینه‌سازی شبکه با متغیرهای صفر و یک تعریف شده و برای حل آن یک الگوریتم تخمینی با استفاده از مسئله جریان چند کالایی پیشنهاد شده است[۱].

برانالد^۴ یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای پیدا کردن یک زمان‌بندی برای بیشینه کردن سود پیشنهاد کرد، هم‌چنین یک روش حل سبک‌سازی لاگرانژی برای محدودیت‌های ظرفیت در مسیر دو خطه در نظر گرفته است. برآیند زیر مسئله‌ها به وسیله الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر^۵ در ارتباط با چندین جدول زمانی بهبود یافته دوگان به دست آمدند[۱۳] کرون^۶ و پیترز^۷ مدل زمان‌بندی دوره‌ای را برای محاسبه‌ی زمان‌بندی سفر در مسئله برنامه زمان‌بندی پیشنهاد می‌کنند[۱۴]. آلن^۸ و همکارانش، اسکاردوا^۹ و همکارانش از شبیه‌سازی جهت حل مسئله زمان‌بندی قطار استفاده کرده‌اند[۱۵، ۱۶]. چیانگ^{۱۰} از روش شبکه‌های عصبی [۱۷] گورمن^{۱۱} با تکنیک اصلاح مجدد و مکرر محدودیت‌ها از الگوریتم ژنتیک[18]. اسد از الگوریتم مورچه که همگی روش‌های نوین جستجو هستند استفاده کرده‌اند و برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها جواب‌های خوبی را به دست آورده‌اند ولی هیچ‌کدام از آنها تضمین نکرده‌اند که جواب به دست آمده بهینه هست. اسد یک نوع از این مسائل را مدنظر قرار داده و تأثیرات اضافه کردن یک قطار و سپس دو قطار را در مدل مورد بررسی قرار داده است و برای حل مسئله از یک روش ابتکاری کاری استفاده کرده است[۱۹]. روش‌های تحلیلی معمولاً در دستگاه‌های بسیار ساده، به کار برده می‌شوند. این روش‌ها عموماً با ساده‌سازی‌ها و فرضیات زیادی همراه است[۲۰، ۲۱]. میس و همکاران نیز برای بیان این مسئله از مفاهیم شبکه استفاده کرده و حرکت قطارهای باری را بر روی شبکه‌های تک خط را مدل‌سازی نموده‌اند. مسئله موردنظر به صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی باهدف حداقل کردن هزینه‌های سراسر تأخیر قطارها و هزینه‌های سوخت آنها ارائه شده است. در این مدل فرض شده که سرعت قطارها متغیر می‌باشد و برای حل تلاقی‌ها به وجود آمده در شبکه از یک الگوریتم ابتکاری استفاده شده است[۲۲، ۲۳]. هارکر و کرایبی مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها را برای قطارهای باری به صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با متغیرهای صفر و یک پیوسته ارائه دادند که در آن فقط تابع هدف غیرخطی بوده و بیانگر هزینه ناشی از دیرکرد قطارها و همچنین هزینه ناشی از استفاده بیش از حد پرسنلی قطار (بیش از ۱۲ ساعت) می‌باشد. در این تحقیق برای رفع تلاقی‌های به وجود آمده ناشی از تغییر برنامه اولیه از یک الگوریتم ابتکاری استفاده شده است. برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی پیوسته نیز در هر مرحله از روش تجزیه و همچنین مزدوج مسئله استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان برنامه، با استفاده از شبیه‌سازی که از تکنیک‌های مطرح در حل مسائل پیچیده می‌باشد، ابزاری برای محاسبه قابلیت اطمینان برنامه زمان‌بندی حرکت قطارهای مسافری تحت سیاست‌های مختلف برنامه‌ریزی ساخته و پرداخته شود. برخلاف مدل‌های موجود در این تحقیق پارامترهای مدل نظیر زمان طی بلاک توسط یک قطار و یا زمان توقف در ایستگاه اعداد ثابت نیستند، بلکه این پارامترها به صورت متغیرهای تصادفی فرض شده‌اند. افزایش قابلیت اطمینان برنامه حرکت قطارها موجب افزایش توانایی رقابت مؤثر سیستم‌های حمل و نقل ریلی با دیگر روش‌های

حمل و نقل می شود. مدیران سیستم های حمل و نقل به دنبال تعیین قابلیت اطمینان برنامه ها و افزایش آن هستند تا بتوانند طراحی، کنترل و بازاریابی سرویس ها را به نحو مطلوب تری انجام دهند. ناظران این سیستم ها نیز به منظور کنترل کیفیت سرویس های ارائه شده و نیز کنترل عملکرد گردانندگان سیستم نیاز به تعیین قابلیت اطمینان برنامه حرکت قطارها دارند، علاوه بر این استفاده کنندگان و مسافران نیز در مرحله تصمیم گیری در مورد نحوه انجام سفر به معیارهای نشان دهنده قابلیت اطمینان توجه می کنند. با توجه به این مسائل یک رویکرد مناسب به مسئله برنامه ریزی قطارها تنظیم حرکت آن ها در راستای افزایش قابلیت اطمینان برنامه می باشد. روش های متعددی را می توان به منظور اندازه گیری قابلیت اطمینان برنامه زمان بندی به کاربرد. روش های تحلیلی معمولاً در سیستم های بسیار ساده، به کار برده می شوند. این روش ها عموماً با ساده سازی ها و فرضیات زیادی همراه است [۲۰، ۲۱]. اگرچه روش شبیه سازی به علت پیچیدگی و نیاز به اطلاعات وسیع روش چندان ساده ای نیست، اما در عمل به دلیل قدرت بالای تجزیه و تحلیل مسائل، از متداول ترین روش ها برای حل مسائل پیچیده است. اغلب این مدل ها بر مبنای اطلاعات و آمار موجود بنا می شوند. مزیت این روش ها این است که در زمان مناسب، جواب های موجهی تولید می کنند که از آن ها هم می توان برای تهیه برنامه اولیه حرکت قطارها و هم اصلاح و تغییر زمان بندی ها استفاده نمود و در نهایت معیارهای قابلیت اطمینان را می توان از نتایج این شبیه سازی ها محاسبه کرد. در مطالعات پیشین به منظور سنجش قابلیت اطمینان معیارهای ابتکاری متنوعی پیشنهاد شده است که اعتبار استفاده از آن ها به وسیله نتایج شبیه سازی ها تعیین می شوند. [۱۱]

روش تحقیق

کاهش زمان تأخیر مسافر در ایستگاه های مترو با استفاده از پیش بینی تقاضا است، در این راستا می توان سناریو رضایت مسافر که معمولاً به دلیل ازدحام زیاد در ایستگاه ها ایجاد می شود و سبب کاهش راحتی مسافر در استفاده از مترو می شود را نیز در نظر گرفت. در قسمت ساخت مدل، می توان شرایط مختلفی را در نظر گرفت، که بدلیل عدم قطعیت در ظرفیت قطار، ظرفیت قطار به دو صورت استایک و دینامیک است، هر چند در کشورهای مختلف برای هر مترمربع شاخص و اندازه ای برای تعداد افراد در نظر می گیرند، اما ظرفیت واگن در حالت ایستاده معمولاً متغیر و پویا است از این رو در محاسبه ظرفیت نمی توان به طور قطع عددی را گفت و این عدد تنها عددی استاندارد اعلام شده از طرف شرکت مترو یا راه آهن خواهد بود. در فصل چهارم این عدم قطعیت در نظر گرفته شده است و برای ظرفیت ها مختلف برنامه زمان بندی ارائه شده است.

برای ساخت برنامه زمان بندی در صورتی که راحتی مسافر کمتر مورد توجه باشد و سود شرکت در اولویت برنامه ریز باشد، برنامه زمانی متفاوتی سناریو یک برای این منظور است.

در سناریو دو، کاهش زمان تأخیر مسافر در اولویت است، و در کنار آن به راحتی مسافر پرداخته شده است. راحتی هرچند به عوامل مختلفی بستگی دارد، اما برای سادگی فرض، تنها به فضای اشغال پرداخته شده است. زیرا عوامل دیگر چون تهویه، ارائه سرویس های مخصوص مسافر در حیطه این پژوهش نیست. راحتی مسافر در زمانی که مسافر به صورت فشرده و در واگن ازدحام مسافر زیاد است، کاهش می یابد.

در سناریو سه، برنامه زمان بندی به صورت میانه دو حالت اول و دوم است. یعنی حالت بهینه ای که هم سود شرکت در نظر گرفته شده است و هم تا حد امکان راحتی مسافر هر سه سناریو سه هدف مختلف دنبال می کنند. در نهایت سه برنامه زمان بندی با یکدیگر مقایسه و تحلیل و بررسی می گردد. برای ارائه جدول زمان بندی و به دست آوردن تاخیرات زمانی مسافران از تئوری صف استفاده شده است. یک سیستم صف را می توان به صورت مسافرانی تعریف کرد که برای سرویس گرفتن وارد سیستم می شوند و اگر سرویس در اختیار نباشد برای آن منتظر می مانند و پس از انجام سرویس سیستم را ترک می کنند. معمولاً در الگو صف در قطار نحوه ورود مسافران به ایستگاه از توزیع پواسون پیروی می کند، از این رو به توضیح این توزیع پرداخته می شود. یک متغیر تصادفی غیر منفی عدد صحیح با احتمالات نقطه ای است.

به همین طریق می توان این توزیع را به عنوان تعداد دفعات وقوع یک واقعه ورود مشتری در یک فاصله زمانی به طول t از یک فرایند پراسون به چگالی تعریف کرد:

$$f(k; \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

بطوریکه؛

e: پایه لگاریتم طبیعی است $e=2.71828$

k: تعداد ظهورهای یک حادثه است که احتمالش با تابع فوق داده شده است.

λ : یک عدد مثبت حقیقی و برابر با امید ریاضی ظهورها در طول بازه داده شده است.

تابع فوق به عنوان تابعی از k یک تابع جرم احتمال است. توزیع پواسون می تواند به عنوان تقریبی از توزیع دوجمله ای در نظر گرفته شود. توزیع پواسون می تواند برای سیستم هایی بکار برده شود که دارای تعداد وقایع بسیار زیاد هستند و احتمال وقوع هر واقعه بسیار کم است. نرم افزار ارنا (ARENA) یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه سازی و مدل سازی فعالیت ها می باشد، برای استفاده از تئوری صف از این نرم افزار استفاده شده است.

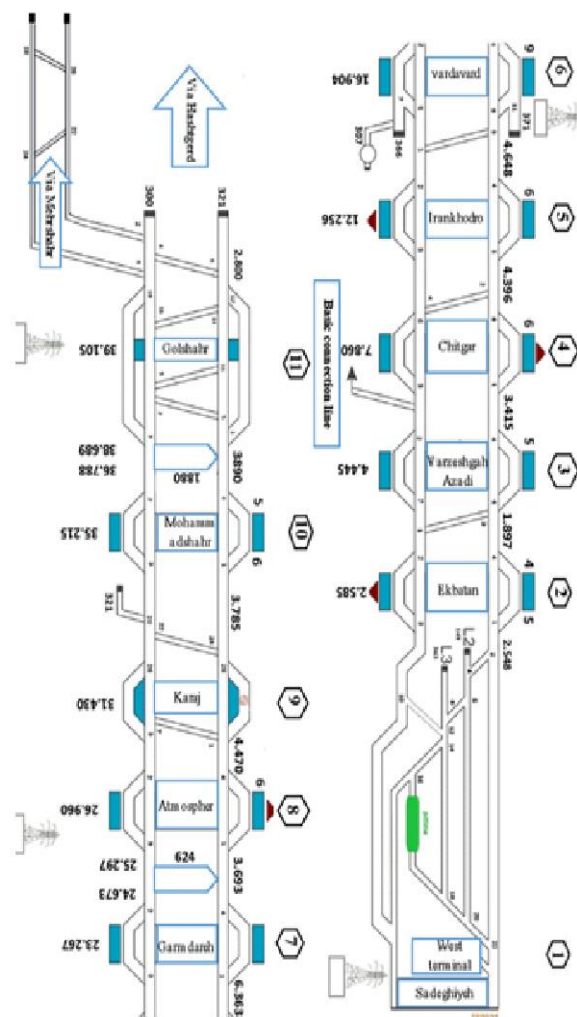
مطالعه موردی

متروی تهران به مجموعه قطارهای شهری تهران و همچنین «شرکت راه آهن شهری تهران و حومه» گفته می شود. این قطارها در شش خط اصلی در حال تردد هستند که پنج خط آن (۱-۲-۳-۴-۷) درون شهری و خطوط دیگر ۵-انشعاب خط ۱ نیز برون شهری میان کرج و تهران و فرودگاه امام خمینی (ره) و تهران هستند. تا مرداد ۱۳۹۷، طول خطوط متروی بهره برداری شده برابر ۲۰۴ کیلومتر با ۱۱۶ ایستگاه است

خط ۵ مترو تهران یک خط برون شهری به طول ۴۳ کیلومتر با ۱۱ ایستگاه به عنوان مهم ترین وسیله ارتباطی و حمل و نقل عمومی شهروندان گرامی می باشد که روزانه مجموع ۱۵۰۰ هزار سفر را در برمی گیرد. این خط ایستگاه تهران (صادقیه) واقع در ضلع جنوب غربی فلکه دوم صادقیه را به ایستگاه گلشهر واقع در گلشهر کرج متصل می کند. در سال ۱۳۷۷ ابتدا بین دو ایستگاه تهران (صادقیه) و ایستگاه متروی کرج به بهره برداری رسیده بود و در سال های بعد به تدریج ایستگاه های دیگر خط افتتاح شد. بیشترین شیب در بین ایستگاه محمد شهر تا کرج و بین ایستگاه وردآورد و پیکان شهر است مقدار شیب در حالت ماکسیمم به یک درصد رسیده است. با ضرب این مقدار گرانش $g=9.8$ مقدار 0.098 به عنوان شتاب مخالف در ترمز گیری است؛ بنابراین حدود یک واحد شتاب ترمز گیری را کاهش می دهد و به عدد 0.7 می رساند. به عبارت دیگر شیب درشدید ترین حالت سبب افزایش $642-562=80$ متر طول مسافت ترمز گیری شده است.

$$h_{w_{min}} = \frac{v^2}{2b} = \frac{30^2}{2 \times 0.7} = 642m \quad (2)$$

هرچند شتاب ترمز گیری با توجه به مشخصات شرکت مترو ۰.۸ است اما در عمل به نظر می رسد این مقدار حدود ۲۰٪ کمتر است چنانچه در عمل خط ترمز گیری با سرعت 120 km/h برابر 800 متر و با سرعت 140 km/h برابر 1200 متر است. با فرض سرعت 100 کیلومتر بر ساعت چنانچه شتاب ترمز گیری 0.8 باشد از آنجاکه راهبر شتاب ترمز به تدریج افزایش می دهد، بنابراین متوسط شتاب از ابتدا مرحله ترمز گیری تا انتها متوسط شتاب برابر 0.4 خواهد بود. بنابراین حداقل هدوی قطار برابر ۲ دقیقه خواهد بود، که در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول از شیب محور که کمتر یک درصد است و مقدار ناچیزی است صرفه نظر شده است. با مشخص شدن میزان حداقل مسافت ترمز گیری می توان ماکسیمم ظرفیت خط را به دست آورد.



شکل ۱۱ ایستگاه خط متروی ۵ و مشخصات آن

ظرفیت قطار در هر ساعت بر اساس هدوی

با مشخص شدن میزان حداقل مسافت ترمزگیری می توان ماکسیمم ظرفیت قطار را به دست آورد، ظرفیت مسافری قطار دو طبقه در حالت های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. M. L.، برابر با ۳ مسافر در مترمربع N. L. برابر با ۵ مسافر در مترمربع، O. L. برابر با ۷ مسافر در مترمربع E. O. L. برابر با ۱۰ مسافر در مترمربع و در حالت نشسته با واژه sitting داده شده است. ظرفیت خط نسبت به حالت های مختلف و هدوی های متفاوت تغییر کرده و عدم قطعیت در ظرفیت را ایجاد می کند.

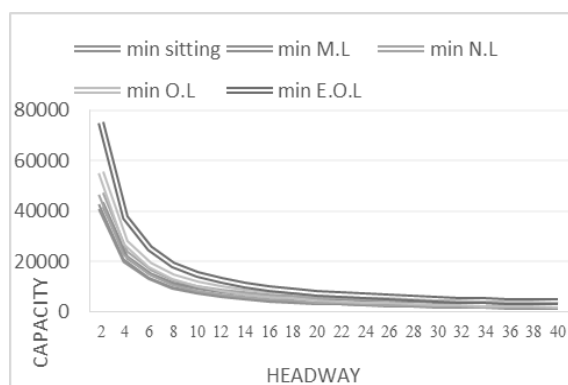
جدول ۱ ظرفیت خط مسافری قطار دو طبقه در حالت های مختلف

ظرفیت خطوط در یک ساعت					دقیقه
E.O.L	O.L	N.L	M.L	sitting	سرفاصله زمانی
۷۵۰۰۰	۵۵۵۰۰	۴۶۸۰۰	۴۳۰۵۰	۴۱۲۸۰	2
۳۷۵۰۰	۲۷۷۵۰	۲۳۴۰۰	۲۱۵۲۵	۲۰۶۴۰	4
۲۵۰۰۰	۱۸۵۰۰	۱۵۶۰۰	۱۴۳۵۰	۱۳۷۶۰	6
۱۸۷۵۰	۱۳۸۷۵	۱۱۷۰۰	۱۰۷۶۳	۱۰۳۲۰	8
۱۵۰۰۰	۱۱۱۰۰	۹۳۶۰	۸۶۱۰	۸۲۵۶	10

۱۲۵۰۰	۹۲۵۰	۷۸۰۰	۷۱۷۵	۶۸۸۰	12
۱۰۷۱۴	۷۹۲۹	۶۶۸۶	۶۱۵۰	۵۸۹۷	14
۹۳۷۵	۶۹۳۸	۵۸۵۰	۵۳۸۱	۵۱۶۰	16
۸۳۳۳	۶۱۶۷	۵۲۰۰	۴۷۸۳	۴۵۸۷	18
۷۵۰۰	۵۵۵۰	۴۶۸۰	۴۳۰۵	۴۱۲۸	20
۶۸۱۸	۵۰۴۵	۴۲۵۵	۳۹۱۴	۳۷۵۳	22
۶۲۵۰	۴۶۲۵	۳۹۰۰	۳۵۸۸	۳۴۴۰	24
۵۷۶۹	۴۲۶۹	۳۶۰۰	۳۳۱۲	۳۱۷۵	26
۵۳۵۷	۳۹۶۴	۳۳۴۳	۳۰۷۵	۲۹۴۹	28
۵۰۰۰	۳۷۰۰	۳۱۲۰	۲۸۷۰	۲۷۵۲	30
۴۶۸۸	۳۴۶۹	۲۹۲۵	۲۶۹۱	۲۵۸۰	32
۴۴۱۲	۳۲۶۵	۲۷۵۳	۲۵۳۲	۲۴۲۸	34
۴۱۶۷	۳۰۸۳	۲۶۰۰	۲۳۹۲	۲۲۹۳	36
۳۹۴۷	۲۹۲۱	۲۴۶۳	۲۲۶۶	۲۱۷۳	38
۳۷۵۰	۲۷۷۵	۲۳۴۰	۲۱۵۳	۲۰۶۴	40
۲۵۰۰	۱۸۵۰	۱۵۶۰	۱۴۳۵	۱۳۷۶	60

شکل ۲ ظرفیت قطار خط ۵ مترو تهران کرج برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. نمودار نشان‌دهنده یک تابع‌نمایی برای حالت‌های مختلف ظرفیت خط ۵ مترو تهران-کرج است.

شکل ۲ ظرفیت قطار خط ۵ مترو تهران کرج



جدول ۲ میانگین زمان انتظار بر اساس هدوی ها مختلف آورده شده است.

جدول ۲ میانگین زمان انتظار بر اساس هدوی ها مختلف

Waiting time	Number of TU	headway	
۲	۱۵	۴	$\lambda=3000$
۴	۸	۸	
۵	۶	۱۰	
۷	۴	۱۴	
۱۰	۳	۲۰	

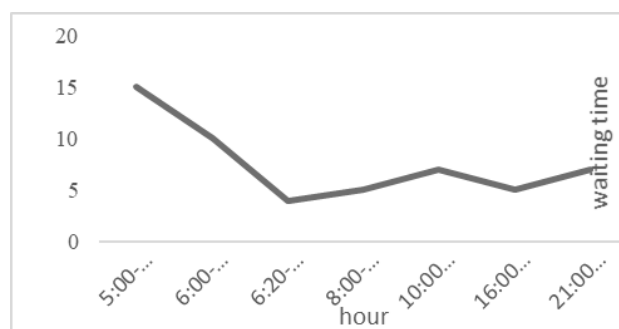
۱۵	۲	۳۰	$\lambda=3000$
۲	۱۵	۴	
۴	۸	۸	
۵	۶	۱۰	
۷	۴	۱۴	
۱۰	۳	۲۰	
۱۵	۲	۳۰	
۲	۱۵	۴	$\lambda=3000$
۴	۸	۸	
۵	۶	۱۰	
۷	۴	۱۴	
۱۰	۳	۲۰	
۲۵	۲	۳۰	
۲	۱۵	۴	$\lambda=3000$
۴	۸	۸	
۵	۶	۱۰	
۷	۴	۱۴	
۲۵	۳	۲۰	
۴۵	۲	۳۰	

در این جدول حجم مسافر برای ۴ حالت حجم تقاضا کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد آمده است.

زمان انتظار در وضع موجود

در شکل ۳ میانگین زمان انتظار مسافران برای وضع موجود خط ۵ مترو در ساعات مختلف شبانه‌روز آمده است.

شکل ۳ میانگین زمان انتظار مسافران برای وضع موجود خط ۵ مترو



با توجه به وضع موجود هدوی در خط ۵ متروی تهران که برای روزهای مختلف و ساعات مختلف متفاوت است. نسبت به این وضع موجود زمان انتظار مطابق جدول ۳ با استفاده از نرم‌افزار آرنا و فرض پواسون بودن ورود مسافران به دست می‌آید.

جدول ۳ وضع موجود برنامه زمان بندی مسافران خط ۵ متروی

شنبه تا چهارشنبه		پنجشنبه		جمعه	
ساعت	هدوی (دقیقه)	ساعت	هدوی (دقیقه)	ساعت	هدوی (دقیقه)
۶.۰۰-۵.۰۰	۳۰	۶.۰۰-۵.۰۰	۳۰	۱۵.۱۰-۶.۱۵	۳۰
۶.۲۰-۶.۰۰	۲۰	۶.۲۰-۶.۰۰	۲۰	۱۹.۳۰-۱۵.۱۰	۲۰
۸.۰۰-۶.۲۰	۷	۱۰.۳۰-۶.۲۰	۱۰	۲۲.۳۰-۱۹.۳۰	۳۰
۱۰.۰۰-۸.۰۰	۱۰	۱۴.۰۰-۱۰.۳۰	۱۵		
۱۶.۰۰-۱۰.۰۰	۱۵	۱۹.۰۰-۱۴.۰۰	۱۰		
۲۱.۰۰-۱۶.۰۰	۱۰	۲۲.۳۰-۱۹.۰۰	۱۵		
۲۲.۳۰-۲۱.۰۰	۱۵				

ارائه برنامه زمان بندی قطار

برای ارائه برنامه زمان بندی سه سناریو با سود زیاد برای شرکت، راحتی برای مسافر و ترکیب این دو حالت در جدول ۴ آمده است.

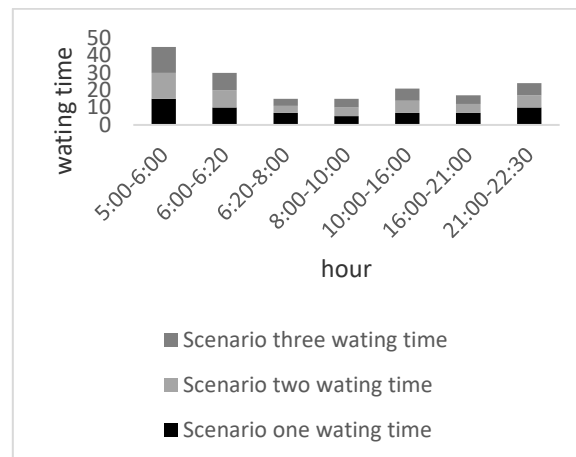
سناریو یک: در این سناریو هدوی بر اساس بیشترین سود شرکت در نظر گرفته شده است؛ در این صورت ظرفیت مسافر در حالت حداکثر (E.O.L) در نظر گرفته شده که مسافر احساس راحتی در قطار ندارد و زمان انتظار بیشتر است. سناریو دو: برای حالت نشسته برای مسافر با زمان انتظار کم در نظر گرفته شده است. سناریو سه: حالت بهینه و بین سناریو یک و دو است.

جدول ۴ هدوی پیشنهادی برای سناریوها مختلف

سناریو ۳		سناریو ۲		سناریو ۱		
WT	HW	WT	HW	زمان انتظار	هدوی	ساعت
۱۵	۳۰	۱۵	۲۰	۱۵	۳۰	۶.۰۰-۵.۰۰
۱۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۰	۲۰	۶.۲۰-۶.۰۰
۴	۸	۴	۶	۷	۱۴	۸.۰۰-۶.۲۰
۵	۱۰	۵	۱۰	۵	۱۰	۱۰.۰۰-۸.۰۰
۷	۱۵	۷	۱۵	۷	۲۰	۱۶.۰۰-۱۰.۰۰
۵	۱۰	۵	۸	۷	۱۴	۲۱.۰۰-۱۶.۰۰
۷	۱۵	۷	۱۵	۱۰	۲۰	۲۲.۳۰-۲۱.۰۰

شکل ۴ زمان انتظار برای سناریوهای مختلف را نشان می دهد.

شکل ۴ زمان انتظار مسافر برای سناریوهای مختلف



نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده تئوری صف یک برنامه زمان بندی برای هدوی قطار بر اساس سه سناریو حداکثر ظرفیت قطار، ظرفیت در حالت همه مسافرها نشسته و حالت دیگر در حالت بین این دو حالت در نظر گرفته شد. پارامتر دیگر زمان انتظار مسافر برای مسافر بود. رضایت مندی مسافر به این بستگی دارد، که زمان انتظار برای سوار شدن کم باشد و همچنین فضای کافی برای سوار شدن در قطار باشد. سود شرکت نیز به این دو پارامتر بستگی دارد. البته در ساعات مختلف تقاضا مسافر متفاوت است. بنابراین برای ساعات مختلف باید هدوی تنظیم گردد. هدوی پیشنهاد شده بین بازه ۶-۳۰ دقیقه در سناریو مختلف در ساعت مختلف است. برای به دست آوردن حداقل سرفاصله زمانی با توجه به محدودیت ترمز قطار توجه کرد که این مقدار باید با توجه به ماکزیمم سرعت مشخص کرد، هرچند شتاب ترمز گیری با توجه به مشخصات شرکت مترو ۰.۸ است اما در عمل به نظر می رسد این مقدار حدود ۲۰٪ کمتر است چنانچه در عمل خط ترمز گیری با سرعت ۱۲۰ km/h برابر ۸۰۰ متر و با سرعت ۱۴۰ km/h برابر ۱۲۰۰ متر است.

به دست آوردن ظرفیت قطار در هر ساعت بر اساس هدوی ممکن است که در این حالت باید به حالت نشسته یا ایستاده یا فشرده مسافران در فضای واگن توجه کرد. ظرفیت قطار در شهر تهران برای حالت نشسته ۱۳۷۶ و در حالت فشرده آن به ۲۵۰۰ نفر در قطار می رسد.

در مورد ظرفیت خط یا به عبارت دیگر ظرفیت جابجایی مسافر در ساعت باید به هدوی و سرفاصله زمانی توجه کرد. با کاهش سرفاصله زمانی ظرفیت مسافر در خط در هر ساعت افزایش پیدا می کند؛ بنابراین، با یک عدم قطعیت در مقدار ظرفیت روبرو می شود. ورود مسافرها طبق فرایند پواسون است اما زمان بین ورود مسافر بر اساس توزیع نمایی است.

تقدیر و تشکر

تهیه کننده این مقاله وظیفه می داند که از آقایان دکتر علی عبدی و دکتر حسن ذوقی به خاطر هم فکری هایی که داشته اند، تشکر کند.

منابع و مراجع

- [1] Goh, C.J. and A.I. Mees, Optimal control on a graph with application to train scheduling problems. *Mathematical and Computer Modelling*, 1991. 15(2): p. 49-58.
- [2] Miwa, M. and T. Oyama, An optimal track maintenance scheduling model analysis taking the risk of accidents into consideration. *International Transactions in Operational Research*, 2018. 25(5): p. 1465-1490.
- [3] Caprara, A., M. Fischetti, and P. Toth, Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations research*, 2002. 50(5): p. 851-861.
- [4] Higgins, A., E. Kozan, and L. Ferreira, Optimal scheduling of trains on a single line track. *Transportation research part B: Methodological*, 1996. 30(2): p. 147-161.
- [5] Lee, Y. and C.-Y. Chen, A heuristic for the train pathing and timetabling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2009. 43(8-9): p. 837-851.
- [6] Çelebi, D., B. Bolat, and D. Bayraktar. Light rail passenger demand forecasting by artificial neural networks. in *Computers & Industrial Engineering*, 2009. CIE 2009. International Conference on. 2009. IEEE.
- [7] Dündar, S. and İ. Şahin, Train re-scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013. 27: p. 1-15.
- [8] Adenso-Díaz, B., M.O. González, and P. González-Torre, On-line timetable re-scheduling in regional train services. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1999. 33(6): p. 387-398.
- [9] Marković, N., et al., Analyzing passenger train arrival delays with support vector regression. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015. 56: p. 251-262.
- [10] Lai, Y.-C., Y.-A. Huang, and H.-Y. Chu, Estimation of rail capacity using regression and neural network. *Neural Computing and Applications*, 2014. 25(7-8): p. 2067-2077.
- [11] MILLS, R. and S. PERKINS, School of Mathematics and Computer Studies, South Australian Institute of Technology. *Recent Developments in Mathematical Programming*, 1991: p. 345.
- [12] Çelebi, D., B. Bolat, and D. Bayraktar. Light rail passenger demand forecasting by artificial neural networks. in *2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering*. 2009. IEEE.
- [13] Brännlund, U., et al., Railway timetabling using Lagrangian relaxation. *Transportation science*, 1998. 32(4): p. 358-369.
- [14] Kroon, L.G. and L.W. Peeters, A variable trip time model for cyclic railway timetabling. *Transportation Science*, 2003. 37(2): p. 198-212.
- [15] Allen, G.J., K.M. Mabrouk, and M.L. Weigel. Utilizing an expert system for conflict resolution in a "train siding selection" simulation model. in *Proceedings Winter Simulation Conference*. 1996. IEEE.
- [16] Scardua, L. and C. Silva de Menezes. Train dispatching using expert systems. in *IASTED International Conference on Applied Informatics (15th: 1997: Innsbruck, Austria). Proceedings*. 1997.
- [17] Chiang, T.-W. and H.-Y. Hau. Cycle detection in repair-based railway scheduling system. in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1996. IEEE.
- [18] Gorman, M.F., An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem. *Annals of operations research*, 1998. 78: p. 51-69.
- [19] Assad, A.A., Models for rail transportation. *Transportation Research Part A: General*, 1980. 14(3): p. 205-220.

- [20] Jovanović, D. and P.T. Harker, Tactical scheduling of rail operations: the SCAN I system. Transportation Science, 1991. 25(1): p. 46-64.
- [21] Carey, M. and D. Lockwood, A model, algorithms and strategy for train pathing. Journal of the Operational Research Society, 1995. 46(8): p. 988-1005.
- [22] Cai, X., C. Goh, and A.I. Mees, Greedy heuristics for rapid scheduling of trains on a single track. IIE transactions, 1998. 30(5): p. 481-493.
- [23] Mees, A.I., Railway scheduling by network optimization. Mathematical and Computer Modelling, 1991. 15(1): p. 33-42.

¹.miwa

². Higgins

³. Mees

⁴. brandlund

⁵. Shortest Path Algorithm

⁶. kroon

⁷. piterz

⁸. allen

⁹. scardua

¹⁰. chiang

¹¹. Gorman