فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۲، زمستان ۱٤۰۱، ص. ۲۵۳۵-۲۵۱۹

مقاله علمی-پژوهشی

ارائه برنامه زمان‌بندی قطار بر اساس عدم‌قطعیت‌های موجود (مطالعه موردی: خط ۵ متروی تهران)

میلاد نظری، کارشناس ارشد راه و ترابری، گروه عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علی عبدی (مسئول مکاتبات)، دانشیار عمران راه و ترابری ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

Email: Aliabdi@eng.ikiu.ac.ir

حسن ذوقی، استادیار عمران راه و ترابری، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

دریافت: ۱٤۰۰/۰۵/۱۱ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۸/۰۵

چکیده

مترو یکی ازمهم‌ترین راهکارهای حل مشکل ترافیک و آلودگی هوا در جهان شناخته شده است. ایمنی بسیار بالا، راحتی وآسایش مسافران، کاهش مصرف انرژی، سرعت مناسب، قیمت پایین حمل مسافر در مقایسه با خودروهای شخصی از جمله مزیت‌های قطار شهری نسبت به سایر وسایل نقلیه عمومی است. مترو تهران به مجموعه قطار شهری تهران و همچنین «شرکت راه‌آهن شهری تهران و حومه» گفته می‌شود. این مترو در هفت خط اصلی در حال فعالیت است.هدف از زمان‌بندی قطارها حداقل کردن زمان سیر قطارها از مبدأ به مقصد، جلب رضایت مسافران و صاحبان منافع، باکم 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. در این پژوهش متغیرهایی همچون زمان توقف قطارها، حجم مسافرین در ساعات مختلف، الگوی ورودی مشتریان و زمان انتظار مسافرین به عنوان پارامترهای تاثیرگذار در تعیین سرفاصله زمانی قطار در نظر گرفته شده‌اند.سپس، ضمن پرداختن به وضع موجود خط پنج متروی تهران، باتوجه به عدم قطعیت‌های موجود، سناریوهایی تدوین گردید. هدوی پیشنهادشده بین بازه ۶-۳۰ دقیقه در سناریو های مختلف برای ساعات مختلف است تا در نهایت رضایت شهروندان تامین گردد و در وقتشان صرفه‌جویی شود و سیستم مدیریت شهری در جهت توسعه پایدار شهری گام بردارد.

کلمات کلیدی: سناریونگاری، سرفاصله زمانی، عدم‌قطعیت، قطار شهری

۱. مقدمه

برنامه زمان‌بندی قطار برنامه‌ریزی زمان‌های ورود و خروج قطارها را در سکوها، ایستگاه‌ها و تقاطع‌ها بیان می‌کند. هدف از زمان‌بندی قطارها حداقل کردن زمان سیر قطارها از مبدأ به مقصد، جلب رضایت مسافران و صاحبان کالا با کم کردن تاخیرات در ایستگاه‌ها و حداکثر کردن استفاده از ظرفیت خطوط، ایستگاه‌ها، ناوگان و خدمه است. در این مطالعه سناریوهای مختلف از نگاه مسافر، شرکت مترو با استفاده از برنامه‌ریزی خطی، برای ایجاد یک زمان‌بندی مناسب صورت خواهد گرفت. همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت در هدوی قطارها، سرعت قطارها، تقاضا مسافر و ظرفیت قطار سعی بر آن است تا بتوان پیش‌بینی عملی‌تری و زمان‌بندی بهتری برای حرکت قطارها به دست آورد.

نیاز به مدیریت ترافیک و برنامه‌ریزی امری اجتناب‌ناپذیر است. برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ترافیک، مستلزم درک درست و مناسب از شرایط آنی مسیرها در بازه‌های کوتاه‌مدت است و بلندمدت است و بدون در اختیار داشتن تخمین‌های نزدیک به واقعیت، برنامه‌ریزی معنای نخواهد داشت. هدف این پژوهش ارائه برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها می باشد.

ارائه برنامه زمان‌بندی بر اساس تقاضا مسافر نیاز به پیش‌بینی تعداد مسافر دارد، مدل‌های قبلی بر اساس ظرفیت خط و محدودیت‌ها است، در اینجا مدلی ابتکاری بر اساس ترکیب تئوری صف با پیش‌بینی مسافر و برنامه‌ریزی خطی ارائه خواهد شد.

۲. مبانی نظری پژوهش

۲-۱ تعریف عدم قطعیت

واژه عدم قطعیت حاکی از هر چیزی همانند قطعیت تا حدس‌های آگاهانه یا حدس و گمان فرضی است. کمبود اطلاعات بدیهی است که منجر به عدم اطمینان می‌شود، اما غالباً اختلاف نظر درباره آنچه شناخته شده است نیز می‌تواند به عدم قطعیت منجر شود. (Schneider & Kuntz-Duriseti,2002) عدم قطعیت به شرایطی اطلاق می‌شود که نتایج مشخص نیست و در موارد عدم قطعیت واقعی، ابزار دستیابی به نتایج (یعنی استنباط‌ها) نیز مشخص نیست. (Melander & Tell,2014)

به عبارت دیگر عدم قطعیت پدیده‌ای است که عمیقا در زندگی ما ریشه دارد و بسیاری از انتخاب‌ها و تصمیمات ما را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این کار از انتخاب‌های کوچک روزمره افراد شروع می‌شود و تصمیمات ا شرکت‌های چند ملیتی را پوشش می‌دهد. به ندرت می‌توان مطالعاتی در زمینه سازمان و مدیریت یافت که در آن‌ها پدیده عدم قطعیت ذکر نشده باشد. به این دلیل که عدم درک و مواجهه با عدم قطعیت در تصمیم‌گیری سازمانی، هزینه زیادی دارد. این هزینه‌ها به صورت نتایج پیش‌بینی نشده، اثرات منفی یا فرصت‌های از دست رفته بوجود می‌آیند. (Linovski,2019) حداقل دو نوع عدم قطعیت وجود دارد که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۲-۱-۱ عدم قطعیت در سرفاصله زمانی

در این نوع از عدم قطعیت، پارامترهایی همچون بی نظمی در سرفاصله زمانی حرکت، زمان توقف قطارها، ازدحام مسافران و تغییرات سفر و حجم مسافر مورد بررسی قرار میگیرد. این پارامترها در افزایش یا کاهش سرفاصله زمانی متروها نقش مهمی را ایفا می‌کنند. پارامترهای عدم‌قطعیت در سرفاصله زمانی به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱. پارامترهای عدم قطعیت در فاصله زمانی

پارامترهای عدم قطعیت در فاصله زمانی	بی‌نظمی در سرفاصله زمانی حرکت
	افزایش زمان توقف قطارها
	ازدحام مسافر
	تغییرات تقاضای سفر و حجم مسافر

۲-۱-۲ عدم قطعیت در ظرفیت واگن

در ساعات پیک ترافیک ظرفیت سیستم مترو مقدار مشخصی نیست، این مقدار حدود ۱۰-۲۰٪ به گفته کارشناسان مترو تغییر می‌کند، ازاین‌رو در این مطالعه ظرفیت به‌عنوان یک ثابت در نظر

گرفته نمی‌شود و آن را به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته می‌گیریم. این متغیر تأثیر زیادی بر سطح رضایت مسافران دارد، ازاین‌رو در روش تحقیق سناریوسازی برحسب این متغیر صورت می‌گیرد. در هر واگن دو نوع ظرفیت ایستاده و نشسته وجود دارد. ظرفیت نشسته در هیچ زمانی تغییر نمی‌کند اما ظرفیت ایستاده در هر واگن قابل‌تغییر است.

۲-۲ 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 موردنیاز می‌باشد و به عبارت دیگر برنامه‌ریزی به‌صورت لحظه‌ای می‌باشد، نمی‌توان از روش‌های زمان‌بر قبلی استفاده کرد به همین دلیل اکثر محققین یا به روش‌های ابتکاری روی آورده و یا از روش‌های شبیه‌سازی استفاده می‌کنند تا بتوانند در کوتاه‌ترین زمان جواب بهینه را پیداکرده و یا جواب موجه خوبی به دست آورند.

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) آریا و همکاران مسئله مورد نظر را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط مدل‌سازی بیان کردند. مدل ارائه‌شده 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 قرارگرفته است برای حل مسئله ابتدا از یک روش ابتکاری، حد اولیه‌ای برای جواب‌ها محاسبه‌شده و سپس توسط شاخه واحد و با استفاده از حد پایین به‌دست‌آمده جواب بهینه مسئله محاسبه‌شده است. لازم به ذکر است که در این مسئله به دلیل دوخطه بودن مسیر، بحث تلاقی قطارهای هم‌جهت موردنظر قرارگرفته است.(Araya &etc,1983)

۲-۳ الگوی ورود مسافران

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).

۲-٤ نوع ورود مسافران

۱- تک‌به‌تک

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

۲-۵ نوع واکنش مسافران

یعنی مسافر به محض ورود به سیستم چه تصمیمی می‌گیرد.

- هراندازه صف طولانی باشد صبر می‌کند.
- 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.
- گاهی اوقات پس از مدتی انتظار صف را ترک می‌کند ولی به‌صف دیگری در سیستم که به نظر او کوتاه‌تر است می‌رود.

۲-٦ نظم صف

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

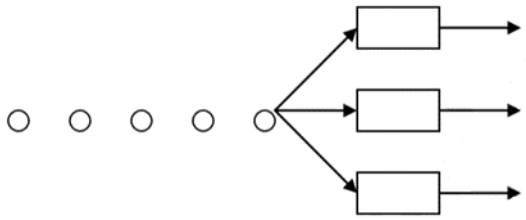
- اولین فرد (انباشته‌ای) ورودی برای سرویس انتخاب می‌شود. آخرین ورودی اولین سرویس: در انبارهایی که کالای اسقاط ندارند رایج است چون دسترسی به اقلام راحت‌تر است.

- به‌طور تصادفی و مستقل از زمان ورود به‌صف 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 به‌صف بستن ندارند این حالت روی می‌دهد.

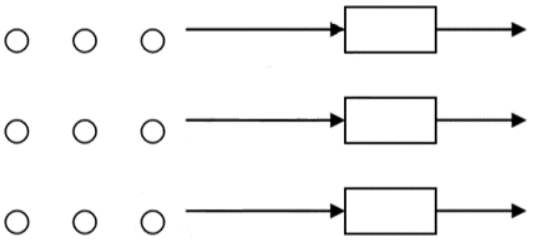
۲-۷ تعداد کانال‌های سرویس

منظور تعداد ایستگاه‌های سرویس موازی است که به‌طور هم‌زمان به مشتریان سرویس می‌دهند و دو نوع هستند. نوع اول که برای همه سرورها یک صف واحد داریم:



شکل ۱. همه سرورها یک صف واحد

و نوع دوم که هر کانال یک صف جداگانه دارد:



شکل ۲. هر سرور یک صف جدا دارد

۲-۸ توزیع پواسون

X معمولاً در الگو صف در قطار نحوه ورود مسافران به ایستگاه از توزیع پواسون پیروی می‌کند، از این‌رو 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 فاصله زمانی به طول t از یک فرایند پراسون به چگالی تعریف کرد:

بطوریکه:

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

e: پایه لگاریتم طبیعی است e=۲٫۷۱۸۲۸

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 kیک تابع جرم احتمال است. توزیع پواسون می‌تواند به‌عنوان تقریبی از توزیع دوجمله‌ای در نظر گرفته شود. توزیع پواسون می‌تواند برای سیستم‌هایی بکار برده شود که دارای تعداد وقایع بسیار زیاد هستند و احتمال وقوع هر واقعه بسیار کم است.

۲-۹ انتخاب مدل صف M/G/C/C

در مطالعات مختلف برای صف‌های جاده وصف‌ها که مسافر در انتظار قطار است مدل صف M/G/C/C پیشنهاد شده است. به علت پواسون بودن توزیع ورودی‌ها و نمایی بودن سرویس‌دهی، با تمام مقادیر ممکن n و را شامل می‌شود و لذا می‌توانیم از فرمول زیر استفاده شود. ولیکن قبل از آن باید u را نیز مشخص شود.

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

برای محاسبه میانگین نرخ سرویس‌دهی در این سیستم داریم:
اگر بیش از c مشتری در سیستم باشد، تمام سرویس‌دهندگان مشغول‌اند و هر سرویس کننده با نرخ u کار می‌کند؛ 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 مشغول‌اند و میانگین نرخ nu است.

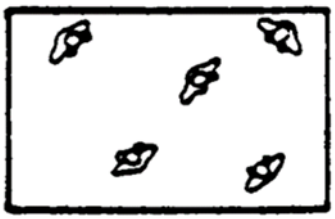
برای مقایسه کارایی‌تر فرمول لیتل با در نظر گرفتن نظم صف به‌صورت FIFO از رابطه زیر استفاده می‌شود:

۲-۱۰ سطح سرویس در ایستگاه قطار

۲-۱۰-۱ سطح سرویس A

متوسط سطح عابر پیاده: ≤ ۱,۲ متر مربع (۱۳ فوت ۲) به ازای هر نفرفاصله متوسط بین شخص: ≤ ۱,۲ متر (٤ فوت)

توضیحات: ایستاده و گردش آزاد از طریق صف منطقه بدون ایجاد مزاحمت برای دیگران در صف امکان پذیر است.



شکل ۳. سطح سرویس A

۲-۱۰-۲ سطح سرویسB

متوسط سطح عابر پیاده: ۰,۹-۱,۲ متر مربع (۱۰-۱۳ فوت ۲) به ازای هر نفرفاصله متوسط بین شخص: ۱,۱-۱,۲ متر (۳,۵-٤ فوت)

شرح: گردش ایستاده و تا حدی محدود به اجتناب از مزاحمت برای دیگران در صف امکان پذیر است.

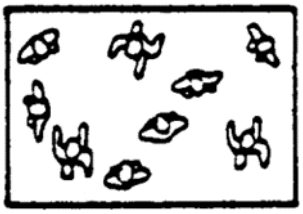
شکل ٤. سطح سرویس B

۲-۱۰-۳ سطح سرویس C

متوسط سطح عابر پیاده: ۰,۷-۰,۹ متر مربع (۷-۱۰ فوت ۲) به ازای هر نفر فاصله متوسط بین شخص: ۰,۹-۱,۱ متر (۳-۳,۵ فوت)

توضیحات: ایستادن و گردش خون محدود از طریق نوبت دهی با ایجاد مزاحمت برای دیگران امکان پذیر است.

$$L = r + \frac{r^{c+1}/c}{c!(1-r/c)^2} P_0 \qquad (۳)$$

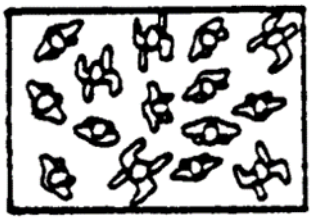


شکل۵. سطح سرویس C

۲-۱۰-٤ سطح سرویس D

متوسط سطح عابر پیاده: ۰,۳-۰,۷ متر مربع (3-7 ft2) به ازای هر نفرفاصله متوسط بین شخص: ۰,٦-۰,۹ متر (۲-۳ فوت)

توضیحات: ایستادن بدون لمس غیرممکن است.گردش در صف و جلو به شدت محدود شده است.حرکت فقط به صورت گروهی امکان پذیر است. انتظار طولانی مدت در این تراکم ناراحت کننده است.

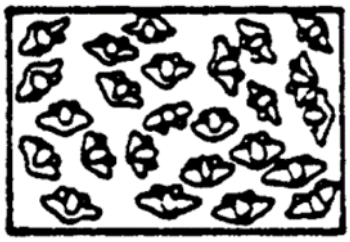


شکل ٦. سطح سرویس D

۲-۱۰-۵ سطح سرویس E

متوسط سطح عابر پیاده: ۰,۲- ۰,۳ متر مربع (۲-۳ فوت ۲) به ازای هر نفرمیانگین فاصله بین شخص: ۰,٦ ≥ متر (۲ فوت)

توضیحات: ایستادن در تماس فیزیکی با دیگران است.اجتناب ناپذیر؛ گردش در صف امکان پذیر نیست.صف کشیدن با این تراکم فقط برای مدت کوتاهی پایدار است.



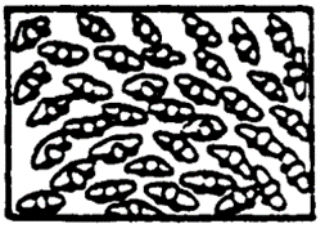
شکل ۷. سطح سرویس E

۲-۱۰-٦ سطح سرویس F

متوسط سطح عابر پیاده: ≥ ۰,۲ متر مربع (۲ فوت ۲) به ازای هر نفرفاصله متوسط بین شخص: تماس نزدیک

توضیحات: تقریباً همه افراد در صف ایستاده اند.در تماس مستقیم جسمی با دیگران ؛ این تراکم بسیار زیاد است.

هیچ جابجایی در صف امکان پذیر نیست.پتانسیل وحشت وجود دارد.



شکل ۸ سطح سرویس F

۳. پیشینه پژوهش

در این رابطه اولین کار توسط اشپیگل صورت گرفته است؛ وی بر اساس مسئله برنامه‌ریزی ماشین‌آلات، مسئله موردنظر را به‌صورت 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-Dıaz,1999) ایاما مسئله برنامه‌ریزی حرکت قطارها را از دیدگاهی دیگر مورد بررسی قرار داده است؛ به این صورت که با توجه به تقاضای مسافرین در ایستگاه‌های متفاوت در طول شبانه‌روز قطارها به دو دسته سریع و عادی تقسیم‌شده و هدف تعیین سرفاصله زمانی حرکت آن‌ها و تعیین ایستگاه‌هایی است که می‌بایست جهت پیاده و سوار کردن مسافر توقف نمایند. بطوریکه زمان مسافرت کل مسافرین حداقل گردد، مسئله موردنظر در قالب یک مدل شبکه و به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط مدل‌سازی گشته است.(Miwa and Oyama, 2018)

مس استفاده از مفاهیم شبکه را جهت مدل‌سازی مسئله پیشنهاد نموده‌اند، به این صورت که کمان‌ها بیانگر بلاک‌ها و گروه‌ها نشان‌دهنده ایستگاه‌ها می‌باشند. در این مدل زمان به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده و نتیجه حاصل به‌صورت یک شبکه پویا می‌باشد و مسئله موردنظر با استفاده از معادلات دیفرانسیل در قالب یک مسئله کنترل بهینه‌سازی شده است. میس با استفاده از مسئله تخصیص منابع، رویکرد دیگری را مدنظر قرار داده است به این صورت که بلاک‌های راه‌آهن به‌عنوان منابع در نظر گرفته‌شده که این منابع در زمان‌های موردنظر به قطارها تخصیص می‌یابند، در این مدل فرض شده است که برنامه‌ریزی بر روی یک شبکه تک خطه برای یک دوره زمانی معینی صورت می گیرد و زمان شروع حرکت قطارها نیز ثابت می‌باشد. مدل ریاضی مربوط یک مسئله بهینه‌سازی شبکه با متغیرهای صفر و یک تعریف‌شده و برای حل آن یک الگوریتم تخمینی با استفاده از مسئله جریان چند کالایی پیشنهاد شده است.(Mees, 1991) میلز و کینز یک مدل دینامیکی و غیرخطی ارائه دادند. (Mills and Perkins,1991)

هیگینز و همکاران مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها را در یک شبکه تکه خطه به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط مدل‌سازی نموده‌اند به این صورت که تابع هدف به‌صورت حداقل کردن مجموعه تأخیرت وزنی قطارها به همراه هزینه‌های عملیاتی آن‌ها به‌صورت یک تابع غیرخطی مطرح‌شده و محدودیت‌های تلاقی، سبقت، توالی و سرعت به‌صورت روابط خطی عنوان گشته‌اند.(Caprara, 2002)

در مطالعه ونستیگن واودهسون به منظور بهبود کارایی جدول زمانی شبکه‌ای از خدمات قطار مسافری، به دنبال به حداقل رساندن تابع هزینه انتظار است که شامل مکمل‌های زمان اجرا و انواع مختلف زمان انتظار و ورود به اواخر است. این رویکرد به کل شبکه بین‌المللی راه‌آهن بلژیک اعمال می‌شود. شبکه آی سی متشکل از ١٤ قطار سریع متصل به تمام شهرهای عمده بلژیک است. در مرحله اول رویکرد، مکمل‌های زمان ایده‌آل برای حفاظت از اتصالات زمانی محاسبه می‌شود. این مکمل‌ها بر

اساس توزیع تأخیر قطارها، شمار مسافران و وزن بندی انواع زمان‌های انتظار استوار است.

در مرحله دوم، برنامه‌ریزی خطی برای ساخت یک جدول زمانی بهبود یافته با اتصالات به‌خوبی برنامه‌ریزی‌شده و هر زمان که امکان‌پذیر است، با مکمل‌های زمان‌بندی ایده آل استفاده می‌شود. شبیه‌سازی زمان‌بندی‌های مختلف را ارزیابی می‌کند و باعث می‌شود که زمان‌بندی برنامه‌ریزی خطی بهبود یابد. برای مورد شبکه IC، نتیجه نهایی یک جدول زمانی با زمان انتقال مناسب و هزینه انتظار، یعنی ٤٠ درصد پایین‌تر از جدول زمانی فعلی است. از آنجا که مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی مداوم پیاده‌سازی شده است، روش پیشنهادی برای ایجاد جدول زمانی بهتر حتی برای شبکه‌های گسترده‌ای از راه‌آهن نیز بسیار امیدوارکننده است.((Vansteenwegen and Van Oudheusden,2007

مقالات و مطالعات زیادی در ارتباط با زمان‌بندی حرکت قطارها صورت گرفته از روش‌های برنامه‌ریزی خطی گرفته تا روش‌های جدیدتر که با افزایش کامپیوترها و توان محاسبات منجر به روش‌های هوش مصنوعی شده است. چند دهه قبل محققان مدل‌های زیادی را برای قطارها مورد بررسی قرار داده‌اند اما با توسعه مترو و افزایش مسافر آن و هدوی های نزدیک‌تر، گویا نیاز به بررسی دو باره این مدل‌ها است؛ زیرا هرچند قطار چند سده قبل به ظهور رسیده است، اما کارکرد مترو با قطار تا حدی متفاوت و برای هدف تقاضا سفری است که هرروز اتفاق می‌افتد در این زمینه در داخل کشور ضعف مطالعات آشکار می‌گردد. همچنین رویکرد بر مبنای مسافر با رویکرد شرکت فراهم‌کننده خدمات متفاوت است. خلاصه‌ای از مطالعات پیرامون موضوع مورد پژوهش به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲. خلاصه پیشینه نظری و عملی پژوهش

نام	سال	توضیحات
کیانفر	۱۳۹۲	متغیرهای تصمیم مسئله شامل توالی اعزام قطارها از ایستگاه مبدا، سرفاصله زمانی بین اعزام قطارهای متوالی، تخصیص قطارها به خطوط ایستگاه‌ها و تعیین برنامه توقف قطارها برای اقامه نماز است. برای کاهش زمان حل مدل برنامه‌ریزی عددصحیح، چندین دسته نامساوی معتبر ارائه شده است.
گورس	۱۹۹۸	از الگوریتم مورچه که همگی روش‌های نوین جستجو هستند استفاده کرده‌اند و برای مساله زمان‌بندی حرکت قطارها جواب‌های خوبی را به دست آورده‌اند ولی هیچکدام از آنها تضمین نکرده‌اند که جواب بدست آمده بهینه است.
لی	۲۰۰۹	مسأله زمانبندی حرکت قطارها را در یک شبکه تکه خطه بصورت برنامه‌ریزی 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.
نایبی	۱۳۹٦	اطلاعات ورودی مسئله شامل نوع بلاک‌ها، ترتیب وموقعیت مکانی ایستگاه، تعداد خطوط و سکوی ایستگاه‌ها، امکانات ایستگاه، زمان‌های مسدودی بلاک و اوقات شرعی است. متغیر مسئله، زمان اعزام قطارها از مبدا است و هدف مسئله حداقل کردن مجموع وزنی زمان های توقف غیر برنامه‌ای قطارهاست.
اکاترینا و همکاران	۲۰۱٤	مدل شامل اجزای اصلی زیر است: مدل خطی؛ مدل کنترل تردد قطار؛ مدل قطارها؛ مدل سیستم های تامین انرژی؛ مدل سیستم کنترل خروجی و سیگنال؛ مدل تنظیم فاصله ترافیک؛ مدل تردد مسافران؛ مدل مدیریت وظایف؛ مدل ارزیابی نتایج؛ مدل تجسم نتایج شبیه سازی. نرخ بالای توسعه مترو مسکو به دنبال خودکار سازی روند ایجاد و ویرایش عناصر مدل، تعیین روابط، توسعه اشکال گرافیکی، نوشتن سناریوهای عدم قطعیت‌های مترو است.

نام	سال	توضیحات
ادتوفر و همکاران	۲۰۲۰	متداول ترین روش در اروپا برای تجزیه و تحلیل ارزیابی ظرفیت خطوط راه آهن، روش فشرده سازی جدول زمانی نامیده می شـــود. این روش مســـیرهای قطار را جابجا می کند، به طوری که تفاوت زمانی بین دو مســـیر، که حرکت قطارها را بدون تصادف فراهم می کند، حداقل است. این مدل در حال حاضر برای تجزیه و تحلیل جدول زمانی بین Wien Westbahnhof و Hauptbahnho استفاده می شود.

٤. روش پژوهش

در این بخش از دو روش اطلاعات جمع‌آوری می‌شوند:

- روش اسنادی: در این روش با مطالعه منابع اطلاعاتی موجود متناسب با هدف پژوهش، اطلاعاتی جمع‌آوری و استخراج می‌گردند. این اطلاعات دسته‌بندی می‌شوند. سپس اطلاعات به دست آمده مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.
- روش مصاحبه: شامل طراحی پرسش‌نامه و مصاحبه‌ی عمیق با مسئولین متروی شهر تهران و مصاحبه با شهروندان است. به منظور شناخت جامع متروی تهران و ارائه برنامه زمان‌بندی مناسب، پرسشنامه‌هایی تنظیم می‌شود تا توسط صاحب‌نظران، تکمیل گردد.

در این پژوهش متغیرهایی همچون زمان توقف قطارها، حجم مسافرین در ساعات مختلف، الگوی ورودی مشتریان و زمان انتظار مسافرین به عنوان پارامترهای تاثیرگذار در تعیین سرفاصله زمانی قطار در نظر گرفته شده‌اند. این اطلاعات به صورت مصاحبه با کارشناسان مترو و مصاحبه با شهروندان در بازه زمانی چهار ماهه صورت گرفته است. همچنین داده های سالهای گذشته نیز گرداوری شد و در تحلیل از آنها بهره گرفته شد.

معمولاً بر اساس هدف، پژوهش‌ها به پژوهش‌های بنیادی و کاربردی تقسیم می‌شوند. در اینجا چون هدف اصلی به دست آوردن پیش‌بینی تردد در یک نمونه کاربردی است و از آنجا که استفاده از تئوری صف و ایجاد تئوری‌های آن قبلاً در تحقیق بنیادی تولید شده از این نظر تحقیق کاربردی است. در روش تحقیق پس از مطالعه مدل‌ها و روش‌های مختلف بهینه‌سازی هدوی قطار به مدل‌ها و حمل بار مقایسه و معایب و مزایای آن بیان می‌گردد. سپس به ساخت مدل با توجه به تئوری صف و محدودیت‌ها 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.

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 است.

در سناریو دو، کاهش زمان تأخیر مسافر در اولویت است، و در کنار آن به‌راحتی 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 سرویس‌های مخصوص مسافر در حیطه این پژوهش نیست. راحتی مسافر در زمانی که مسافر به صورت 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 گرفته شده 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.

در نهایت سه برنامه زمان‌بندی با یکدیگر مقایسه و تحلیل و بررسی می‌گردد. برای ارائه جدول زمان‌بندی و به دست آوردن تاخیرات زمانی مسافران از تئوری صف استفاده شده است. 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. معمولاً در الگو صف در قطار نحوه ورود مسافران به ایستگاه از توزیع پواسون پیروی می‌کند، از این‌رو 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 یک‌فاصله زمانی به طول t از یک فرایند پراسون به چگالی تعریف کرد:

$$f\ (k\ ;\lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k\ !} \qquad (٤)$$

بطوریکه؛

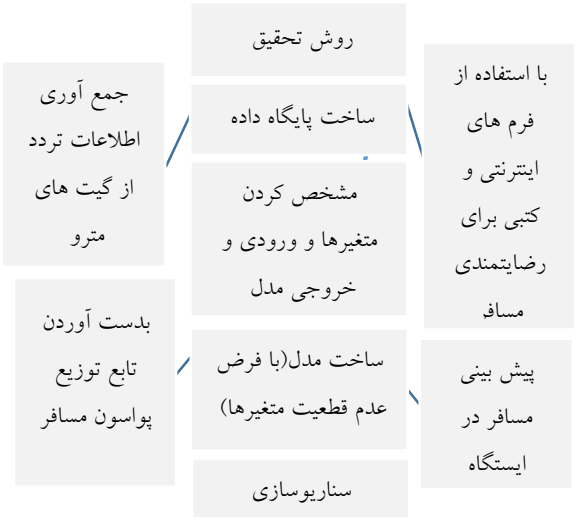
e: پایه لگاریتم طبیعی است e=۲٫۷۱۸۲۸

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

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

تابع فوق به‌عنوان تابعی از kیک تابع جرم احتمال است. توزیع پواسون می‌تواند به‌عنوان تقریبی از توزیع دوجمله‌ای در نظر گرفته شود. توزیع پواسون می‌تواند برای سیستم‌هایی بکار برده شود که دارای تعداد وقایع بسیار زیاد هستند و احتمال وقوع هر واقعه بسیار کم است.

نرم افزار ارنا یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه سازی و مدل سازی فعالیت ها می باشد. این نرم افزار برای آنالیز تغییرات در زمینه طراحی مجدد سیستم های تولید، خدمات و کامپیوتر به وجود آمده است. نرم افزار ارنا با حداکثر انعطاف پذیری این امکان را فراهم می کند تا در هر درجه مطلوب از لحاظ جزئیات و پیچیدگی ها، مدل سازی را به انجام برساند. نحوه محاسبه هدوی براساس توزیع مسافرین در این خط بوده که چه زمانی بیشترین تقاضا بوده است ،البته در این خط که ۱۳ ایستگاه دارد هر ایستگاه حجم مسافر خاصی وارد میشود،پس باید توزیع تقاضا در ایستگاهای دیگر را نیز در نظر داشت. علت آنکه زمان تاخیر نصف سرفاصله زمانی و از یک نظم دقیق برخودار است این است که این اعداد میانگین تاخیر است. و محاسبه ریاضی و عددی رابطه پواسون نصف زمان سرویس زمان تاخیر میشود. بنابراین در آرنا و بصورت محاسبه هردو عدد بست آمد نصف زمان سرفاصله زمانی میشود. شکل ۹ جزئیات پژوهش را نشان میدهد.



شکل ۹. فرایند پژوهش

۵. شناخت مطالعه موردی

متروی تهران به مجموعه قطارهای شهری تهران و همچنین «شرکت راه‌آهن شهری تهران و حومه» گفته می‌شود. این قطارها در شش خط اصلی در حال تردد هستند که پنج‌خط آن ۱-۲-۳-۴-۷ درون‌شهری و خطوط دیگر ۵-انشعاب خط ۱ نیز برون‌شهری میان کرج و تهران وفرودگاه امام خمینی (ره) و تهران هستند. تا مرداد ۱۳۹۷، طول خطوط متروی بهره‌وری برابر ۲۰۴ کیلومتر با ۱۱۶ ایستگاه است و شمار واگن‌های فعال در مترو تهران بیش از ۱۰۰۰ واگن است که روزانه به‌طور میانگین بیش از ۳ میلیون مسافر را جابه‌جا می‌کنند. مترو تهران به رکورد جابجایی ۴ میلیون مسافر در روز دست یافته‌است. آذرماه سال ۱۳۹۶، تعداد سفر با متروی تهران از مرز ۷ میلیارد و ۵۸۷ میلیون سفر گذشت و به‌این‌ترتیب توانست تا از رکورد جمعیت فعلی دنیا عبور کند.

خط ۵ مترو تهران یک خط برون‌شهری به طول ٤٣ کیلومتر با ۱۱ ایستگاه به عنوان مهم‌ترین وسیله ارتباطی و حمل‌ونقل عمومی شهروندان می‌باشد که روزانه مجموع ۱۵۰۰ هزار سفر را در برمی‌گیرد. این خط ایستگاه تهران (صادقیه) واقع در ضلع جنوب غربی فلکه دوم صادقیه را به ایستگاه گلشهر واقع در گلشهر کرج متصل می‌کند. در سال ۱۳۷۷ ابتدا بین دو ایستگاه تهران (صادقیه) و ایستگاه متروی کرج به بهره‌برداری رسیده بود و در سال‌های بعد به‌تدریج ایستگاه‌های دیگر خط افتتاح شد. برق خط حومه‌ای تهران- گلشهر (خط ۵) از طریق پست برق بنیاد رنگ تأمین می‌شود. در این پست، برق ۲۳۰ کیلو ولت متناوب (AC) به برق۲۷/۵ کیلو ولت متناوب تبدیل‌شده و برق مسیر ٤١ کیلومتری شبکه بالاسری حدفاصل ایستگاه تهران (صادقیه) تا گلشهر و پایانه مهرشهر را تأمین می‌شود. جدول ۳ اطلاعات متروی خط ۵ را نشان می‌دهد.

جدول ۳. اطلاعات متروی خط ۵ تهران

شماره خط: پنج	تاریخ شروع بهره‌برداری۱۲/۳/ ۱۳۷۷ تا مرداد ۱۳۹۷	
تعداد مسافر اذر ماه۱۳۹٦	۳/٤۰۲/۱۲۵	رشد
تعداد مسافر در ماه قبل	۳/٤۵۳/۸۱۹	۱/۵۰- درصد
تعداد مسافر در ماه مشابه سال قبل	۳/۸۳٦/۷۰۱	۱۱/۳۳- درصد
تعداد مسافر از ابتدای سال ۹٦	۳۰/۰٦۱/۰۳۲	-
تعدا مسافر از ابتدای بهره برداری	٦۵۷/۷۹۰/٤۳۵	-
درصد مسافر ماه از کل امسال	۱۱/۳۲	-
متوسط تعدا مسافر به ازای هر قطار	۸۲٤	-
شلوغ ترین ایستگاه در ماه	گلشهر	-
شلوغ ترین روز در ماه	۱٤اذر	-
امار مسافر شلوغ ترین روز در ماه	۱۵٦/۵۵۰	-
شلوغ ترین ساعت(برحسب مسافر)	۷-۸	-
تعداد سفر اذر ۹٦	۵/۳۰۱/۲۸٦	رشد
تعداد سفر در ماه قبل	۵/۳٤۸/۷۳۸	۰/۸۹- درصد
تعداد سفر از ابتدای سال ۹٦	٤٦/٤۳۸/۳٦۰	-
تعداد سفر از ابتدای بهره برداری	۹۲۵/۵۹۹/۸۸۰	-
درصد سفر در ماه از کل سال	۱۱/٤۲	-
شلوغ ترین روز در ماه بر حسب سفر	۷-۸	-
متوسط ماهیانه تعداد سفردر سال ۱۳۹٦ تا کنون	۳/۳٤۰/۱۱۵	رشد
متوسط ماهیانه تعداد سفر در سال ۹٦ تا کنون	۵/۱۵۹/۸۱۸	رشد

۵-۱ به دست آوردن ظرفیت قطار در هر ساعت بر اساس هدوی

ظرفیت مسافری قطار دو طبقه در حالت‌های مختلف در جدول ٤ نشان داده شده است.

جدول ٤. ظرفیت مسافری قطار دو طبقه

دقیقه	ظرفیت مسافر هر قطار (نفر) در ساعت				
سرفاصله زمانی (هدوی)	نشسته	M.L	N.L	O.L	E.O.L
٢	٤١٢٨٠	٤٣٠٥٠	٤٦٨٠٠	٥٥٥٠٠	٧٥٠٠٠
٤	٢٠٦٤٠	٢١٥٢٥	٢٣٤٠٠	٢٧٧٥٠	٣٧٥٠٠
٦	١٣٧٦٠	١٤٣٥٠	١٥٦٠٠	١٨٥٠٠	٢٥٠٠٠
٨	١٠٣٢٠	١٠٧٦٣	١١٧٠٠	١٣٨٧٥	١٨٧٥٠
١٠	٨٢٥٦	٨٦١٠	٩٣٦٠	١١١٠٠	١٥٠٠٠
١٢	٦٨٨٠	٧١٧٥	٧٨٠٠	٩٢٥٠	١٢٥٠٠
١٤	٥٨٩٧	٦١٥٠	٦٦٨٦	٧٩٢٩	١٠٧١٤
١٦	٥١٦٠	٥٣٨١	٥٨٥٠	٦٩٣٨	٩٣٧٥
١٨	٤٥٨٧	٤٧٨٣	٥٢٠٠	٦١٦٧	٨٣٣٣
٢٠	٤١٢٨	٤٣٠٥	٤٦٨٠	٥٥٥٠	٧٥٠٠
٢٢	٣٧٥٣	٣٩١٤	٤٢٥٥	٥٠٤٥	٦٨١٨
٢٤	٣٤٤٠	٣٥٨٨	٣٩٠٠	٤٦٢٥	٦٢٥٠
٢٦	٣١٧٥	٣٣١٢	٣٦٠٠	٤٢٦٩	٥٧٦٩
٢٨	٢٩٤٩	٣٠٧٥	٣٣٤٣	٣٩٦٤	٥٣٥٧
٣٠	٢٧٥٢	٢٨٧٠	٣١٢٠	٣٧٠٠	٥٠٠٠
٣٢	٢٥٨٠	٢٦٩١	٢٩٢٥	٣٤٦٩	٤٦٨٨
٣٤	٢٤٢٨	٢٥٣٢	٢٧٥٣	٣٢٦٥	٤٤١٢
٣٦	٢٢٩٣	٢٣٩٢	٢٦٠٠	٣٠٨٣	٤١٦٧
٣٨	٢١٧٣	٢٢٦٦	٢٤٦٣	٢٩٢١	٣٩٤٧
٤٠	٢٠٦٤	٢١٥٣	٢٣٤٠	٢٧٧٥	٣٧٥٠
٦٠	١٣٧٦	١٤٣٥	١٥٦٠	١٨٥٠	٢٥٠٠

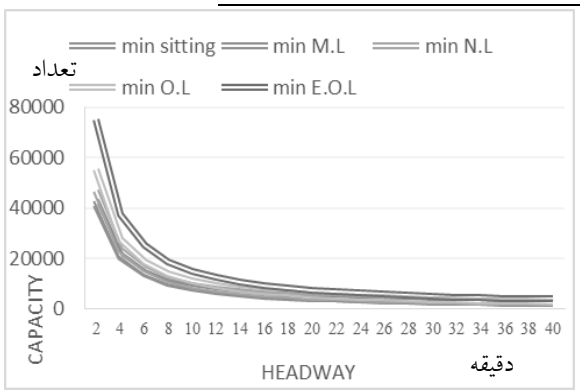
M. L برابر با ٣ مسافر در مترمربع

N. L برابر با ٥ مسافر در مترمربع

O. L برابر با ٧ مسافر در مترمربع

E. O. L برابر با ١٠ مسافر در مترمربع

شکل ١٠ ظرفیت قطار خط ٥ مترو تهران کرج برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. نمودار نشان‌دهنده یک تابع‌نمایی برای حالت‌های مختلف ظرفیت خط ٥ مترو تهران-کرج است.



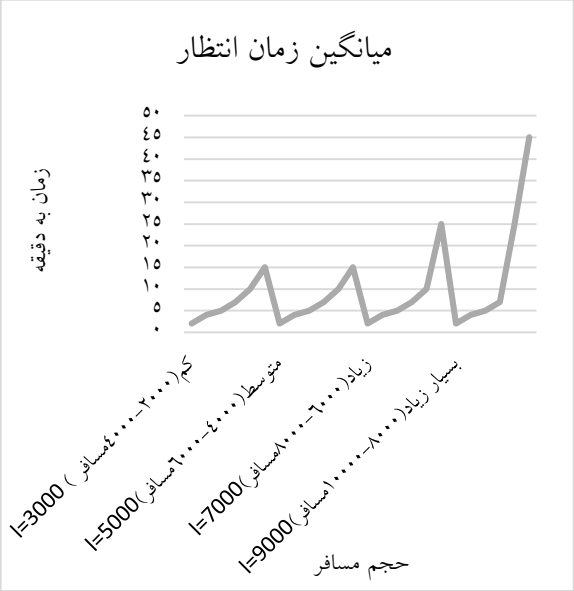
شکل ١٠. ظرفیت قطار خط ٥ مترو تهران کرج

جدول ۵ میانگین زمان انتظار بر اساس هدوی ها مختلف آورده شده است، در این جدول حجم مسافر برای ٤ حالت حجم تقاضا کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد آمده است.

جدول ۵. میانگین زمان انتظار بر اساس هدوی ها مختلف

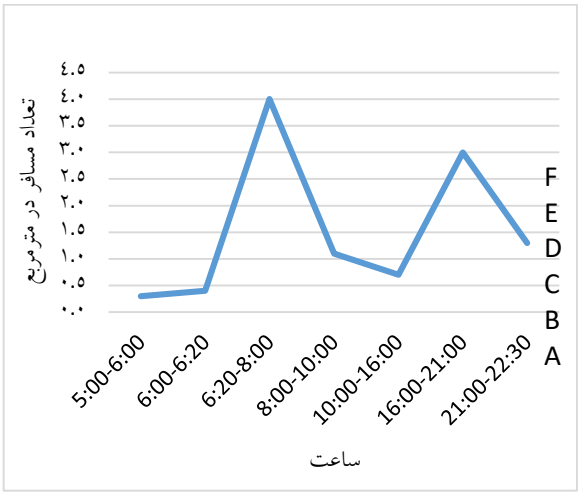
	هدوی-دقیقه	تعداد قطار در ساعت	میانگین زمان انتظار(دقیقه)
کم (۲۰۰۰-٤۰۰۰ مسافر)	٤	۱۵	۲
	۸	۸	٤
	۱۰	٦	۵
	۱٤	٤	۷
	۲۰	۳	۱۰
	۳۰	۲	۱۵
متوسط(٤۰۰۰-٦۰۰۰مسافر) =۵۰۰۰	٤	۱۵	۲
	۸	۸	٤
	۱۰	٦	۵
	۱٤	٤	۷
	۲۰	۳	۱۰
	۳۰	۲	۱۵
زیاد(٦۰۰۰-۸۰۰۰مسافر) =۷۰۰۰	٤	۱۵	۲
	۸	۸	٤
	۱۰	٦	۵
	۱٤	٤	۷
	۲۰	۳	۱۰
	۳۰	۲	۲۵
بسیار زیاد(۸۰۰۰-۱۰۰۰۰مسافر)	٤	۱۵	۲
	۸	۸	٤
	۱۰	٦	۵
	۱٤	٤	۷
	۲۰	۳	۲۵
	۳۰	۲	٤۵

در جدول ۵ محاسبات با استفاده از نرم‌افزار آرنا صورت گرفته است. ورود مسافرها طبق فرایند پواسون است اما زمان بین ورود مسافربر اساس توزیع نمایی است؛ بنابراین با توجه به جدول می‌توان نمودار زمان انتظار را برای ورودی مسافر با ها مختلف به دست آورد، که زیادشدن و کاهش هدوی میزان زمان انتظار مسافر افزایش پیداکرده است.



شکل ۱۱. میانگین زمان انتظار

سطح سرویس ایستگاه ابتدای خط را بصورت زیر با استفاده از نرم افزار ارنا و مقدار صف تشکیل شده در خط براورد کرد.در شکل ۱۲ در سمت راست نمودار سطح سرویس‌ها مشخص شده است،در دو قله پیک صبح و بعدظهر سطح سرویس Fمشاهده می‌شود.



شکل ۱۲. سطح سرویس در وضع موجود قطار

۶. تحلیل یافته‌ها

برای ارائه برنامه زمان‌بندی سه سناریو با سود زیاد برای شرکت، راحتی برای مسافر و ترکیب این دو حالت در جدول ۶ آمده است.

سناریو یک: در این سناریو هدوی بر اساس بیشترین سود شرکت در نظر گرفته‌شده است در این صورت ظرفیت مسافر در حالت E.O.Lدر نظر گرفته‌شده که مسافر احساس راحتی در قطار ندارد و زمان انتظار بیشتر است.

سناریو دو: برای حالت نشسته برای مسافر بازمان انتظار کم در نظر گرفته‌شده است

سناریو سه: حالت بهینه و بین سناریو یک و دو است.

جدول ۶. هدوی پیشنهادی برای سناریوها مختلف

ساعت	سناریو یک		سناریو دو		سناریو سه	
	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)
۶-۵	۳۰	۱۵	۲۰	۱۰	۳۰	۱۵
۶:۲۰-۶	۲۰	۱۰	۱۰	۵	۲۰	۱۰
۸-۶:۲۰	۱۴	۷	۶	۳	۸	۴
۱۰-۸	۱۰	۵	۱۰	۵	۱۰	۵
۱۶-۱۰	۲۰	۷	۱۵	۷	۱۵	۷
۲۱-۱۶	۱۴	۷	۸	۵	۱۰	۵

	سناریو یک		سناریو دو		سناریو سه	
ساعت	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)
۲۲:۳۰-۲۱	۲۰	۱۰	۱۵	۷	۱۵	۷

در جدول ۷ مقایسه سناریو برتر با وضع موجود آمده است که تفاوت زیادی بین این دو نیست دلیل آن است که برای اجرای سناریو ها دیگر نیاز به تعداد واگن بیشتر است ،که در این صورت به سود و راحتی بیشتر برای مسافر خواهد بود.

جدول ۷. مقایسه سناریو برتر با وضع موجود

	وضع موجود	وضع موجود	سناریو برتر(۳)	
ساعت	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)	هدوی (دقیقه)	میانگین زمان انتظار (دقیقه)
٦-٥	۳۰ دقیقه	۱۵	۲۰	۱۵
٦:۲۰-٦	۲۰ دقیقه	۱۰	۱۰	۵
۸-٦:۲۰	۷ دقیقه	۳/۵	٦	۳
۱۰-۸	۱۰ دقیقه	۵	۱۰	۵
۱٦-۱۰	۱۵ دقیقه	۷/۵	۱۵	۷
۲۱-۱٦	۱۰ دقیقه	۵	۸	۵
۲۲:۳۰-۲۱	۱۵ دقیقه	۷/۵	۱۵	۷

برای به دست آوردن حداقل سرفاصله زمانی با توجه به محدودیت ترمز قطار توجه کرد که این مقدار باید با توجه به حداکثر سرعت مشخص کرد، هرچند شتاب ترمز گیری 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 ترمز گیری با سرعت km/h۱۲۰ برابر ۸۰۰ متر و با سرعت ۱٤۰ km/hبرابر 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 ۱۳۷٦ و در حالت فشرده آن به ۲۵۰۰ نفر در قطار می‌رسد.

در مورد ظرفیت خط یا به‌عبارت‌دیگر 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 می‌کند؛ بنابراین، با یک عدم قطعیت در مقدار ظرفیت روبرو می‌شود.

ورود مسافرها طبق فرایند پواسون است اما زمان بین ورود مسافربر اساس توزیع نمایی است.

وضع موجود ایستگاه ابتدای و انتهای قطار در بیشتر مواقع به ویژه در صبح و بعد ظهر با توجه به صف تشکیل شده و و تعداد تجمع مسافران در ایستگاه در وضعیت Fقرار دارد.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

شهر کرج تاحدودی یک شهر اقماری برای تهران محسوب میگردد به این معنا که مسافران در صبح به تهران می‌ایند که به محل کار خود بروند و شب هنگام یا عصر به خانه خود بر میگرند.بنابراین در ایستگاه ابتدایی شهر کرج در صبح تجمع مسافر زیادی است.

از آنجا که ظرفیت قطار به دو صورت استایک و دینامیک است،لذا با عدم قطعیت در ظرفیت روبرو هستیم و ظرفیت واگن

در حالت ایستاده معمولا متغیر و پویا است،بنابراین سه سناریو نسب به ظرفیت و سود شرکت و راحتی مسافر بدیهی به نظر رسید که مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

برای ارائه برنامه زمان‌بندی سه سناریو در نظر گرفته شد، سناریو یک: در این سناریو هدوی بر اساس بیشترین سود شرکت در نظر گرفته‌شده است؛ در این صورت ظرفیت 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.

در سناریو یک‌زمان انتظار بین در ساعت ۶:۲۰–۸ برابر ۷ دقیقه است، در سناریو دو، زمان انتظار بین ۳دقیقه است و در سناریو سه زمان انتظار بین ٤دقیقه است اما در زمان اوج یعنی بین ساعت ۸–۱۰ صبح برای همه سناریو زمان انتظار ۵ دقیقه است زیرا در آن ساعت باید قطار با حداکثر ظرفیت خود کار کند. بنابراین به نظر می‌رسد سناریو سه، سناریو برتر باشد.

در دو قله پیک صبح و بعدظهر سطح سرویس F وجود دارد که قله صبح تیز تر است که به دلیل آن است که حجم تعداد مسافر زیادی در بازه ای کوتاه‌تری قصد جابجایی دارند. در ساعات دیگر سطح سرویس از Eبه سمت A می‌رود معمولا در ساعت ۵ صبح تعداد جمعیت کمی وارد مترو می شوند و خلوت ترین زمان است بنابراین هدوی در این زمان طولانی تر خواهد بود.

در این پژوهش سه سناریو گفته شد در نرم‌افزار آرنا محاسبه و زمان تاخیرها ان با توجه به هدوی اعزامی محاسبه گردید. نحوه محاسبه هدوی براساس توزیع مسافرین در این خط بوده که چه زمانی بیشترین تقاضا بوده است ،البته در این خط که ۱۳ ایستگاه دارد هر ایستگاه حجم مسافر خاصی وارد می‌شود،پس باید توزیع تقاضا در ایستگاه‌های دیگر را نیز در نظر داشت. علت آنکه زمان تاخیر نصف سرفاصله زمانی و از یک نظم دقیق برخودار است این است که این اعداد میانگین تاخیر است. و محاسبه ریاضی و عددی رابطه پواسون نصف زمان سرویس زمان تاخیر می‌شود. بنابراین در آرنا و بصورت محاسبه هردو عدد به دست آمد نصف زمان سرفاصله زمانی شد.

به دست آوردن ظرفیت قطار در هر ساعت بر اساس هدوی باید به حالت نشسته یا ایستاده یا فشرده مسافران در فضای واگن توجه کرد. ظرفیت قطار در شهر تهران برای حالت نشسته ۱۳۷٦ و در حالت فشرده آن به ۲۵۰۰ نفر در قطار می‌رسد. در مورد ظرفیت خط یا به‌عبارت‌دیگر 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 می‌کند؛ بنابراین، با یک عدم قطعیت در مقدار ظرفیت روبرو می‌شود. ورود مسافرها طبق فرایند پواسون است اما زمان بین ورود مسافربر اساس توزیع نمایی است.

وضع موجود ایستگاه ابتدای و انتهای قطار در بیشتر مواقع به ویژه در صبح و بعد ظهر با توجه به صف تشکیل شده و تعداد تجمع مسافران در ایستگاه در وضیعت Fقرار دارد. عدم قطعیت فقط، مربوط به ظرفیت قطار نمی‌گردد و تا خیرات فنی ایجادشده در سیستم نیز باعث ایجاد عدم قطعیت می‌گردد که می‌تواند موردبررسی قرار گیرد. از مهم‌ترین منافع زیست‌محیطی سیستم حمل‌ونقل مترو کاستن از تعداد سفر به‌وسیله اتومبیل شخصی است، زیرا برای عبور ۱۰ هزار نفر در دو جهت حدودا نیاز به ۵ هزار اتومبیل شخصی می‌باشد. در همین ارتباط با انتقال هر واحد حمل از بخش جاده‌ای به مترو، مبلغ ۵/۲۲ میلیون دلار منافع ملی در بر خواهد داشت. همچنین طبق آمار موجود، بخش عمده سوانح کشور مربوط به حمل‌ونقل جاده‌ای بوده و به‌طور متوسط هر سی دقیقه یک نفر کشته و در هر ۵ دقیقه یک نفر مجروح می‌شود، درحالی‌که تعداد کشتگان در هر یک میلیارد نفر مسافر از طریق جاده‌های ریلی نزدیک به ۷ نفر و به عبارتی یک هفدهم جاده است که این نشانگر ایمنی بیشتر در جاده‌های ریلی می‌باشد. این مطالعه برای خط ۵ مترو صورت گرفت، می‌توان آن را به جامعه و نمونه آماری دیگری نیز تعمیم داد. هرچه میزان رضایت مسافران بیشتر گردد و مدیریت زمانبندی قطار صورت

گیرد، جامعه به سمت مدیریت یکپارچه شهری حرکت میکند و میتوان به توسعه پایدار و حمل‌ونقل پایدار رسید تا کیفیت زندگی در شهر بهبود یابد.

۸. مراجع

– نایبی، ح، کیانفر، ف، ساجدی نژاد، الف، (۱۳۹۲)، زمانبندی حرکت قطارها با هدف بهره‌برداری بهینه از مسیرهای ریلی دوخطه، مهدسی حمل و نقل، سال ششم، شماره ۲.

– نایبی، ح، مردانی، س، حسینی، ر، (۱۳۹٦)، زمانبندی حرکت قطارهای مسافربری با رویکرد بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی گسسته–پیشامد، پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۲.

- Adenso-Dıaz, B., González, M. O., & González-Torre, P. (1999). On-line timetable re-scheduling in regional train services. Transportation Research Part B: Methodological, 33(6), 387-398.

- Araya, S., Abe, K., & Fukumori, K. (1983, December). An optimal rescheduling for online train traffic control in disturbed situations. In The 22nd IEEE Conference on Decision and Control (pp. 489-494). IEEE.

- Assad, A. A. (1980). Models for rail transportation. Transportation Research Part A: General, 14(3), 205-220.

- Balakina, E. P., Baranov, L. A., & Sidorenko, V. G. (2014). Automation of Business Processes of the Trains Movement Control on Moscow Underground.

- Caprara, A., Fischetti, M., & Toth, P. (2002). Modeling and solving the train-timetabling problem. Operations research, 50(5), 851-861.

- Edthofer, A., Bicher, M., & Breitenecker, F. (2020). Train Schedule Analysis and Optimization with the Max-Plus Automaton.

- Linovski, O. (2019). Shifting agendas: Private consultants and public planning policy. Urban Affairs Review, 55(6), 1666-1701.

- Mees, A. I. (1991). Railway scheduling by network optimization. Mathematical and Computer Modelling, 15(1), 33-42.

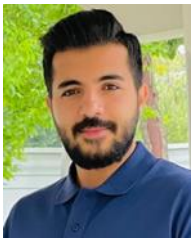
- Melander, L., & Tell, F. (2014). Uncertainty in collaborative NPD: Effects on the selection of technology and supplier. Journal of Engineering and Technology Management, 31, 103-119.

- Mills, R. G. J., & Perkins, S. E. (1991). Nonlinear programming applied to the dynamic rescheduling of trains. Recent Developments in Mathematical Programming, 345.

- Miwa, M., & Oyama, T. (2018). An optimal track maintenance scheduling model analysis taking the risk of accidents into consideration. International Transactions in Operational Research, 25(5), 1465-1490.

- Schneider, S. H., & Kuntz-Duriseti, K. (2002). Uncertainty and climate change policy. Climate change policy: a survey, 53-87.

- Vansteenwegen, P., & Van Oudheusden, D. (2007). Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network. Transportation Research Part B: Methodological, 41(4), 478-492.



میلاد نظری کارشناس ارشد راه و ترابری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات می‌باشد.

زمینه های پژوهشی مورد علاقه: مسیرهای ریلی(درون شهری)

دکتر علی عبدی استاد دانشگاه بین‌المللی امام خمینی می‌باشد.

عضو هیئت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

زمینه های پژوهشی مورد علاقه: طراحی مسیر راه،مسیرهای ریلی(درون شهری و مترو)، طرح فرودگاه

دکتر حسن ذوقی استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج می‌باشد.

استادیار عمران راه و ترابری دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج

عضو هیات مدیره سازمان نظام مهندسی ساختمان استان البرز