

بررسی ظرفیت عملی خط مترو در تأثیر الگو توزیع ساعتی و ورود و خروج مسافر به ایستگاه‌ها

مقاله علمی - پژوهشی

شهریار افندی زاده*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
امیرحسین حمزه‌ای، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
حمید بیگدلی‌راد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

صفحه ۴۲-۲۱

چکیده

یک برنامه زمان‌بندی قطار، برنامه‌ریزی زمان‌های ورود و خروج قطارها را در سکو‌ها، ایستگاه‌ها و تقاطع‌ها بیان می‌کند. از نقطه نظر ادارات راه‌آهن، برنامه زمانی قطارها به‌عنوان یک داده ورودی اساسی برای فرآیند زمان‌بندی است. از طرف دیگر افزایش سطح سرویس قطار فاکتور مهمی است که بر تصمیم مسافر و تصمیمات مربوط به شرکت‌ها برای انتخاب قطار به‌عنوان یک مد حمل‌ونقل قابل قبول تأثیر می‌گذارد. 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، ناوگان است. یک تکرش با در نظر گرفتن تمام عواملی که در شبکه بر روی زمان حرکت قطارها تأثیرگذار می‌باشند، می‌تواند ما را به سمت تولید یک برنامه‌ریزی درجهت نیل به اهداف ذکرشده سوق دهد. در این تحقیق که مطالعه موردی آن قطاری شهری بین تهران و کرج با استفاده تئوری صف با الگو M/G/C/C یک برنامه زمان‌بندی برای سرفاصله زمانی قطار براساس سه سناریو حداکثر ظرفیت قطار که در آن بعضی مسافران در تراکم کم ایستاده، ظرفیت در حالت همه نشسته و حالت دیگر بین این دو حالت در نظر گرفته شد. با استفاده از الگو ساعتی در مطالعه موردی خط ۵ بررسی شد، ۳۳٪ توزیع در ایستگاه‌های میانی است، در حال حاضر برنامه زمان‌بندی فعلی مترو باعث تاخیرات و نارضایتی برای گروهی از مسافران است که زمان‌بندی پیشنهادی آن تا حدودی کاهش می‌دهد. سرفاصله زمانی پیشنهادشده بین بازه ۶ لغایت ۳۰ دقیقه در سناریوهای مختلف برای ساعات مختلف است. سرفاصله زمانی پیشنهادی باعث کاهش ۲۱٪ زمان انتظار می‌شود.

۱- مقدمه

تخمین‌های را بر پایه‌ی مشاهدات قبلی ارائه نمود که به نحوه قابل قبول مناسبی حقیقت آتی را نمایش دهند. این ابزار به تصمیم‌گیران کمک می‌کند، با درک مناسب شرایط در آینده، تصمیماتی را اتخاذ نمایند که به بهترین وجه ممکن از ظرفیت‌های موجود استفاده گردد (Hajjsoleimani et al., 2021). در صورت اطلاع‌رسانی مناسب به استفاده‌کنندگان سیستم حمل‌ونقل و مطلع ساختن آنها از شرایط ترافیکی در نقاط مختلف شبکه‌ی حمل‌ونقلی و در مواردی در بازه‌های زمانی پیش رو، این امکان

مترو به‌عنوان راه‌حل ترافیک و یک وسیله حمل‌ونقل عمومی سنگین و مهم در دنیا، امروز تبدیل به یک ضرورت شده است. نیاز به مدیریت ترافیک و برنامه‌ریزی امری اجتناب‌ناپذیر است (Afandizadeh Zargari et al., 2019). برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ترافیک، مستلزم درک درست و مناسب از شرایط آبی مسیرها در بازه‌های کوتاه‌مدت است و بلندمدت است و بدون در اختیار داشتن تخمین‌های نزدیک به واقعیت، برنامه‌ریزی معنای نخواهد داشت. برای مرتفع ساختن این مشکل می‌توان

سپس با توجه به اینکه یک نوع قطار در شبکه وجود دارد، یک روش ابتکاری بر اساس درخت شاخه و حد جهت حل مسئله ارائه داده است که ارزیابی گره‌ها توسط یک تابع مقدار تأخیر قطارها صورت می‌گیرد (Wang et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر، مسئله موردنظر را برای شبکه تک خطه با فرض شروع حرکت ثابت و عدم وجود سبقت به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه نموده‌اند و برای حل آن تحت یک سری فرضیاتی از تصمیم‌گیری محلی جهت تلاقی‌ها استفاده نموده و جواب بهینه محلی را برای مسئله به دست آورده‌اند. آن‌ها مجاز بودن سبقت و تأثیر را در مدل مورد بررسی قرار داده و الگوریتم ارائه شده را با توجه به این فرض اصلاح کرده‌اند (Afandizadeh and Bigdeli Rad, 2021). مانینوت و همکاران نیز با تکیه بر زمان‌بندی حرکت قطارها را بر روی یک شبکه تک خطه مورد بررسی قرار داده‌اند (Mannino et al., 2022). عموماً روش سبک‌سازی لاگرانژی بدون جایگذاری در الگوریتم جستجوی شاخه و حد یافتن حل‌های بهینه را اگر دوگانگی در توقف‌ها و شرایط اولیه الگوریتم ابتکاری وجود داشته باشد، به‌سختی می‌تواند تضمین کند. وانگ و همکاران یک مدل زمان‌بندی دوره‌ای را برای محاسبه‌ی زمان‌بندی سفر در مسئله برنامه زمان‌بندی پیشنهاد می‌کنند (Wang et al., 2019). همان‌طور که ذکر شد مسئله زمان‌بندی قطار، یک بهینه‌سازی NP-hard است و این امر ثابت شده است. بنابراین برای مواجهه با نیازهای محاسباتی مسائل واقعی، روش‌های ابتکاری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Abdi et al., 2020).

روش‌های شبیه‌سازی

مدل‌های شبیه‌سازی به دلیل سادگی و قدرت بالای تجزیه و تحلیل مسائل، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای حل مسائل پیچیده می‌باشند. مونیانندی و عبدی از شبیه‌سازی جهت حل مسئله زمان‌بندی قطار استفاده کرده‌اند (Muniandi, 2020; Ameri et al., 2020).

برای استفاده‌کنندگان فراهم می‌آید که با برنامه‌ریزی‌های شخصی مبتنی بر این اطلاعات، از مسیرهای سریع‌تر برای رسیدن به مقصد استفاده کنند (Afandizadeh et al., 2023).

در این رابطه اولین کار توسط آدنزو و همکاران صورت گرفته است، وی براساس مسئله برنامه‌ریزی ماشین‌آلات، مسئله موردنظر را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی با فرض زمان‌های شروع ثابت و در نظر گرفتن حداکثر سرعت برای قطارها مدل‌سازی کرده و سپس با استفاده از روش شاخه و حد مسئله را برای ۱۰ قطار و بلاک حل کرده است (Adenso-Diaz et al., 1999). ژانگ و همکاران مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها را در یک شبکه تک خطه به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط مدل‌سازی نموده‌اند، 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 (Zhang et al., 2020). ژاوو و همکاران براساس روش سعی و خطای هوش مصنوعی (Gao et al., 2020) تینگ و مارتینلی از روش شبکه‌های عصبی، چیانگ و همکاران با تکنیک اصلاح مجدد و مکرر محدودیت‌ها، نیکلسون و بود از الگوریتم ژنتیک (Dündar & Şahin, 2013). دوندرا از الگوریتم ژنتیک که 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 (Dündar et al., 2013; Bai et al., 2019; Nitisiri et al., 2023).

روش‌های حل ابتکاری مدل‌های ریاضی

با توجه به گستردگی و پیچیدگی حل مدل‌های ریاضی زمان‌بندی حرکت قطارها، اکثر محققین از روش‌های ابتکاری با تلفیقی از روش‌های ابتکاری و روش‌های کلاسیک برنامه‌ریزی ریاضی برای حل این مسئله استفاده می‌کنند. وانگ و همکاران مسئله برنامه‌ریزی حرکت قطارها را با فرض زمان شروع حرکت و سرعت ثابت قطارها مورد بررسی قرار داده

روش‌های نوین جستجو

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 تلافی‌ها به وجود آمده در شبکه از یک الگوریتم ابتکاری استفاده شده است (Dai et al., 2021).

۲- پیشینه تحقیق

اگرچه روش شبیه‌سازی به علت پیچیدگی و نیاز به اطلاعات وسیع روش چندان ساده‌ای نیست، اما در عمل به دلیل قدرت بالای تجزیه و تحلیل مسائل، از متداول‌ترین روش‌ها برای حل مسائل پیچیده است. مزیت این روش‌ها این است که در زمان مناسب، جواب‌های موجهی تولید می‌کنند که از آن‌ها هم می‌توان برای تهیه برنامه اولیه حرکت قطارها و هم اصلاح و تغییر زمان‌بندی‌ها استفاده نمود و در نهایت معیارهای قابلیت اطمینان را می‌توان از نتایج این شبیه‌سازی‌ها محاسبه کرد. در مطالعات پیشین به منظور سنجش قابلیت اطمینان معیارهای ابتکاری متنوعی پیشنهاد شده است که اعتبار استفاده از آن‌ها به وسیله نتایج شبیه‌سازی‌ها تعیین می‌شوند (Martin-Iradi et al., 2022; Gestrelus, 2022). در جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات پیشین آورده شده است.

۳- روش شناسی تحقیق

در مطالعه حاضر مطابق فلوچارت شکل ۱ پس از مطالعه مدل‌ها و روش‌های مختلف بهینه‌سازی سرفاصله زمانی قطار به مدل‌ها و مختلف حمل بار مقایسه و معایب و مزایای آن بیان می‌گردد. سپس به ساخت مدل با توجه به تئوری صف و محدودیت‌های پرداخته می‌شود. متغیرها و پارامترهای رضایت مسافر بیان می‌گردد، سپس به ساخت مدل و اعتبار سنجی و در نهایت سناریوسازی و تحلیل حساسیت صورت می‌گیرد.

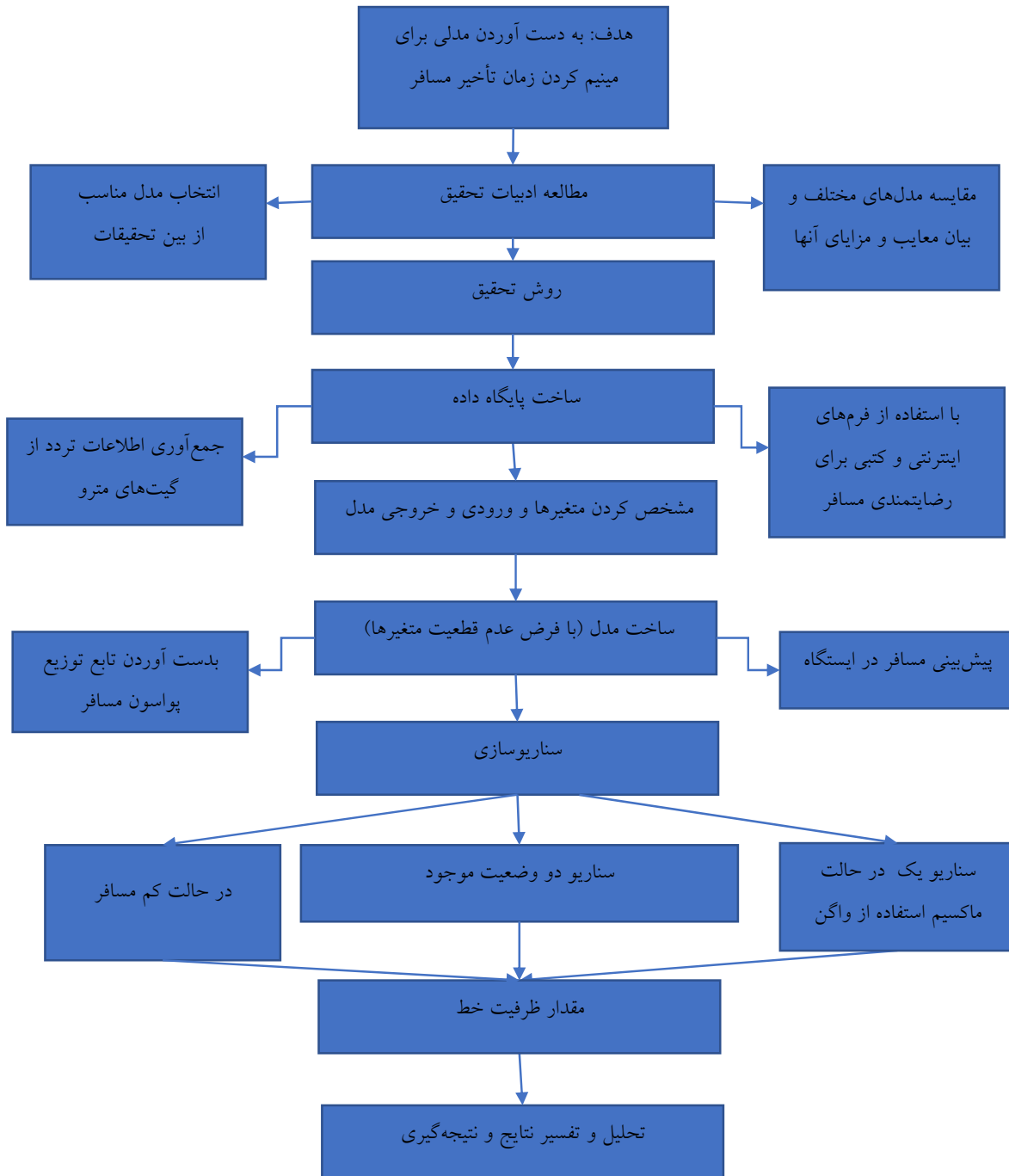
روش‌های جستجو، روش‌هایی هستند که در کل فضای موجه جواب باتوجه به پارامترهایی که مدنظر دارند به جستجو پرداخته و جواب‌های نسبتاً خوبی را برای مسئله پیدا می‌کنند. روش‌های نوینی که اخیراً در این عرصه ارائه شده است، بخشی از فضای جواب را مدنظر قرار داده و با استفاده از ابزارهای در دست سعی می‌کنند در کوتاه‌ترین زمان جواب خوبی را حاصل سازند، به عبارت دیگر در این روش‌ها، جستجو هدایت شده می‌باشد. (Bešinović et al., 2021) چندر و همکاران از روش شبکه‌های عصبی (Chander et al., 2022) با تکنیک اصلاح مجدد و مکرر محدودیت‌ها 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.

زمان‌بندی ثانویه حرکت قطارها

این نوع مسائل در شبکه‌های راه‌آهن بر مبنای زمان‌بندی اولیه قطارها بنا شده و از لحاظ مدل‌سازی نیز مشابه آن‌هاست ولی از لحاظ حل به دلیل آنکه کوتاه‌ترین زمان جواب آن‌ها مورد نیاز می‌باشد. 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 (Assad, 1980). گارسیا و همکاران مسئله موردنظر را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط مدل‌سازی بیان کردند. مدل ارائه شده برای یک شبکه دوخطه متشکل از دو نوع قطار عادی و سریع با فرض مجاز بودن سبقت و زمان شروع حرکت ثابت برای قطارها مورد بررسی قرار گرفته است، برای حل مسئله ابتدا از یک روش ابتکاری، حد اولیه‌ای برای جواب‌ها محاسبه شده و سپس توسط شاخه واحد و با استفاده از حد پایین به دست آمده جواب بهینه مسئله محاسبه شده است. (Garcia Marquez et al., 2021). دای و همکاران نیز برای بیان این مسئله از مفاهیم شبکه استفاده کرده و حرکت قطارهای باری را بر روی شبکه‌های تک خطه را آهن

جدول ۱. خلاصه ای از مطالعات پیشین

| ردیف | محقق | سال | نتایج |
|------|--------------|------|---|
| ۱ | زو و همکاران | ۲۰۱۴ | با استفاده از تئوری صف و همچنین هزینه ناشی از استفاده بیش از حد کارکنانی 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. |
| ۲ | چن و همکاران | ۲۰۱۸ | در این تحقیق به توزیع مسافر در ایستگاه مترو پرداخته شده است. روش‌های متعددی را می‌توان به منظور اندازه‌گیری قابلیت اطمینان برنامه زمان‌بندی به کاربرد. روش‌های تحلیلی معمولاً در دستگاه‌های بسیار ساده، به‌کاربرده می‌شوند. این روش‌ها عموماً با ساده‌سازی‌ها و فرضیات زیادی همراه است. |
| ۳ | پن و همکاران | ۲۰۱۸ | در این تحقیق به بررسی سیستم تهریه در مقدار تقاضا مسافر پرداخته شده است. در مسیرهای دو خطه فرض بر آن است که یکی از خطوط به مسیر رفت و دیگری به مسیر برگشت اختصاص داده می‌شود. مدل برای یک کریدور است نه یک شبکه. |
| ۴ | یو و جو یان | ۲۰۲۲ | به بررسی حمل و نقل مسافر و بار در مترو شهری و برون شهری پرداخته شده است و ظرفیت قطار در بارگیری مورد بررسی قرار گرفته است. |
| ۵ | یو و همکاران | ۲۰۲۲ | شبیه سازی زمانبندی‌های مختلف را ارزیابی می‌کند و باعث می‌شود که زمان بندی LP بیشتر بهبود یابد. برای مورد شبکه IC، نتیجه نهایی یک جدول زمانی با زمان انتقال مناسب و هزینه انتظار، یعنی ۴۰٪ پایین تر از جدول زمانی فعلی است. از آنجا که مدل سازی LP مداوم پیاده‌سازی شده است، روش پیشنهادی برای ایجاد جدول زمانی بهتر حتی برای شبکه‌های گسترده‌ای از راه‌آهن نیز بسیار امیدوار کننده است. |
| ۶ | شی | ۲۰۲۲ | مسأله زمانبندی حرکت قطارها را در یک شبکه تکه خطه بصورت برنامه ریزی عدد صحیح مخلوط مدلسازی نموده‌اند، به اینصورت که تابع هدف بصورت حداقل کردن مجموعه تأخیرات وزنی قطارها به همراه هزینه‌های عملیاتی آنها بصورت یک تابع غیرخطی مطرح شده و محدودیت‌های تلاقی، سبقت، توالی و سرعت بصورت روابط خطی عنوان گشته‌اند. |
| ۷ | زنگ | ۲۰۲۰ | بخشی از فضای جواب را مد نظر قرار داده و با استفاده از ابزارهای در دست سعی می‌کنند در کوتاه‌ترین زمان جواب خوبی را حاصل سازند، بعبارت دیگر در این روش‌ها، جستجو هدایت شده می‌باشد. فوکوموری و همکاران براساس روش سعی و خطای هوش مصنوعی |
| ۸ | ژیاوفنگ | ۲۰۲۲ | برای تهیه برنامه اولیه حرکت قطارها و هم اصلاح و تغییر زمانبندی‌ها استفاده نمود و در نهایت معیارهای قابلیت اطمینان را می‌توان از نتایج این شبیه‌سازی‌ها محاسبه کرد. در مطالعات پیشین به منظور سنجش قابلیت اطمینان معیارهای ابتکاری متنوعی پیشنهاد شده است که اعتبار استفاده از آنها بوسیله نتایج شبیه سازی‌ها تعیین می‌شوند. |
| ۹ | دینگ | ۲۰۲۳ | 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 مسأله پیدا می‌کنند. روش‌های نوینی که اخیراً در این عرصه ارایه شده است، بخشی از فضای جواب را مد نظر قرار داده و با استفاده از ابزارهای در دست سعی می‌کنند در کوتاه‌ترین زمان جواب خوبی را حاصل سازند، بعبارت دیگر در این روش‌ها، جستجو هدایت شده می‌باشد. فوکوموری و همکاران براساس روش سعی و خطای هوش مصنوعی |



شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق

است. در سناریو دو، کاهش زمان تأخیر مسافر در اولویت است، و در کنار آن به‌راحتی مسافر پرداخته‌شده است. راحتی هرچند به عوامل مختلفی بستگی دارد، اما برای سادگی فرض، تنها به فضای اشغال پرداخته‌شده است. زیرا عوامل دیگر چون تهویه،

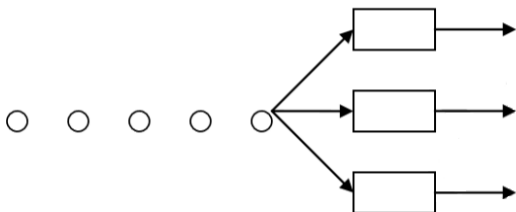
در قسمت ساخت مدل، می‌توان شرایط مختلفی را در نظر گرفت، برای ساخت برنامه زمان‌بندی در صورتی که راحتی مسافر کمتر مورد توجه باشد و سود شرکت در اولویت برنامه‌ریز باشد، برنامه زمانی متفاوتی است، سناریو یک برای این منظور

-اولین فرد (انباشته‌ای) ورودی برای سرویس انتخاب می‌شود. آخرین ورودی اولین سرویس در انبارهایی که کالای اسقاط ندارند رایج است چون دسترسی به اقلام راحت‌تر است. - به‌طور تصادفی و مستقل از زمان ورود به‌صفت مشتری انتخاب می‌شود.

توجه: در خیلی مواقع هیچ نظمی را نمی‌توان برقرار کرد. مثلاً در سر چهارراه برای عبور از چراغ کلاً نظمی نیست. کلاً در جاهایی که مردم عادت به صف بستن ندارند این حالت روی می‌دهد.

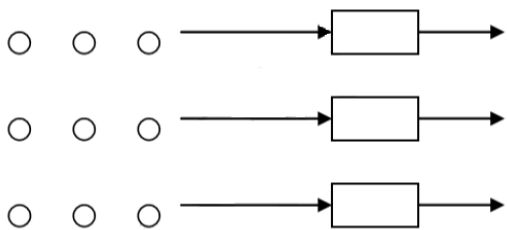
تعداد کانال‌های سرویس

منظور تعداد ایستگاه‌های سرویس موازی است که به‌طور هم‌زمان به مشتریان سرویس می‌دهند و دو نوع می‌باشند. نوع اول که برای همه سرورها یک صف واحد است (شکل ۲).



شکل ۲. همه سرورها یک صف واحد

و نوع دوم که هر کانال یک صف جداگانه دارد (۳).



شکل ۳. هر سرور یک صف جدا دارد

توزیع پواسون

X معمولاً در الگو صف در قطار نحوه ورود مسافران به ایستگاه از توزیع پواسون پیروی می‌کند، از این رو به توضیح این توزیع پرداخته می‌شود. یک متغیر تصادفی غیر منفی عدد صحیح با احتمالات نقطه‌ای است. به همین طریق می‌توان این توزیع را به‌عنوان تعداد دفعات وقوع یک واقعه ورود مشتری در یک

ارائه سرویس‌های مخصوص مسافر در حیطة این پژوهش نیست. راحتی مسافر در زمانی که مسافر به‌صورت فشرده و در واگن ازدحام مسافر زیاد است، کاهش می‌یابد. در سناریو سه، برنامه زمان‌بندی به‌صورت فی‌مابین دو حالت اول و دوم است. یعنی حالت بهینه‌ای که هم‌سود شرکت در نظر گرفته‌شده است و هم تا حد امکان راحتی مسافر هر سه سناریو سه هدف مختلف دنبال می‌کنند در نهایت سه برنامه زمان‌بندی با یکدیگر مقایسه و تحلیل و بررسی می‌گردد. یک سیستم صف را می‌توان به‌صورت مسافرانی تعریف کرد که برای سرویس گرفتن وارد سیستم می‌شوند و اگر سرویس در اختیار نباشد برای آن منتظر می‌مانند و پس از انجام سرویس سیستم را ترک می‌کنند.

الگوی ورود مشتریان

تعداد متوسط ورودی در واحد زمان (میانگین نرخ ورودی) یا زمان متوسط مابین ورودی‌های متوالی، از هرکدام استفاده کنید فرقی نمی‌کند و مشخص‌کننده الگوی ورود مشتریان است و در حالت کلی دارد:

۱- قطعی (توزیع آماری خاص وجود ندارد و متوسط نرخ ورودی آن را تعیین می‌کند).

۲- تصادفی (عدم قطعیت داریم و به میانگین و واریانس ... و نوع توزیع برای مسئله خودمان نیاز است).

نوع ورود مسافران

۱- تک‌به‌تک

۲- انباشته‌ای با گروهی: در یک لحظه بیش از یک ورودی به سیستم (نه سرویس) داریم. تعداد مسافران، انباشته یا قطعی است یا تصادفی

نوع واکنش مسافران

یعنی مسافر به‌محض ورود به سیستم چه تصمیمی می‌گیرد.

- و هراندازه صف طولانی باشد صبر می‌کند.

- و به نظر او صف طولانی است و سیستم را بلافاصله ترک می‌کند.

- به نظر او صف طولانی است و سیستم را پس از مدتی انتظار ترک می‌کند.

- و گاهی اوقات پس از مدتی انتظار صف را ترک می‌کند ولی به‌صفت دیگری در سیستم که به نظر او کوتاه‌تر است می‌رود.

- نظم صف

اشاره به طریقه‌ای دارد که مشتریان برای انجام سرویس انتخاب می‌شوند.

(۵) فاصله زمانی به طول t از یک فرایند پواسون به چگالی تعریف کرد.

$$f(k; \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (۱)$$

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 دو جمله 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.

انتخاب مدل صف M/G/C/C

در مطالعات مختلف برای صف های جاده و صف هایی که مسافر در انتظار قطار است مدل صف M/G/C/C پیشنهاد شده است (Guerouhaneet al., 2017). به علت پواسون بودن توزیع ورودی ها و نمایی بودن سرویس دهی، با تمام مقادیر ممکن n را شامل می شود و لذا می توانیم از رابطه ۲ استفاده شود. ولیکن قبل از آن باید u را نیز مشخص شود.

$$P_n = P_0 \pi_{i=1}^n \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} \quad (۲)$$

برای محاسبه میانگین نرخ سرویس دهی در این سیستم داریم: - اگر بیش از C مشتری در سیستم باشد، تمام سرویس دهندگان مشغول اند و هر سرویس کننده با نرخ u کار می کند؛ بنابراین میانگین نرخ خروجی cu است.

- اگر تعداد افراد سیستم از C کمتر باشد ($n < C$) در این صورت تنها n تا از C سرویس کننده مشغول اند و میانگین نرخ nu است.

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & 1 \leq n < c \\ c\mu & n \geq c \end{cases} \quad (۳)$$

بنابراین برای محاسبه P_n نیز دو حالت دارد.

$$\begin{cases} P_n = P_0 \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} & 1 \leq n < c \\ P_n = P_0 \frac{\lambda^n}{c^{n-c} c! \mu^n} & n \geq c \end{cases} \quad (۴)$$

همچنین برای محاسبه P_0 از رابطه ۵ استفاده می گردد.

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 \Rightarrow P_0 \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} + \sum_{n=c}^{\infty} \frac{\lambda^n}{c^{n-c} c! \mu^n} \right]$$

در ادامه داریم (Meisling, 1958).

(۶)

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{\lambda}{\mu} \\ \rho = \frac{r}{c} = \frac{\lambda}{c\mu} \\ i = n - c \\ P_0 \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{r^n}{n!} + \sum_{n=0}^{c-1} \frac{r^n}{c! c^{n-c}} \right] = 1 \\ \sum_{n=c}^{\infty} \frac{r^n}{c! c^{n-c}} = \frac{r^c}{c!} \sum_{n=c}^{\infty} \frac{r^{n-c}}{c^{n-c}} = \frac{r^c}{c!} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \end{array} \right.$$

و در نهایت به رابطه ۷ منجر می شود:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{r^n}{n!} + \frac{cr^c}{c!(c-r)} \right]^{-1} \quad (۷)$$

برای مقایسه کارایی تر فرمول لیتل با در نظر گرفتن نظم صف به صورت FIFO از رابطه ۸ استفاده می شود.

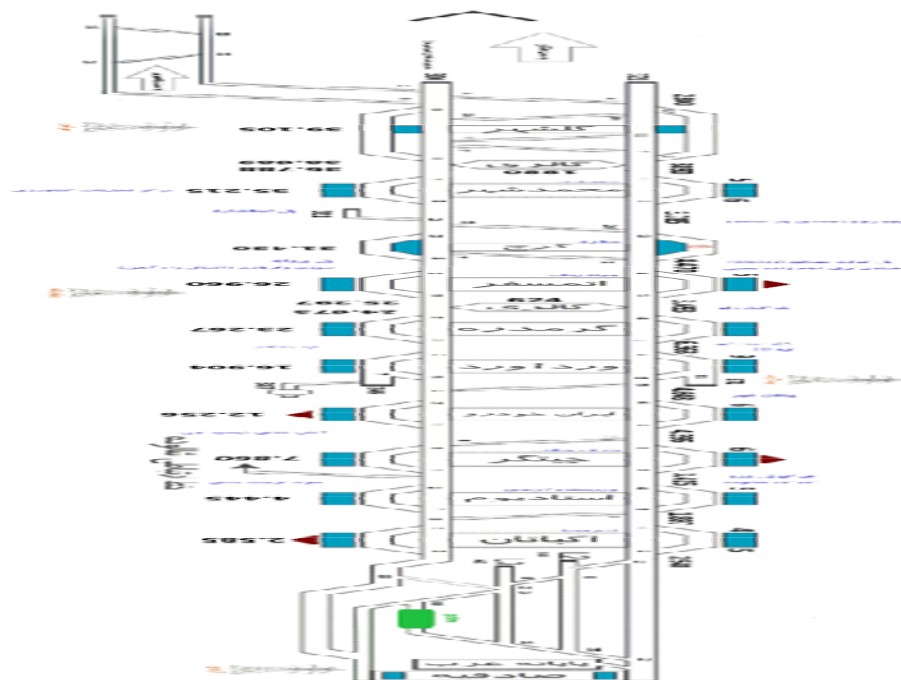
$$L = r + \frac{r^{c+1}}{c!(1-\frac{r}{c})^2} P_0 \quad (۸)$$

منطقه مورد مطالعه

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 شکل ۴ ایستگاه ها و فاصله آن ها از هم آورده شده است.

جدول ۲. تعداد مسافر جابجا شده توسط قطار

| تاریخ شروع بهره برداری ۱۳۷۷/۳/۱۲ شروع فعالیت روزانه: ۰۵:۳۰ پایانه فعالیت روزانه: ۲۱:۳۰ مدت: ۱۶ ساعت | | شماره خط: پنج |
|--|-------------|--|
| رشد | ۳/۴۰۲/۱۲۵ | تعداد مسافر آذر ماه ۱۳۹۶ (نفر) |
| درصد -۱/۵۰ | ۳/۴۵۳/۸۱۹ | تعداد مسافر در ماه قبل (نفر) |
| درصد -۱۱/۳۳ | ۳/۸۳۶/۷۰۱ | تعداد مسافر در ماه مشابه سال قبل (نفر) |
| - | ۳۰/۰۶۱/۰۳۲ | تعداد مسافر از ابتدای سال ۱۳۹۶ (نفر) |
| - | ۶۵۷/۷۹۰/۴۳۵ | تعداد مسافر از ابتدای بهره‌برداری (نفر) |
| % | ۱۱/۳۲ | درصد مسافر ماه از کل امسال |
| - | ۸۲۴ | متوسط تعداد مسافر به ازای هر قطار (نفر) |
| - | گلشهر | شلوغ‌ترین ایستگاه در ماه |
| - | ۱۴ آذر | شلوغ‌ترین روز در ماه |
| - | ۱۵۶/۵۵۰ | آمار مسافر شلوغ‌ترین روز در ماه |
| - | ۷:۰۰-۸:۰۰ | (شلوغ‌ترین ساعت برحسب مسافر) |
| رشد | ۵/۳۰۱/۲۸۶ | تعداد سفر آذر ۱۳۹۶ |
| درصد -۰/۸۹ | ۵/۳۴۸/۱۳۸ | تعداد سفر در ماه قبل |
| درصد -۷/۰۸ | ۵/۷۰۵/۴۳۵ | تعداد سفر در ماه مشابه سال قبل |
| - | ۴۶/۴۳۸/۳۶۰ | تعداد سفر از ابتدای سال ۱۳۹۶ |
| - | ۹۲۵/۵۹۹/۸۸۰ | تعداد سفر از ابتدای بهره‌برداری |
| % | ۱۱/۴۲ | درصد سفر ماه از کل سال |
| - | ۷-۸ | شلوغ‌ترین روز در ماه بر حسب سفر |
| رشد | ۳/۳۴۰/۱۱۵ | متوسط ماهیانه تعداد سفر در سال ۱۳۹۶ تا کنون |
| درصد -۱۲/۲۲ | ۳/۸۰۵/۰۶۹ | متوسط ماهیانه تعداد سفر در مدت مشابه در سال ۱۳۹۵ |
| رشد | ۵/۱۵۹/۸۱۸ | متوسط ماهیانه تعداد سفر در سال ۱۳۹۶ تا کنون |
| درصد -۸/۴۵ | ۵/۶۳۶/۳۴۴ | متوسط تعداد سفر در مدت مشابه در سال ۱۳۹۵ |



شکل ۴. ایستگاه خط متروی ۵ و مشخصات آن

جدول ۳. تعداد حرکت‌های قطار در شلوغ‌ترین ماه سال

| متوسط سال قبل | متوسط امسال تا کنون | ماه مشابه سال قبل | تغییرات نسبت به ماه قبل | ماه قبل ابان | آذر | |
|---------------|------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|-------|--|
| ۵/۱۶۲ | ۴/۳۸۴ | ۴/۹۹۴ | ۳۸ | ۴/۰۹۶ | ۴/۱۳۴ | تعداد کل حرکت برنامه‌ریزی شده |
| ۵/۱۵۷ | ۴/۳۷۹ | ۴/۹۸۵ | ۳۶ | ۴/۰۹۳ | ۴/۱۲۹ | تعداد کل حرکت مسافری انجام شده |
| ۱۵ | ۴۰ | ۳۹ | ۰ | ۶ | ۶ | تعداد کل حرکت‌های فوق‌العاده مسافری |
| ۳۰ | ۱۲ | ۱۶ | -۶ | ۱۰ | ۴ | تعداد کل حرکت‌های مانوری عملیاتی |
| ۵ | ۵ | ۹ | ۲ | ۳ | ۵ | تعداد کل حرکت‌های کنسل شده |
| ۲ | ۱ | ۳ | ۱ | ۱ | ۰ | تعداد کل حرکت‌های ناقص |
| ۹۴ | ۱۴۲ | ۹۶ | ۱۲۳ | ۱۱۶ | ۲۳۹ | تعداد کل حرکت‌های تأخیری |
| ۱/۸۲ | ۳/۲۶ | ۱/۹۳ | ۲/۹۵ | ۲/۸۳ | ۵۰۷۹ | درصد حرکت‌های تأخیردار به کل حرکت‌های مسافری |
| ۷۶۱ | ۱/۱۵۵ | ۷۹۴ | ۸۳۱ | ۱/۰۲۵ | ۱/۸۵۶ | زمان کل تأخیرات دقیقه |
| ۸/۸۵ | ۱۵/۸۲ | ۹/۵۶ | ۱۱/۹۴ | ۱۵/۰۳ | ۲۶/۹۷ | تأخیر متوسط هر حرکت مسافری ثانیه |
| ۹۹/۷۷ | ۹۹/۷۱ | ۹۹/۹۳ | ۰/۳۷ | ۹۹/۵۵ | ۹۹/۱۸ | میانگین راندمان ترافیک |

جدول ۴. تعداد تردد در ایستگاه‌های مختلف خط

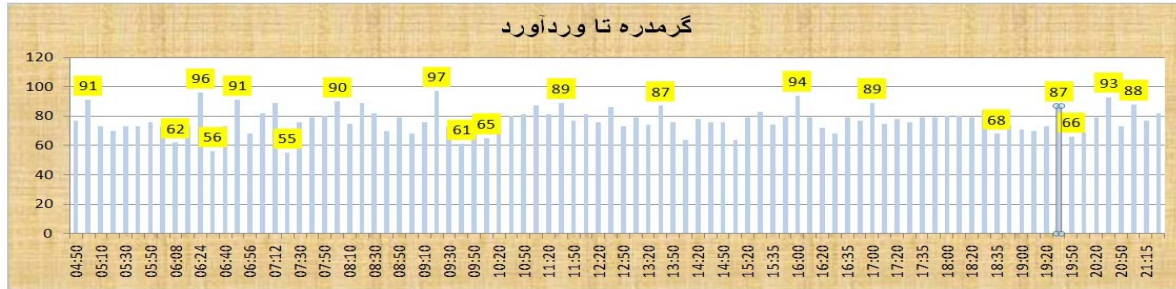
| نام ایستگاه | ۵-۶ | ۶-۷ | ۷-۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۱ | ۲۲ | ۲۳ | ۲۴ | جمع | درصد از کل | جمع ماه قبل | درصد از کل |
|----------------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------------|-------------|------------|
| تهران (صادقیه) | ۹۵۸/۱ | ۸۱۶/۱ | ۸۳۵/۱ | ۹۲/۵ | ۹۴/۴ | ۸۶/۳ | ۴۵/۳ | ۲۵/۳ | ۲۹/۳ | ۸۱/۳ | ۶۱/۴ | ۱۱۶/۵ | ۰۴/۱ | ۱۶/۳ | ۵۵/۴ | ۸۷/۲ | ۸۷/۳ | ۴۶/۱ | ۰/۳ | ۰/۲۴ | ۰/۱۰۱۵ | ۰/۲۳۳ | ۰/۲۴۴ |
| ارم سبز | ۹۴۶/۱ | ۸۰۵/۱۴ | ۹۳۰/۲۲ | ۱۶/۱۰ | ۲۴/۱ | ۲۳/۹ | ۴۱/۷ | ۴۶/۶ | ۴۲/۶ | ۱۱/۷ | ۳۵/۷ | ۱۰۸۶/۹ | ۰۸/۱۱ | ۱۳/۸ | ۲۲/۶ | ۳۲/۱ | ۳۲/۷ | ۲۴/۲ | ۰/۲۴ | ۰/۹۱۶ | ۰/۷۲۳ | ۰/۴۳۹ | ۰/۴۵۱ |
| ورزشگاه آزادی | ۱۶۱ | ۸۰۶/۱ | ۳۸۸/۲ | ۱۵/۲ | ۱۵/۲ | ۸۷/۱ | ۵۷/۱ | ۴۱/۱ | ۴۴/۱ | ۸۱/۲ | ۸۰/۱ | ۵۵۴/۲ | ۰۴/۳ | ۲۹/۲ | ۱۶/۷ | ۲۶/۴ | ۴۴/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۹۳۰ | ۰/۲۰۰ | ۰/۱۲۲ | ۰/۱۰۰ |
| چیتگر | ۷۳۵ | ۸۴۸/۱۲ | ۴۹۵/۱۴ | ۸۷/۲ | ۸۷/۱ | ۹۳/۸ | ۹۳/۸ | ۹۳/۷ | ۴۵/۷ | ۷۷/۶ | ۳۲/۹ | ۳۰/۱۵ | ۱۹/۲۰ | ۴۵/۱۴ | ۳۱/۸ | ۷۱/۲ | ۱۵/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۰۲۹ | ۰/۵۸۲ | ۰/۴۸۱ | ۰/۴۸۸ |
| ایران خودرو | ۲۶۶/۱ | ۹۲۸/۷ | ۰۳۳/۹ | ۴۹/۸ | ۵۶/۶ | ۷۲/۵ | ۹۵/۴ | ۸۳/۴ | ۳۴/۵ | ۶۹/۵ | ۰۱/۸ | ۱۶۸/۱۰ | ۸۱/۲۱ | ۲۶/۱۲ | ۳۶/۶ | ۹۳/۷ | ۹/۹ | ۰/۹ | ۰/۹ | ۰/۶۱۰ | ۰/۰۱۶ | ۰/۳۵۰ | ۰/۳۴۴ |
| وردآورد | ۰۸۹/۳ | ۴۰۹/۱۲ | ۵۱۶/۱۳ | ۶۴/۱ | ۰۴/۹ | ۱۴/۸ | ۲۴/۷ | ۵۹/۷ | ۶۵/۷ | ۳۸/۹ | ۲۹/۱ | ۳۵۲/۱۷ | ۴۲/۳۲ | ۰۵/۱۶ | ۱۴/۱۶ | ۲۳/۱ | ۰/۱۳ | ۰/۱۳ | ۰/۱۳ | ۰/۸۶۹ | ۰/۶۱۴ | ۰/۴۸۷ | ۰/۴۸۵ |
| گرمدره | ۴۸۷ | ۹۵۰/۱ | ۱۶۱/۲ | ۷۰/۹ | ۷۰/۱ | ۲۱/۳ | ۰۲/۷ | ۸۹/۷ | ۹۵/۱ | ۹۹/۷ | ۴۹/۵ | ۴۰۷/۲ | ۹۰/۲ | ۱۴/۱ | ۱۵/۱ | ۳۳/۲ | ۱۴/۱ | ۰/۱۴ | ۰/۱۴ | ۰/۵۸۸ | ۰/۴۳۳ | ۰/۰۶۷ | ۰/۰۶۰ |
| اتمسفر | ۱۷۴/۱ | ۴۲۳/۵ | ۱۴۵/۵ | ۷۳/۲ | ۶۶/۷ | ۲۵/۲ | ۹۰/۱ | ۸۱/۱ | ۹۰/۱ | ۸۶/۱ | ۳۶/۲ | ۷۵۹/۳ | ۲۱/۵ | ۱۶/۴ | ۲۷/۳ | ۳۸/۴ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۰/۲ | ۰/۰۹۹ | ۰/۸۲۰ | ۰/۱۳۶ | ۰/۱۲۸ |
| کرج | ۷۳۸/۵۲ | ۲۰۸/۱۱۵ | ۴۱۶/۱۲ | ۴۸/۷ | ۴۸/۹ | ۱۵/۳ | ۲۲/۷ | ۳۶/۳ | ۵۱/۴ | ۰۸/۲ | ۶۷/۱ | ۱۷۴/۴۱ | ۰۳/۴۰ | ۰۳/۴۰ | ۴۸/۴۰ | ۵۶/۲۲ | ۴۵/۵ | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۸۴۰ | ۰/۲۴۷ | ۰/۲۰۲ | ۰/۲۱۸ |
| محمدشهر | ۹۳۶/۸ | ۹۱۷/۱۸ | ۵۸۸/۱۶ | ۹۹/۳ | ۹۹/۳ | ۲۱/۰ | ۵۱/۸ | ۲۴/۷ | ۹۴/۹ | ۸۵/۷ | ۳۶/۷ | ۴۱۹/۷ | ۸۴/۶ | ۹۳/۵ | ۲۸/۳ | ۵۲/۱ | ۱۰/۱ | ۰/۱۰ | ۰/۱۰ | ۰/۳۳۶ | ۰/۶۹۷ | ۰/۳۹۲ | ۰/۳۸۱ |
| گلشهر | ۸۹۷/۹۲ | ۷۲۴/۱۷۳ | ۶۳۱/۱۵ | ۸۴/۱۱ | ۹۱/۶ | ۲۶/۹ | ۶۴/۲ | ۵۷/۶ | ۷۹/۳ | ۴۵/۳ | ۷۸/۹ | ۰۵۶/۴۳ | ۸۰/۴۳ | ۰۱/۳۱ | ۰۸/۲۰ | ۴۵/۳ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۰/۷۴۱ | ۰/۴۹۹ | ۰/۳۹۲ | ۰/۳۰۲ |
| جمع | ۳۸۷/۱۶۸ | ۸۳۴/۴۰۲ | ۱۳۸/۱ | ۰۳/۳۶ | ۰۳/۳۶ | ۷۳/۹۵ | ۱۷/۶۶ | ۸۵/۵۹ | ۱۰۹/۶۰ | ۱۰۸/۶۴ | ۱۰۱/۸۷ | ۱۱۵/۲۰۹ | ۹۷/۴۵ | ۵۹/۱۹ | ۱۱/۱۳ | ۴۶/۳۴ | ۱۰/۳ | ۴۶/۳ | ۴۶/۳ | ۰/۹۸۲ | ۰/۸۶۴ | ۰/۷۲۲ | ۰/۰۰۱ |

۴- نتایج

۴-۱- حداقل سرفاصله زمانی با توجه به محدودیت ترمز قطار

هدف این قسمت بدست آوردن مقدار ماکزیمم مسافت طی شده تا زمان توقف است، برای این کار باید از ماکزیمم سرعت استفاده کرد، ماکزیمم سرعت برحسب برداشت داده‌های سرعت

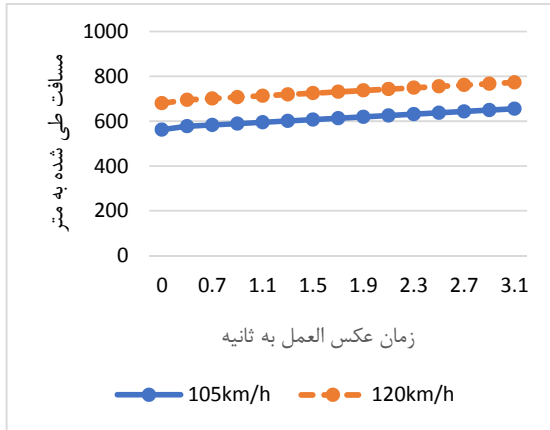
بین ایستگاه گرمدره تا وردآورد اتفاق می‌افتد که در این حالت ماکزیمم سرعت تا ۹۷ کیلومتر در ساعت ممکن است برسد.



شکل ۵. نمودار سرعت بین ایستگاه

جدول ۵. مشخصات قطار

| ظرفیت مسافر در قطار (نفر) | | | | | سامانه ترمز | سامانه تراکشن | برق مصرفی | بیشینه سرعت کیلومتر برساعت | شتاب (متر بر مجذور ثانیه) | | | جرم قطار بدون مسافر | ارایش قطار | شرح |
|---------------------------|------|------|------|-------|---|--|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------|-----------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| E.O.L | O.L | N.L | M.L | نشسته | | | | | ترمز | رانش | ترمز اظطراری | | | |
| ۲۲۳۰ | ۱۶۸۳ | ۱۲۹۰ | ۸۹۵ | ۳۱۰ | سامانه ترمز الکترونیوما تیک ترکیبی | تراکشن موتورهای DCتحریک سری با کنترل دور چاچری | ۷۵۰ ولت DC ریل سوم | ۸۰ | -۱/۲ | -۱ | ۰/۹ | ۲۵۷ | MC-M-MS- MS-M-M- MC | خط ۱ قطار DC |
| ۲۲۳۰ | ۱۶۸۳ | ۱۲۹۰ | ۸۹۵ | ۳۱۰ | سامانه ترمز الکترونیوما تیک ترکیبی | تراکشن موتورهای DCتحریک سری با کنترل دور چاچری | ۷۵۰ ولت DC ریل سوم | ۸۰ | -۱/۲ | -۱ | ۰/۹ | ۲۳۰ | TC-M-MS- MS-M-M- TC | خط ۲ قطار DC |
| ۲۲۳۰ | ۱۶۸۳ | ۱۲۹۰ | ۸۹۵ | ۳۰۲ | الکترونیوما تیک ترکیبی با توانمندی Regener ative انرژی | تراکشن موتورهای AC استکرون با کنترل دور F۳۷ | ۷۵۰ ولت DC ریل سوم | ۸۰ | -۱/۲ | -۱ | ۱ | ۲۵۰ | MC-T-M- M-M-t-MC | خط ۱ و ۲ قطار AC |
| ۲۵۰۰ | ۱۸۵۰ | ۱۵۶۰ | ۱۴۳۵ | ۱۳۷۶ | الکترونیوما تیک مجرا | تراکشن موتورهای DC تحریک سری با یکسوسازی ولتاژ | ۲۵ کیلو ولت شبکه بالاسری | ۱۴۰ | -۱ | -۰/۸ | ۰/۶ | ۵۹۳ | L-8t-L | خط ۵ قطار حومه شهری |

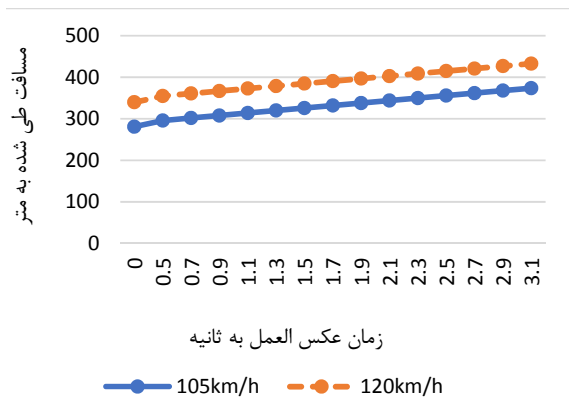


شکل ۶. نمودار تحلیل حساسیت برای حالت ترمزگیری نرمال

در صورتی که از ترمز اضطراری به همراه ترمز قطار استفاده شود مسافت طی شده با شتاب کاهشی ۱٫۸ مجذور ثانیه بر متر به ۲۸۱ متر کاهش پیدا می کند.

(۱۰)

$$h_{w \min} = \frac{v^2}{2b} = \frac{30^2}{2 \times 1.8} = 281m$$



شکل ۷. نمودار تحلیل حساسیت برای ترمزگیری در حالت استفاده از ترمز اضطراری

M: 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

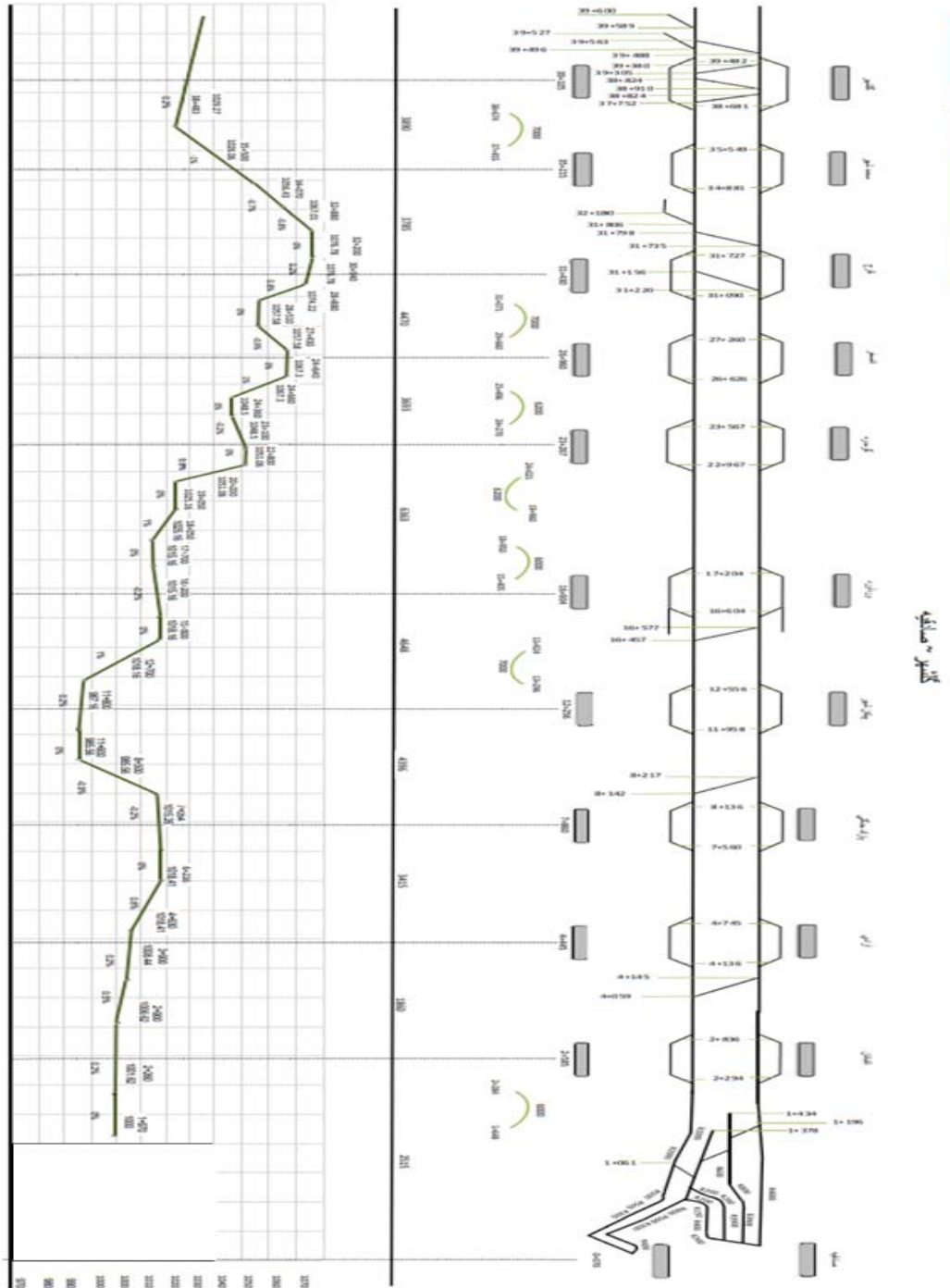
Variable Voltage Variable Frequency :VF

برای بدست آوردن مقدار مسافت ترمز، نیاز است شتاب ترمزگیری به دست آید که از جدول ۴ این مقدار برای قطارهای خط ۵ برابر با ۰٫۸ است. با استفاده از روابطی که در بخش قبل در مورد مسافت ترمزگیری بیان شد، مقدار مسافت برابر رابطه ۹ می گردد.

$$v = 105km / h \rightarrow 30m / s \quad (9)$$

$$h_{w \min} = \frac{v^2}{2b} = \frac{30^2}{2 \times 0.8} = 562m$$

با اضافه کردن زمان عکس العمل راهبر (از ۰٫۵ ثانیه در حالت که قابل پیش بینی تا ۳ ثانیه در حالت غیرقابل پیش بینی) که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است. در صورتی زمان عکس العمل را از ۰٫۵ ثانیه به ۳ ثانیه افزایش دهیم مقدار مسافت طی شده برابر می شود با شکل ۶ که در آن دو نمودار یکی با فرض سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت و دیگری با فرض سرعت ۱۰۵ کیلومتر بر ساعت برای قطار در نظر گرفته شده است. سرعت اولیه عامل مهم تری در مسافت ترمزگیری است؛ اما با این حال زمان عکس العمل راهبر از ۰٫۵ به سمت ۳ ثانیه با فرض حالت غیر پیشبینانه حادثه برای راهبر است.



شکل ۸. نمودار پروفیل شب مسیر ریل در خط ۵

می‌رساند. به عبارت دیگر شیب در شدیدترین حالت سبب افزایش
 ۶۴۲-۵۶۲=۸۰ متر طول مسافت ترمزگیری شده است.

$$h_{w_{\min}} = \frac{v^2}{2b} = \frac{30^2}{2 \times 0.7} = 642m \quad (11)$$

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 ترمزگیری است؛ بنابراین حدود
 یک واحد شتاب ترمزگیری را کاهش می‌دهد و به عدد $0/7$

جدول ۷. ظرفیت خط مسافری قطار دوطبقه در حالت‌های مختلف

| ظرفیت مسافر هر قطار (نفر) در ساعت | | | | | دقیقه |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--|
| E.O.L | O.L | N.L | M.L | نشسته | سرفاصله زمانی (سرفاصله زمانی) |
| ۷۵۰۰۰ | ۵۵۵۰۰ | ۴۶۸۰۰ | ۴۳۰۵۰ | ۴۱۲۸۰ | ۲ |
| ۳۷۵۰۰ | ۲۷۷۵۰ | ۲۳۴۰۰ | ۲۱۵۲۵ | ۲۰۶۴۰ | ۴ |
| ۲۵۰۰۰ | ۱۸۵۰۰ | ۱۵۶۰۰ | ۱۴۳۵۰ | ۱۳۷۶۰ | ۶ |
| ۱۸۷۵۰ | ۱۳۸۷۵ | ۱۱۷۰۰ | ۱۰۷۶۳ | ۱۰۳۲۰ | ۸ |
| ۱۵۰۰۰ | ۱۱۱۰۰ | ۹۳۶۰ | ۸۶۱۰ | ۸۲۵۶ | ۱۰ |
| ۱۲۵۰۰ | ۹۲۵۰ | ۷۸۰۰ | ۷۱۷۵ | ۶۸۸۰ | ۱۲ |
| ۱۰۷۱۴ | ۷۹۲۹ | ۶۶۸۶ | ۶۱۵۰ | ۵۸۹۷ | ۱۴ |
| ۹۳۷۵ | ۶۹۳۸ | ۵۸۵۰ | ۵۳۸۱ | ۵۱۶۰ | ۱۶ |
| ۸۳۳۳ | ۶۱۶۷ | ۵۲۰۰ | ۴۷۸۳ | ۴۵۸۷ | ۱۸ |
| ۷۵۰۰ | ۵۵۵۰ | ۴۶۸۰ | ۴۳۰۵ | ۴۱۲۸ | ۲۰ |
| ۶۸۱۸ | ۵۰۴۵ | ۴۲۵۵ | ۳۹۱۴ | ۳۷۵۳ | ۲۲ |
| ۶۲۵۰ | ۴۶۲۵ | ۳۹۰۰ | ۳۵۸۸ | ۳۴۴۰ | ۲۴ |
| ۵۷۶۹ | ۴۲۶۹ | ۳۶۰۰ | ۳۳۱۲ | ۳۱۷۵ | ۲۶ |
| ۵۳۵۷ | ۳۹۶۴ | ۳۳۴۳ | ۳۰۷۵ | ۲۹۴۹ | ۲۸ |
| ۵۰۰۰ | ۳۷۰۰ | ۳۱۲۰ | ۲۸۷۰ | ۲۷۵۲ | ۳۰ |
| ۴۶۸۸ | ۳۴۶۹ | ۲۹۲۵ | ۲۶۹۱ | ۲۵۸۰ | ۳۲ |
| ۴۴۱۲ | ۳۲۶۵ | ۲۷۵۳ | ۲۵۳۲ | ۲۴۲۸ | ۳۴ |
| ۴۱۶۷ | ۳۰۸۳ | ۲۶۰۰ | ۲۳۹۲ | ۲۲۹۳ | ۳۶ |
| ۳۹۴۷ | ۲۹۲۱ | ۲۴۶۳ | ۲۲۶۶ | ۲۱۷۳ | ۳۸ |
| ۳۷۵۰ | ۲۷۷۵ | ۲۳۴۰ | ۲۱۵۳ | ۲۰۶۴ | ۴۰ |
| ۲۵۰۰ | ۱۸۵۰ | ۱۵۶۰ | ۱۴۳۵ | ۱۳۷۶ | ۴۲ |

هرچند شتاب ترمزگیری با توجه به مشخصات شرکت مترو ۰٫۸ است، اما در عمل به نظر می‌رسد این مقدار حدود ۲۰٪ کمتر است، چنانچه در عمل خط ترمزگیری با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۸۰۰ متر و با سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۱۲۰۰ متر است. با فرض سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت چنانچه شتاب ترمزگیری ۰٫۸ باشد از آنجا که راهبر شتاب ترمز به تدریج افزایش می‌دهد، بنابراین متوسط شتاب از ابتدا مرحله ترمزگیری تا انتها متوسط شتاب برابر ۰٫۴ خواهد بود. بنابراین مینیمم سرفاصله زمانی قطار برابر ۲ دقیقه خواهد بود، که در جدول ۶ نشان داده شده است. در این جدول از شیب محور که کمتر یک درصد است و مقدار ناچیزی است صرفه نظر شده است.

جدول ۶. حداقل سرفاصله زمانی

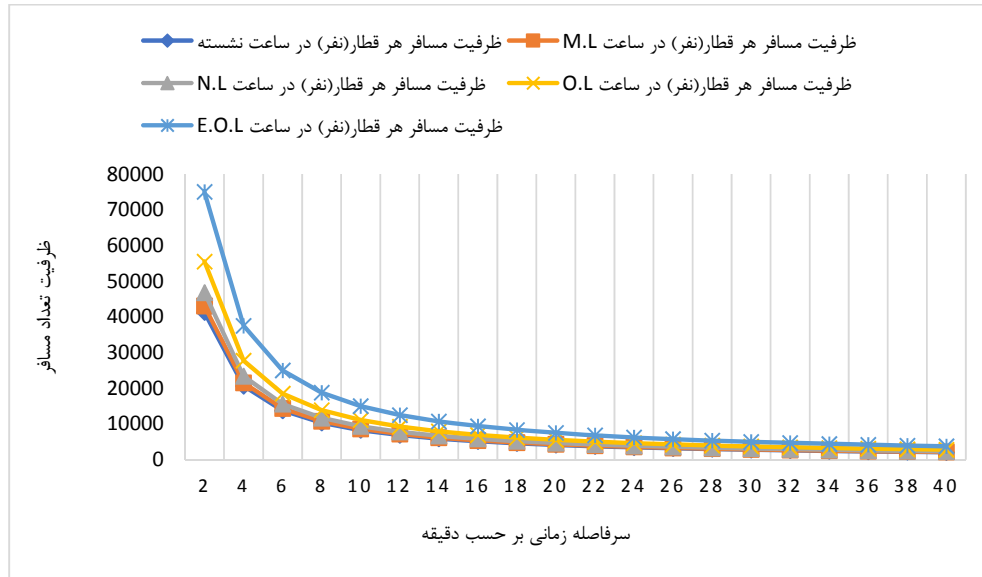
| واحد | مقدار | |
|--------------------|-------|-----------------------------|
| متر بر ثانیه | ۲۷ | ماکسیم سرعت |
| متر بر مجذور ثانیه | ۰٫۸ | ماکزیم شتاب ترمز |
| متر بر مجذور ثانیه | ۰٫۴ | متوسط شتاب ترمزگیری |
| ثانیه | ۷۰ | زمان ترمزگیری |
| ثانیه | ۳۰ | زمان سوار و پیاده شدن مسافر |
| ثانیه | ۲۰ | زمان بافر |
| ثانیه | ۱۲۰ | حداقل سرفاصله زمانی |

۴-۲- ظرفیت قطار در هر ساعت براساس سرفاصله

زمانی

با مشخص شدن میزان حداقل مسافت ترمزگیری می‌توان ماکسیم ظرفیت قطار را به دست آورد، ظرفیت مسافری قطار دوطبقه در حالت‌های مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است.

شکل ۹ 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 ۹. ظرفیت قطار خط ۵ مترو تهران کرج برای حالت‌های

ظرفیت: ظرفیت خط ۵ مترو در ساعت برحسب نفر مسافر

h : سرفاصله زمان قطار به دقیقه

جدول ۸ میانگین زمان انتظار براساس سرفاصله زمانی‌ها مختلف آورده شده است، در این جدول حجم مسافر برای ۴ حالت حجم تقاضا کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد آمده است. در جدول ۸ محاسبات با استفاده از نرم‌افزار آرنا صورت گرفته است. ورود مسافرها طبق فرایند پواسون است اما زمان بین ورود مسافر بر اساس توزیع نمایی است؛ بنابراین با توجه به جدول می‌توان نمودار زمان انتظار را برای ورودی مسافر با روش‌های مختلف به دست آورد، که زیاد شدن و کاهش سرفاصله زمانی میزان زمان انتظار مسافر افزایش پیدا کرده است.

با مدل‌سازی و استفاده داده‌های جدول ۸ مدل‌های ظرفیتی برای قطار در حالت مختلف روابط ۱۲ و ۱۳ حاصل می‌گردد.

ظرفیت برای حالت نشسته برابر رابطه ۱۲ است.

$$\text{ظرفیت} = 82560h^{-1} \quad (12)$$

ظرفیت برای حالت M.L برابر رابطه ۱۳ است.

$$\text{ظرفیت} = 86100h^{-1} \quad (13)$$

ظرفیت برای حالت N.L برابر رابطه ۱۴ است.

$$\text{ظرفیت} = 93600h^{-1} \quad (14)$$

ظرفیت برای حالت O.L برابر رابطه ۱۵ است.

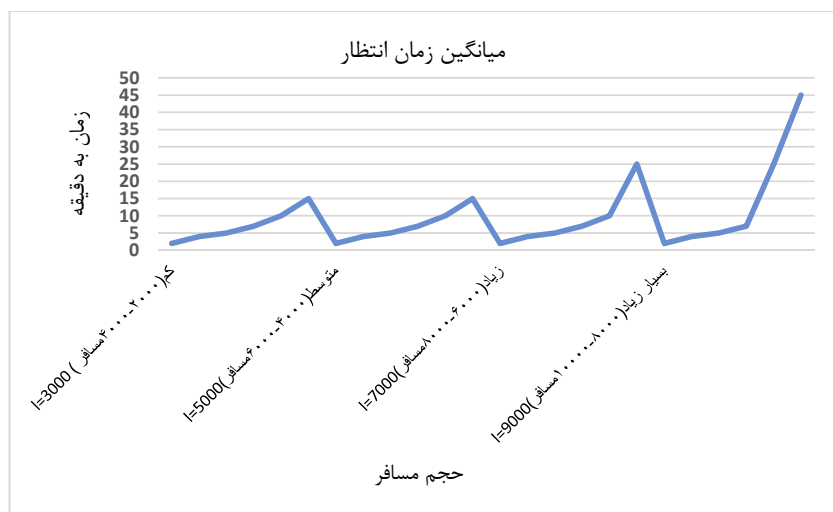
$$\text{ظرفیت} = 111000h^{-1} \quad (15)$$

ظرفیت برای حالت E.O.L برابر رابطه ۱۶ است.

$$\text{ظرفیت} = 150000h^{-1} \quad (16)$$

جدول ۸. میانگین زمان انتظار بر اساس سرفاصله زمانی های مختلف

| میانگین زمان انتظار | تعداد قطار اعزامی در ساعت | سرفاصله زمانی-دقیقه | |
|---------------------|---------------------------|---------------------|---|
| 2 | 15 | 4 | کم $\lambda=3000$ (مسافر 2000-4000) |
| 4 | 8 | 8 | |
| 5 | 6 | 10 | |
| 7 | 4 | 14 | |
| 10 | 3 | 20 | |
| 15 | 2 | 30 | |
| 2 | 15 | 4 | متوسط $5000=\lambda$ (مسافر 4000-6000) |
| 4 | 8 | 8 | |
| 5 | 6 | 10 | |
| 7 | 4 | 14 | |
| 10 | 3 | 20 | |
| 15 | 2 | 30 | |
| 2 | 15 | 4 | زیاد $7000=\lambda$ (مسافر 6000-8000) |
| 4 | 8 | 8 | |
| 5 | 6 | 10 | |
| 7 | 4 | 14 | |
| 10 | 3 | 20 | |
| 25 | 2 | 30 | |
| 2 | 15 | 4 | بسیار زیاد $\lambda=9000$ (مسافر 8000-10000) |
| 4 | 8 | 8 | |
| 5 | 6 | 10 | |
| 7 | 4 | 14 | |
| 25 | 3 | 20 | |
| 45 | 2 | 30 | |



شکل ۱۰. میانگین زمان انتظار مسافر

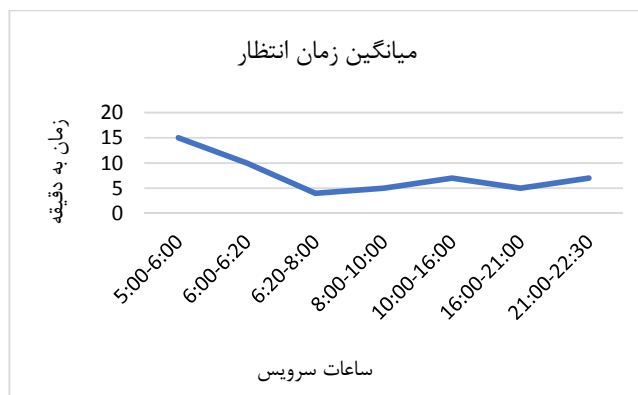
۴-۳- زمان انتظار در وضع موجود

به دست می‌آید. در شکل ۱۱ میانگین زمان انتظار مسافران برای وضع موجود خط ۵ مترو در ساعات مختلف شبانه‌روز آمده است.

با توجه به وضع موجود سرفاصله زمانی در خط ۵ متروی تهران که برای روزهای مختلف و ساعات مختلف متفاوت است. نسبت به این وضع موجود زمان انتظار مطابق شکل ۱۱ با استفاده از نرم‌افزار آرنا و فرض پواسون بودن ورود مسافران

جدول ۹. وضع موجود برنامه زمان‌بندی مسافران خط ۵ متروی تهران-کرج

| جمعه و روزهای تعطیل | | پنجشنبه | | شنبه تا چهارشنبه | |
|---------------------|-------------|------------|-------------|------------------|-------------|
| | | | | فاصله حرکت | ساعت |
| فاصله حرکت | ساعت | فاصله حرکت | ساعت | فاصله حرکت | ساعت |
| ۳۰ دقیقه | ۱۵:۱۰-۰۶:۱۵ | ۳۰ دقیقه | ۰۵:۰۰-۰۶:۰۰ | ۳۰ دقیقه | ۰۵:۰۰-۰۶:۰۰ |
| ۲۰ دقیقه | ۱۵:۱۰-۱۹:۳۰ | ۲۰ دقیقه | ۰۶:۰۰-۰۶:۲۰ | ۲۰ دقیقه | ۰۶:۰۰-۰۶:۲۰ |
| ۳۰ دقیقه | ۱۹:۳۰-۲۲:۳۰ | ۱۰ دقیقه | ۰۶:۲۰-۱۰:۳۰ | ۷ دقیقه | ۰۶:۲۰-۰۸:۰۰ |
| | | ۱۵ دقیقه | ۱۰:۳۰-۱۴:۰۰ | ۱۰ دقیقه | ۰۸:۰۰-۱۰:۰۰ |
| | | ۱۰ دقیقه | ۱۴:۰۰-۱۹:۰۰ | ۱۵ دقیقه | ۱۰:۰۰-۱۶:۰۰ |
| | | ۱۵ دقیقه | ۱۹:۰۰-۲۳:۳۰ | ۱۰ دقیقه | ۱۶:۰۰-۲۱:۰۰ |
| | | | | ۱۵ دقیقه | ۲۱:۰۰-۲۲:۳۰ |

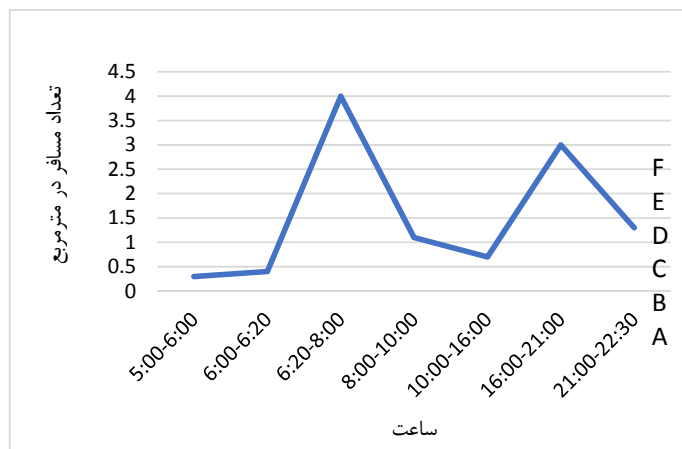


شکل ۱۱. میانگین زمان انتظار مسافران برای وضع موجود خط ۵ مترو

۴-۴- سطح سرویس در وضع موجود ایستگاه‌ها خط

در شکل ۱۲ در سمت راست نمودار سطح سرویس‌ها مشخص شده است، در دو قله پیک صبح و بعدظهر سطح سرویس F مشاهده می‌شود.

با توجه به سطح سرویس بررسی شده در ایت تحقیق، می‌توان سطح سرویس ایستگاه ابتدای خط را بصورت زیر با استفاده از نرم‌افزار Arena و مقدار صف تشکیل شده در خط برآورد کرد.



شکل ۱۲. سطح سرویس در وضع موجود ایستگاه قطار

۴-۵- ارائه ظرفیت قطار

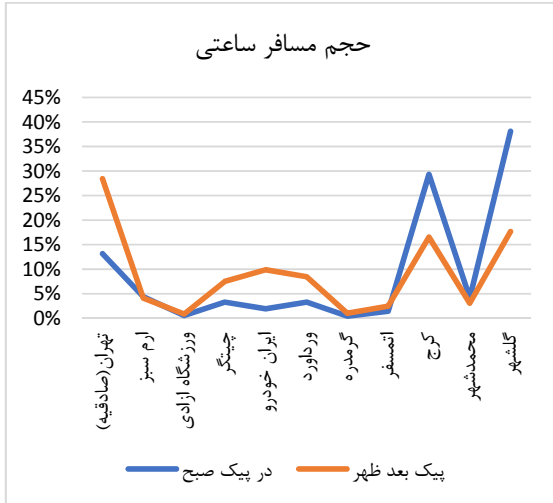
مسافر در حالت E.O.L در نظر گرفته شده که مسافر احساس راحتی در قطار ندارد و زمان انتظار بیشتر است. سناریو دو: برای حالت نشسته برای مسافر با زمان انتظار کم در نظر گرفته شده است. سناریو سه: حالت بهینه و بین سناریو یک و دو است.

برای ارائه برنامه زمان بندی سه سناریو با سود زیاد برای شرکت، راحتی برای مسافر و ترکیب این دو حالت در جدول ۱۰ آمده است. سناریو یک: در این سناریو سرفاصله زمانی بر اساس بیشترین سود شرکت در نظر گرفته شده است، در این صورت ظرفیت

جدول ۱۰. سرفاصله زمانی پیشنهادی برای سناریوهای مختلف

| سناریو سه | | سناریو دو | | سناریو یک | | ساعت |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|-------------|
| میانگین زمان انتظار | سرفاصله زمانی | میانگین زمان انتظار | سرفاصله زمانی | میانگین زمان انتظار | سرفاصله زمانی | |
| ۱۵ | ۳۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۱۵ | ۳۰ | ۵:۰۰-۶:۰۰ |
| ۱۰ | ۲۰ | ۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۶:۰۰-۶:۲۰ |
| ۴ | ۸ | ۳ | ۶ | ۷ | ۱۴ | ۶:۲۰-۸:۰۰ |
| ۵ | ۱۰ | ۵ | ۱۰ | ۵ | ۱۰ | ۸:۰۰-۱۰:۰۰ |
| ۷ | ۱۵ | ۷ | ۱۵ | ۷ | ۱۰ | ۱۰:۰۰-۱۶:۰۰ |
| ۵ | ۱۰ | ۵ | ۸ | ۷ | ۱۴ | ۱۶:۰۰-۲۱:۰۰ |
| ۷ | ۱۵ | ۷ | ۱۵ | ۱۰ | ۲۰ | ۲۱:۰۰-۲۲:۳۰ |

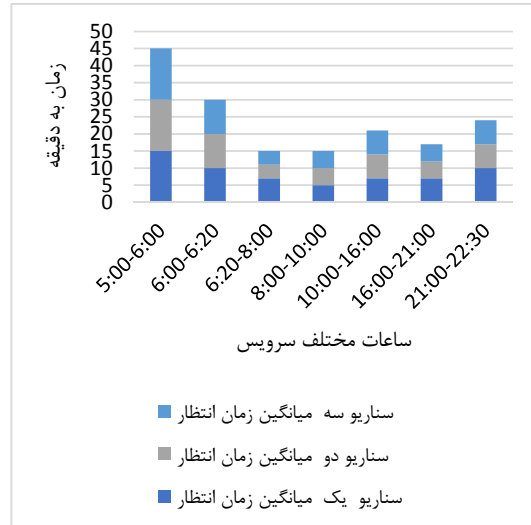
در شکل ۱۴ حجم مسافر ساعتی در ایستگاه‌ها آمده است که بیشترین حجم مسافر در ایستگاه‌های ابتدایی و انتهای خط است.



شکل ۱۴. حجم مسافر ساعتی در ایستگاه‌ها

۴-۶- صحت سنجی

از آنجایی که با استفاده از آزمون کولموگوروف اسمیرنوف می‌توان نرمال بودن توزیع را مشخص کرد. صحت این فرضیه توسط روش کولموگوروف اسمیرنوف و به کمک نرم افزار SPSS مورد آزمون قرار گرفت. فرض صفر در هر توزیع نرمال، به معنای پذیرفته شدن آن توزیع برای مقادیر متغیر مورد بررسی است. بنابراین، اگر سطح معناداری حاصل، از سطح معناداری ۰,۱ معادل فاصله اطمینان ۹۰ درصد بزرگتر باشد، فرض صفر و نرمال بودن توزیع پذیرفته خواهد شد. آزمون کولموگوروف اسمیرنوف برای مقادیر ورودی مدل صف مورد بررسی و در زمان برداشت، به طور جداگانه انجام شد. با بررسی نتایج و شکل‌ها مشاهده می‌شود که در آزمون توزیع نرمال، سطح معناداری حاصل در تمام موارد، بزرگتر از ۰,۱ می‌باشد. بنابراین فرض نرمال بودن توزیع پذیرفته می‌شود.



شکل ۱۳. زمان انتظار مسافر برای سناریوهای مختلف

در جدول ۱۱ مقایسه سناریو برتر با وضع موجود آمده است که تفاوت زیادی بین این دو نیست دلیل آن است که برای اجرای سناریوهای دیگر نیاز به تعداد واگن بیشتر است، که در این صورت به سود و راحتی بیشتر برای مسافر خواهد بود.

جدول ۱۱. مقایسه سناریو برتر با وضع موجود

| ساعت | وضع موجود | | سناریو دو | |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| | سرفاصله زمانی | سرفاصله زمانی | سرفاصله زمانی | میانگین زمان انتظار |
| ۵:۰۰-۶:۰۰ | ۳۰ دقیقه | ۱۵ | ۲۰ | ۱۵ |
| ۶:۰۰-۶:۲۰ | ۲۰ دقیقه | ۱۰ | ۱۰ | ۵ |
| ۶:۲۰-۸:۰۰ | ۷ دقیقه | ۳/۵ | ۶ | ۳ |
| ۸:۰۰-۱۰:۰۰ | ۱۰ دقیقه | ۵ | ۱۰ | ۵ |
| ۱۰:۰۰-۱۶:۰۰ | ۱۵ دقیقه | ۷/۵ | ۱۵ | ۷ |
| ۱۶:۰۰-۲۱:۰۰ | ۱۰ دقیقه | ۵ | ۸ | ۵ |
| ۲۱:۰۰-۲۲:۳۰ | ۱۵ دقیقه | ۷/۵ | ۱۵ | ۷ |

جدول ۱۲. آزمون صحت سنجی داده‌ها و نرمال‌سنجی

| Kolmogorov-Smirnov | | | | | |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Statistic | 0.07189 | | | | |
| P-Value | 0.03873 | | | | |
| α | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| Critical Value | 0.08303 | 0.09464 | 0.04509 | 0.04174 | 0.01206 |
| Anderson-Darling | | | | | |
| Statistic | 0.03773 | | | | |
| α | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| Critical Value | 0.08303 | 0.09464 | 0.04509 | 0.04174 | 0.01206 |
| Chi-Squared | | | | | |
| Statistic | 4.7409 | | | | |
| P-Value | 0.0393 | | | | |
| α | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| Critical Value | 0.08300 | 0.09460 | 0.04209 | 0.04171 | 0.01216 |

۵- نتیجه‌گیری

بازه ۳۰-۶ دقیقه در سناریوهای مختلف برای ساعات مختلف است. ماکزیمم سرعت برحسب برداشت داده‌های سرعت بین ایستگاه گرم‌دره تا وردآورد اتفاق می‌افتد که در این حالت ماکزیمم سرعت تا ۹۷ کیلومتر در ساعت ممکن است برسد. 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 ترمزگیری با توجه به مشخصات شرکت مترو ۰٫۸ است اما در عمل به نظر می‌رسد این مقدار حدود ۲۰ درصد کمتر است چنانچه در عمل خط ترمزگیری با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۸۰۰ متر و با سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۱۲۰۰ متر است. به دست آوردن ظرفیت قطار در هر ساعت بر اساس سرفاصله زمانی ممکن است که در این حالت بای 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 می‌رسد. در مورد ظرفیت خط یاب عبارت دیگر ظرفیت جابجایی مسافر در ساعت باید به سرفاصله زمانی و سرفاصله زمانی توجه کرد. با کاهش سرفاصله زمانی ظرفیت مسافر در خط در هر ساعت افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین، با یک عدم قطعیت در مقدار ظرفیت روبرو می‌شود. ورود مسافرها طبق فرایند پواسون است اما زمان بین ورود مسافر بر اساس توزیع نمایی است. وضع موجود ایستگاه ابتدای و انتهای قطار در بیشتر

در این تحقیق با هدف حداقل کردن زمان‌بندی قطارها زمان سیر قطارها از مبدأ به مقصد، جلب رضایت مسافران و صاحبان منافع، با کم کردن تأخیرات در ایستگاه‌ها و حداکثر کردن استفاده از ظرفیت خطوط، ایستگاه‌ها، ناوگان است. یک نگرش با در نظر گرفتن تمام عواملی که در شبکه بر روی زمان حرکت قطارها تأثیرگذار می‌باشند، می‌تواند ما را به سمت تولید یک برنامه‌ریزی در جهت نیل به اهداف ذکر شده سوق دهد. در این تحقیق، که مطالعه موردی آن قطاری شهری بین تهران و کرج با استفاده تئوری صف با الگو M/G/C/C یک برنامه زمان‌بندی برای سرفاصله زمانی قطار بر اساس سه سناریو حداکثر ظرفیت قطار که در آن بعضی مسافران در تراک کم ایستاده، ظرفیت در حالت مسافرها همه نشسته و حالت دیگر در حالت بین این دو حالت در نظر گرفته شد 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 این دو 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 سرفاصله زمانی تنظیم گردد. برنامه زمان‌بندی فعلی مترو باعث تأخیرات و نارضایتی برای گروهی از مسافران است که زمان‌بندی پیشنهادی آن تا حدودی کاهش می‌دهد. سرفاصله زمانی پیشنهاد شده بین

Highways: A Case Study. *Transport*, 29(4), 449-456.

-Elefteriadou, L., Torbic, D., & Webster, N. (1997). Development of Passenger Car Equivalents for Freeways, Two-Lane Highways, and Arterials. *Transportation Research Record*, 1572(1), 51-58.

-Hajjsoleimani, M. M., Abdi, A., & Bigdeli Rad, H. (2021). Intermodal Non-Motorized Transportation Mode Choice; Case Study: Qazvin City. *Space Ontology International Journal*, 10(3), 31-46.

-Hurtado-Beltran, A., & Rilett, L. R. (2021). Impact of CAV Truck Platooning on HCM-6 Capacity and Passenger Car Equivalent Values. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 147(2), 04020159.

-Kollar, A. (2014). The Supervision of Passenger Car Unit Values in Different Types of Urban Junctions with VISSIM Program. *Pollack Periodica*, 9(1), 49-60.

-Li, H., Zhou, Y., Li, S., & Zhu, H. (2019). Passenger Car Equivalents for Urban Roads Using Average Time Headway of Car Following Conditions. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(12), 1687814019897511.

-Macioszek, E. (2019). The Passenger Car Equivalent Factors for Heavy Vehicles on Turbo Roundabouts. *Frontiers in Built Environment*, 5, 68.

-Mirzahosseini, H., Shahradi, S., Afandizadeh Zargari, S., & Motevalli Habibi, H. (2021). Determination of Passenger Car Equivalent for Heavy Vehicles in Iran in Comparison with Highway Capacity Manual 2016. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-11.

-Sarraj, Y., & Jadili, I. (2016). Estimating Passenger Car Unit Factors for Buses and Animal Driven Carts in Gaza City, Palestine. *IUG Journal of Natural Studies*, 20(2).

-Sharma, M., & Biswas, S. (2021). Estimation of Passenger Car Unit on Urban Roads: A Literature Review. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10(3), 283-298.

-Zahiri, M., & Chen, X. (2018). Measuring the Passenger Car Equivalent of Small Cars and SUVs on Rainy and Sunny Days. *Transportation Research Record*, 2672(31), 110-119.

مواقع به ویژه در صبح و بعد ظهر با توجه به صف تشکیل شده و تعداد تجمع مسافران در ایستگاه در وضعیت F قرار دارد.

۶- مراجع

-Abdi, A., Mosadeq, Z., & Bigdeli Rad, H. (2020). Prioritizing Factors Affecting Road Safety Using Fuzzy Hierarchical Analysis. *Journal of Transportation Research*, 17(3), 33-44.

-Adnan, M., (2014). Passenger Car Equivalent Factors in Heterogenous Traffic Environment-Are we Using the Right Numbers? *Procedia Engineering*, 77, 106-113.

-Afandizade Zargari, S., Bigdeli Rad, H., & Shaker, H. (2019). Using Optimization and Metaheuristic Method to Reduce the Bus Headway (Case Study: Qazvin Bus Routes). *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 10(4), 833-849.

-Afandizadeh, S., & Bigdeli Rad, H. (2021). Developing a Model to Determine the Number of Vehicles Lane Changing on Freeways by Brownian motion Method. *Nonlinear Engineering*, 10(1), 450-460.

-Afandizadeh, S., Aziz Jalali, D., & Bigdeli Rad, H. (2023). Optimal Routing for Shared Autonomous Vehicles Feeder Services in Urban Networks. *Journal of Transportation Research*.

-Ahmed, A., Noman, S. M., Baig, M. A. U., Ngoduy, D., Adnan, M., Ismail, M. A., & Qadir, A., (2022). Estimating Passenger Car Equivalent Factors for Heterogeneous Traffic Using Occupancy-Density Linear Regression Model. *Transportation Research Record*, 2676(8), 209-220.

-Ameri, A., Bigdeli Rad, H., Shaker, H., & Ameri, M. (2021). Cellular Transmission and Optimization Model Development to Determine the Distances between Variable Message Signs. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 7(1), 1-16.

-Behzadi, G., & Shakibaei, F. (2016). Determination of Passenger Car Equivalent for Bus in Urban Roads Using AIMSUN (Case Study: Emam Reza Avenue, Amol City).

-Bouhours, E., & Basbas, S. (2021). Passenger Car Equivalent Value for Commercial Vehicles: A New Approach. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 49(4), 354-358.

-De Luca, M., & Dell'Acqua, G. (2014). Calibrating the Passenger Car Equivalent on Italian Two-Line

Investigating the Practical Capacity of the Metro Line in the Impact of the Hourly Distribution Pattern and the Departure and Arrival of Passengers to the Stations

Shahriar Afandizadeh, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Amir Hosein Hamzehi, M.Sc., Student, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

Hamid Bigdeli Rad, Ph.D., Candidate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: zargari@iust.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

Metro has become a necessity as a solution to traffic and a heavy and important means of public transportation in today's world. The need for traffic management and planning is inevitable. Therefore, the purpose of train scheduling is to minimize the time of the trains from the origin to the destination, to satisfy the passengers and stakeholders, to minimize the delays in the stations and to maximize the use of the capacity of the lines, stations, and fleet. An approach by considering all the factors that affect the time of trains in the network can lead us to produce a plan to achieve the mentioned goals. In this research, which is a case study of an urban train between Tehran and Karaj using queuing theory with the m/g/c/c pattern, a schedule for the train head based on three scenarios of the maximum capacity of the train in which some passengers are standing on the low track, the capacity in the mode of all passengers sitting, and the other mode was considered in the mode between these two modes. It was investigated using the hourly pattern in the case study of line 5, 32% of the distribution is in the middle stations, currently the current schedule of the metro causes delays and dissatisfaction is for a group of passengers, which the proposed timing reduces to some extent. The proposed time is between 6-30 minutes in different scenarios for different hours. The proposed time reduces the waiting time by 21%.

Keywords: Rail System Delay, Subway Passengers, Queu Theory, Train Timing