

تحلیل زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی (مطالعه موردی متروی تهران)

حمید بهبهانی، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
شهریار افندی‌زاده، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
کامران رحیم‌اف، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: behbahani@iust.ac.ir

چکیده

موضوع میانگین سر فاصله زمانی اعزام قطارها یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اثر گذار بر زمان انتظار مسافران است. برای ایجاد تناسب منطقی در خدمات‌دهی سیستم‌های همگانی باید نرخ سرویس‌گیری مسافران از سیستم با نرخ ورود آنها هماهنگ شود. در این مقاله بر مبنای شاخص‌های شناسایی شده اثر گذار بر زمان انتظار مسافران در محیط مطالعات موردی شبکه مترو تهران، اقدام به بررسی‌های میدانی و آمارگیری از حجم مسافران ورودی، زمان پیاده روی از محل ورود به ایستگاه تا روی سکو، زمان انتظار برای سوار شدن به قطار، فاصله بین ورود قطارها به ایستگاه و غیره... از سیستم مترو شده است و سپس با توجه به فرآیند مدل‌سازی شاخص‌ها، نحوه عملکرد و بهره‌برداری سیستم مترو تهران برای دوره زمانی ۶ الی ۱۰ صبح (اوج صبحگاهی یک روز میان هفته) شبیه‌سازی شده و در ادامه با مقایسه داده‌های حاصل از عملیات میدانی آمارگیری و خروجی‌های شبیه‌سازی، اقدام به تعیین اعتبار مدل و بررسی صحت مدل شده است.

با توجه به مدل شبیه‌سازی طراحی شده و انجام فرآیندهای مدل‌سازی شاخص‌ها و کالیبراسیون آن، رابطه ریاضی بین زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها با سر فاصله زمانی اعزام بین قطارها در شرایط مختلف به تعداد خطوط مترو و به تفکیک مسیرهای رفت و برگشت به دست آمد. بر مبنای فرآیندهای اعتبارسنجی، حداقل انطباق خروجی‌های مدل شبیه‌سازی با نمونه‌برداری آماری انجام شده با دقت ۹۵٪ حاصل شد و نسبت زمان انتظار به سر فاصله زمانی قطارها به‌طور میانگین برای طول دوره زمانی شبیه‌سازی در کل شبکه به میزان ۰/۶ مشخص شد.

واژه‌های کلیدی: مترو، زمان انتظار، زمان اعزام قطارها، شبیه‌سازی

۱. مقدمه

دیگر انواع ترابری (از جمله وسایل نقلیه شخصی) روی آورند. در میان سیستم‌های همگانی، مترو دارای جایگاه ویژه‌ای است، زیرا تبعیت آن از زمانبندی ثابت و رعایت جداول زمانی اعزام از پیش تعریف شده، موجب ایجاد نظم و دقت در ترتیب سفرها می‌شود.

در سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی شهری، تعیین زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها برای بهره‌مندی از خدمات ارائه شده، اهمیت فراوانی دارد زیرا اگر این زمان از حد قابل پذیرش فراتر رود، تأثیر آن احتمالاً باعث می‌شود که بخشی از متقاضیان سیستم حمل‌ونقل همگانی از استفاده از این سیستم منصرف شوند و به

۲. پیشینه تحقیق

با توجه به این که مسایل چندوجهی و چند هدفی با محدودیت‌های دنیای واقعی می‌توانند با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی قوی، کارآمد و در دسترس نظیر الگوریتم ژنتیک و یا الگوریتم‌های ترکیبی نظیر مدل‌های ریاضی با ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی حل شوند، بنابراین در بررسی سوابق به این الگوریتم‌ها توجه ویژه شده و کاربرد آنها مورد توصیه قرار گرفته است.

در مطالعات انجام شده توسط [۱] Janice P. Li در زمینه شبیه‌سازی یک ایستگاه، نمودارهای گردش جریان مسافر شامل فعالیت‌های مهمی که در ایستگاه انجام می‌شود و ارتباط متقابل و فیمابین آنها شناسایی شده است که زمان لازم برای انجام این فعالیت‌ها، تابعی از ساختار کرایه و سیاستهای جمع‌آوری آنها، طرح ایستگاه، شیوه‌های بهره‌برداری و ظرفیت سیستم بیان شده است. با استفاده از ابزار شبیه‌سازی، می‌توان به ارزیابی و تصمیم‌گیری در مقولات و موضوعات زیر پرداخت: [۱]

۱. بهینه‌سازی ترکیب انواع تجهیزات اخذ کرایه؛ که به منظور نحوه چیدمان آنها در عملکرد یک طرفه یا دوطرفه و در راستای کاهش زمان انتظار مسافران است

۲. تغییر رویه اخذ کرایه؛ از قبیل حذف پرداخت اسکناس و سکه، جایگزین کارت‌های اعتباری، کارت بلیت مدت‌دار و غیره، افزایش تعداد جایگاه‌های فروش بلیت و استقرار آنها در مکانهای دور از محل تردد با هدف کاهش حجم ترافیک

۳. اصلاح تجهیزات اخذ کرایه؛ با هدف افزایش سرعت در ارائه خدمات صدور بلیت به مسافران

۴. زمانبندی حرکت قطارها؛ با توجه به این که بسیاری از ایستگاه‌ها، نقطه تبادل مسافران خطوط مختلف قطارها بوده و مسافران ناگزیرند از پله‌ها، پله‌های برقی و دروازه‌های کنترل بلیت عبور کنند، برای تعیین نرخ ورود مسافران و الگوی تردد آنها در راهروها، سکوها و ...، بایستی تأخیر حرکت و اعزام قطارها، سرفاصله زمانی ورود قطارها و تعداد مسافران، ورودی به آنها و خروجی از آنها ارزیابی شود.

۵. برنامه زمانبندی تعمیرات و نگهداری تجهیزات، که با توجه به امکان خرابی لحظه‌ای هر یک از تجهیزات فنی و مدت زمان لازم برای رفع آن، بهره‌بردار بایستی برنامه از پیش تعریف شده‌ای برای رویارویی با این مشکل داشته باشد.

به منظور تحلیل عوامل اثر گذار بر زمان انتظار مسافران مترو، با توجه به تعداد بسیار زیاد عوامل و پارامترهای مؤثر بر آن، مدل شبیه‌سازی مناسب‌ترین راهکار برای تجزیه و تحلیل است، زیرا با ابزار شبیه‌سازی می‌توان زمان را فشرده کرد، به نحوی که فعالیتهای چند ساعت یا روز یا ماه یا حتی چندین سال را در ظرف چند دقیقه و گاهی در ظرف چند ثانیه شبیه‌سازی کرد. با تعبیه این امکان در فواصل زمانی کوتاه در طول دوره شبیه‌سازی، داده‌های مورد نظر تحلیل‌گر تولید و ارزیابی می‌شود و شناخت قابل توجهی از جزئیات تغییرات ساختاری سیستم حاصل می‌شود که دست یافتن به چنین شناختی بر اساس زمان واقعی میسر نیست.

از جمله موارد کاربرد این مدل می‌توان، کمک به برنامه‌ریزی‌های ایستگاه‌ها و طراحی برنامه زمانبندی اعزام قطارها در برنامه‌های توسعه آتی را نام برد. همچنین می‌توان با توجه به پارامتری بودن مدل، شرایط و سناریوهای مختلف سفرهای درون شهری برای سایر شهرها را نیز قبل از بهره‌برداری، شبیه‌سازی و تحلیل کرد. متدولوژی و مراحل انجام تحقیق، فعالیت‌های زیر را در بر می‌گیرد:

- شناسایی عوامل تأثیر گذار بر زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو از طریق مطالعات سوابق در مراجع و منابع مختلف

- شناسایی کلی محدودیتها و تعیین فرضیات غیر قابل تغییر
- شناسایی امکانات و تسهیلات ممکن (به صورت کمی و کیفی)
برای امکان کاهش زمان انتظار

- بررسی انواع مدل‌های حل مسأله و شناخت ویژگی‌های آنها
- شبیه‌سازی کلی و پارامتری سیستم مترو برای تعیین یک مدل کلی به منظور شناسایی عوامل ایجاد زمان انتظار برای مسافران
- آمارگیری از مسافران در ایستگاه‌های مترو برای اندازه‌گیری کمی زمان انتظار (شامل آمارگیری‌های عوامل تأثیر گذار فوق‌الذکر)

- اجرای مدل شبیه‌سازی متروی تهران با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده حاصل از آمارگیری میدانی
- تجزیه و تحلیل و اعتبار سنجی داده‌های خروجی حاصل از اجرای شبیه‌سازی مترو تهران
- انجام تحلیل حساسیت برای تعیین درجه تأثیرگذاری شاخص‌های گزیده و مؤثر بر میزان زمان انتظار

بر اساس اطلاعات موجود و تلفیق آن با روش‌های محاسباتی توزیعی، بنا شود.

- ارزیابی روش‌های مختلف هماهنگی به وسیله شبیه‌سازی

سناریوهای بهره‌برداری واقعی حمل‌ونقل همگانی

در مطالعات انجام شده توسط Anderson et al نیز از مدل شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم مونت کارلو برای کنترل حرکات اتوبوسرانی استفاده شد که در ادامه آن، مطالعاتی توسط Powell & Sheffi انجام پذیرفت و طی آن مدلی برای حرکت دسته‌ای و گروهی اتوبوس‌ها ایجاد شد. سپس، Lin et. al برای توسعه معیار اعزام اتوبوس‌ها، تحقیقاتی را انجام دادند و معیارهای توقف و حذف توقف اتوبوس‌ها^۱ در ایستگاه‌ها را بر مبنای تابع هزینه، تحلیل و بهینه‌سازی کرد. در این مطالعات، سناریوی مختلف بهره‌برداری به ازاء سرفاصله‌های زمانی اعزام و جداول برنامه زمانبندی مورد مقایسه قرار گرفتند و مشخص شد که کنترل‌های دقیق و محکم در حذف توقف اتوبوس‌ها در تعدادی از ایستگاه‌های طول مسیر، موجب افزایش قابل توجه متوسط زمان انتظار مسافران در خطوط می‌شود، در حالی که مهم‌ترین متغیر تصمیم‌گیری، معیار کنترل مدت زمان توقف اتوبوس در ایستگاه‌هاست. [۳]

از جمله شاخص‌های مؤثر در زمان انتظار مسافران، نسبت آن به سرفاصله زمانی اعزام قطارهاست که در مطالعات Knoppers & Muller [۴] توسط مدل شبیه‌سازی برای اتوبوسرانی شهرهای لیدز و منچستر، این نسبت در حدود ۰/۵ تعیین شده است. (یعنی $w_i \approx 0.5h_i$ که در رابطه بالا w_i زمان انتظار مسافران برای مسیر i و h_i متوسط زمان بین اعزام قطارها در مسیر i است.)

نتایج مطالعات Rudnicki [۵] در زمینه استفاده از مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی قابلیت اعتماد به سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی، بیانگر آن است که بایستی جریان تردد وسایل حمل‌ونقل همگانی با جریان ورود مسافران با یکدیگر سنجیده شده و سپس با اعمال پارامترهایی چون حداکثر ظرفیت ناوگان عمومی، سیستم بر مبنای متغیرهایی از جمله سرفاصله زمانی اعزام ناوگان، شبیه‌سازی شود.

این فرآیند شامل دو مرحله اصلی زیر است:

۱- جریان وسایل نقلیه همگانی که با نرخ توزیع سرفاصله زمانی اعزام آنها تشریح شده است که یک فرآیند اتفاقی بوده اما در

۶. طرح ایستگاه؛ برای حداقل کردن زمان انتظار مسافران لازم است چرخه گردش آنها در ایستگاه و محوطه‌های ورودی و خروجی، تجهیزات تهیه و کنترل بلیت و غیره به درستی و دقت طراحی شده باشد.

۷. ایمنی ورودی و خروجی‌ها؛ با محاسبه تعداد و ظرفیت راه‌پله‌ها، پله‌های برقی و راهروها در ایستگاه در مواقع عادی و بحرانی، بایستی امکان تردد، ورود و خروج راحت مسافران فراهم باشد.

[۲] Abkowitz et. al نیز از مدل شبیه‌سازی برای مقایسه متوسط زمان انتظار تبادل مسافران سیستم اتوبوسرانی در هنگامی که سناریوهای مختلفی برای نگهداشتن اتوبوس‌ها در نقاط تبادل وجود دارد، استفاده کرد. مهم‌ترین رویکرد در این مطالعات، تبیین میزان اهمیت اعمال نامرتب در زمان سفرها برای بهینه کردن تبادل‌هاست که نحوه اثر آن با استفاده از فرآیند شبیه‌سازی مشخص شده و ترکیب آن با مدل‌های بهینه‌سازی، منجر به بهبود سیستم می‌شود. [۲]

همچنین در چارچوب مطالعاتی که در زمینه تدوین ساختار مدل توزیع برای هماهنگی لحظه‌ای شبکه‌های حمل‌ونقل توسط Bukkapatnam, Dessouky & Zhao [۳] انجام شد، با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی اقدام به کنترل و مدل‌سازی زمانبندی، اعزام و سرفاصله‌های زمانی برای شرایط مختلف بهره‌برداری از یک سیستم اتوبوسرانی شهری شد تا از طریق حداقل کردن هزینه‌های انتظار مسافران در طیف گسترده سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی، یعنی چه آنهایی که وابسته به نرخ ورود مسافران به ایستگاه هستند و چه آنهایی که غیر وابسته به این نرخ ورود هستند (یعنی ورود مسافران به صورت اتفاقی صورت می‌پذیرد)، اقدام به تصمیم‌گیری مستقیم بر مبنای هزینه‌های انتظار حاشیه‌ای کرد. مطالعات انجام شده در راستای تحقق اهداف زیر بوده است: [۳]

- دستیابی به فرآیندی برای ترکیب سیاست‌های مختلف برای ورودی‌های متفاوت سیستم حمل‌ونقل اتوبوسرانی شامل راهبردهای هماهنگی کلان بر مبنای رویه‌های محلی، تحلیل تئوری‌های تحت سناریوهای مسئله و ارزیابی‌های ترکیبی.

- بسط و توسعه یک ساختار توزیعی برای دستیابی به سیاستهای هماهنگی با در نظر گرفتن تمام الگوریتم‌های مرتبط، به عنوان بخشی از اجزاء ساختار، به گونه‌ای که این ساختار ممکن است

[۸] Teigen & keren با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر زمان انتظار و کاهش آن و افزایش سطح خدمات ارائه شده صورت پذیرفته است. از سوی دیگر، برای شرایط بحرانی به ویژه مواقعی که پایانه‌ها و ایستگاه‌های حمل و نقل عمومی با ازدحام مسافر رو به رو است، با در نظر گرفتن شرایط خاص ایمنی از جمله خروجی‌های اضطراری و مدیریت تخلیه مسافران، مطالعاتی توسط [۹] Chow & Candy انجام شده که بر مبنای شبیه‌سازی شرایط طبیعی و مقایسه آن با شرایط وقوع بحران برای به دست آوردن زمان انتظار مسافران در هر دو حالت بوده است.

۳. انواع مدل‌های شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی، نوعی خاص از مدل ریاضی سیستم است که براساس تقلیدی از عملکرد فرآیند سیستم واقعی با گذشت زمان کار می‌کند [۱۰]. مدل‌های شبیه‌سازی، اصطلاحاً به نام مدل‌های ورودی - خروجی نیز مشهورند، زیرا با معلوم بودن ورودی زیر سیستم‌هایی که متقابلاً عمل می‌کنند، این مدل‌ها خروجی سیستم را به دست می‌دهند. به طور کلی مدل‌های شبیه‌سازی را می‌توان به شرح زیر رده‌بندی کرد: [۱۱]

- مدل‌های ایستا در مقابل پویا
- مدل‌های مبتنی بر فرآیندهای قطعی در مقابل فرآیندهای تصادفی

- مدل‌های گسسته در مقابل پیوسته
مدل ایستای شبیه‌سازی که شبیه‌سازی مونت کارلو نیز نامیده می‌شود، معرف سیستم در لحظه‌ای خاص از زمان است. مونت کارلو روشی است که در آن به منظور حل کردن مسائل غیرتصادفی یا برخی مسائل تصادفی که گذشت زمان هیچ نقش اساسی در آنها ندارد، از اعداد تصادفی استفاده می‌شود. [۱۲] در مقابل، مدل‌های پویای شبیه‌سازی، سیستمها را با توجه به تغییرشان با گذشت زمان معرفی می‌کنند. شبیه‌سازی زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو، نمونه‌ای از شبیه‌سازی پویا است.

مدل‌های شبیه‌سازی بدون هرگونه متغیر تصادفی را در رده مدل‌های قطعی قرار می‌دهند. مدل‌های قطعی مجموعه مشخصی از ورودیها دارند که به مجموعه‌ای یگانه از خروجیها می‌انجامند. مدل تصادفی شبیه‌سازی، یک یا چند متغیر تصادفی را به منزله ورودی در بر دارد. ورودیهای تصادفی به خروجیهای تصادفی می‌انجامند. چون خروجیها تصادفی‌اند، تنها می‌توان آنها را برآوردهایی از

دوره زمان اوج می‌توان، آنها را یک فرآیند ثابت تصادفی در نظر گرفت. تابع چگالی احتمال آن به شرح رابطه ریاضی (۱) است.

$$f(h) = \frac{(\lambda k)^k}{\mu(k)} \cdot h^{k-1} \cdot e^{-\lambda k \cdot h} \quad (1)$$

که در آن h سرفاصله زمانی اعزام ناوگان و λ شدت جریان وسایل نقلیه همگانی است که به صورت $\frac{1}{h}$ است و \bar{h} میانگین سرفاصله زمانی است. K نیز پارامتر ویژگی توزیع گاما بوده که معادل $\frac{\bar{h}^2}{s_h^2}$ است و S_h ، انحراف معیار استاندارد است. μ نیز تابع گاما برای پارامتر k است.

۲- نرخ جریان ورود مسافران به ایستگاه براساس توزیع پواسون در نظر گرفته شده است و متوسط نرخ اشغال وسیله نقلیه عمومی یعنی تعداد مسافران داخل ناوگان در ایستگاه Z که براساس رابطه (۲) به دست آمده است.

$$Q_j = \sum_{i=1}^j Z_{bi} - \sum_{i=2}^j Z_{ai} \quad (2)$$

که در آن Z_{bi} تعداد مسافران سوار شده و Z_{ai} تعداد مسافران پیاده شده در ایستگاه i است. براساس احتمالات ریاضی، برای تعداد مسافران زیاد داخل وسیله نقلیه در حالتی که در یک دوره زمانی، نرخ جریان مسافر تغییر نکند توزیع پواسون تقریباً نرمال خطی می‌شود. [۵]

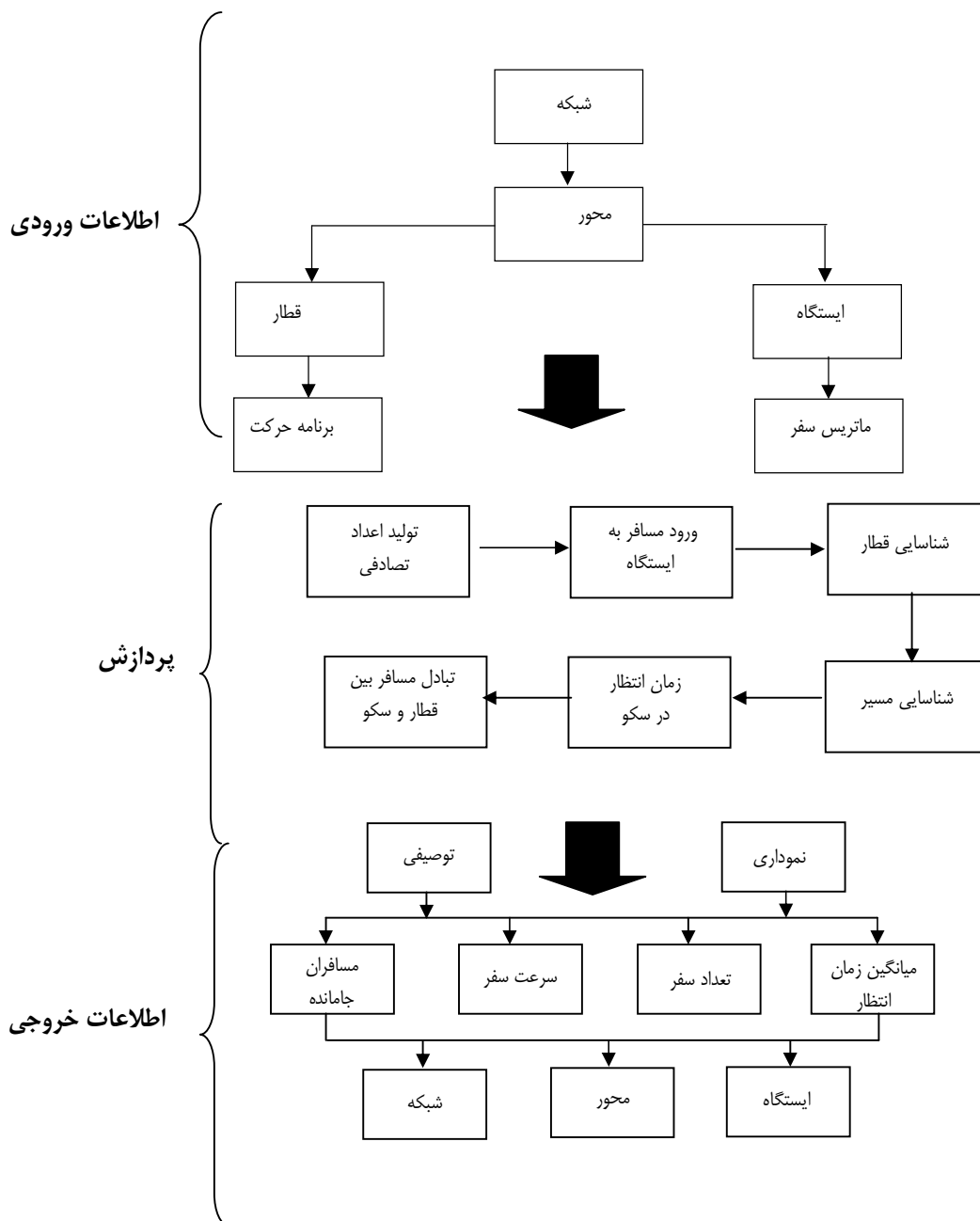
[۶] Vansteenwegen & Van Oudheusden با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی LP^۲ در ترکیب با روش شبیه‌سازی، مدل برنامه‌ریزی حرکت قطارهای برون شهری^۳ را با هدف افزایش سطح خدمت رسانی به مشتریان و دستیابی به بهترین جداول برنامه زمانبندی حرکت و اعزام در راستای حداقل کردن زمانهای تبادل مسافر و هزینه‌های ناشی از زمان انتظار مسافران در سیستم به دست آوردند. در این تکنیک، با استفاده از مدل شبیه‌سازی تهیه شده، جداول مختلف زمانبندی براساس معیارهای زمان انتظار و هزینه با یکدیگر مقایسه شده‌اند و به این ترتیب، جداول بهبود یافته‌اند.

برای شبکه‌های قطارهای برون‌شهری نیز با مقیاس کوچک‌تر، تکنیک شبیه‌سازی مشابهی توسط [۷] Vansteenwegen & Van Oudheusden در راستای بهبود خدمات ارائه شده به مسافران، انجام شده است. تحقیقات مشابهی نیز برای تعیین زمان انتظار مسافران سیستم اتوبوسرانی به روش شبیه‌سازی شرایط واقعی توسط

تحلیل زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی

مجموعه‌ای از نقاط گسسته زمان تغییر می‌کند. خدمت‌گیری مسافران از سیستم مترو مثالی در مورد سیستم گسسته است، زیرا متغیر حالت تعداد مسافر منتظر در هر ایستگاه، زمانی تغییر می‌کند که مسافر وارد ایستگاه شده و یا قطار وارد سکو می‌شود. در مقابل، سیستم پیوسته سیستمی است که متغیرهای حالت در آن به صورت پیوسته طی زمان تغییر کند.

ویژگیهای واقعی سیستم به شمار آورد. شبیه‌سازی مترو معمولاً همراه با مدتهای تصادفی بین دو ورود و مدتهای تصادفی خدمت‌دهی است. بنابراین در شبیه‌سازی تصادفی، معیارهای خروجی مانند متوسط تعداد افراد منتظر و متوسط مدت انتظار هر مسافر را باید برآوردهایی آماری از ویژگیهای واقعی سیستم تلقی کرد. سیستم گسسته سیستمی است که متغیرهای حالت در آن تنها در



شکل ۱. متدولوژی فرآیند طراحی مدل شبیه‌سازی زمان انتظار مسافران مترو

۴. روش شناسی مدل شبیه‌سازی زمان انتظار

مسافران

بر مبنای توضیحات فوق در زمینه معرفی انواع مدل‌های شبیه‌سازی، مشخص شد که مدل شبیه‌سازی مترو با توجه به شاخص زمان انتظار مسافران، در رده مدل‌های گسسته، پویا و تصادفی قرار می‌گیرد. بنابراین در این مدل، لازم است ارتباط منطقی بین شاخص‌های ورودی با متغیرهای خروجی برقرار شود. معمولاً شاخص‌های ورودی در بر گیرنده مشخصات فیزیکی یعنی شبکه خطوط و مسیرهای حرکت، ناوگان قطار و مشخصات دینامیکی یعنی برنامه زمانبندی سیر و حرکت و ماتریس مبدأ - مقصد مسافران است و متغیرهای خروجی مدل نیز، شاخص‌های عملکردی سیستم یعنی سرعت، زمان، حجم مسافر جابجا شده و نظایر آنهاست.

بنابراین، با هدف طراحی مدل شبیه‌سازی سیستم قطار شهری (مترو)، نخست اقدام به تدوین متدولوژی مدل شد که به مانند سایر مدل‌های رایج، دارای سه بخش اطلاعات ورودی (شامل متغیرهای مؤثر بر عملکرد سیستم)، پردازش (روابط ریاضی برای تحلیل و محاسبات شاخص‌ها) و اطلاعات خروجی (گزارش‌ها؛ شامل نمودارها و جداول مقادیر شاخص‌ها) است. در شکل ۱ متدولوژی فرآیند انجام طراحی مدل به تصویر کشیده شده است.

۵. طراحی و اجرای مدل شبیه‌سازی زمان انتظار

مسافران

بر مبنای فرآیندهای متدولوژی مورد نظر، نخست اقدام به طراحی اطلاعات ورودی به مدل شبیه‌سازی به شرح زیر شد:

۱- اطلاعات مربوط به مشخصات ساختار فیزیکی و هندسی (ثابت) شامل:

- شبکه
- محورهای در حال بهره‌برداری مترو
- ایستگاه‌های فعال
- ناوگان موجود
- ۲- اطلاعات مربوط به مشخصات بهره‌برداری و عملکرد (متغیر) شامل:
- ماتریس سفرهای مبدأ - مقصد مسافران طی دوره‌های زمانی مشخص

- برنامه زمانبندی و اعزام حرکت قطارها

پس از تکمیل اطلاعات ورودی توسط کاربر، لازم است طراحی نحوه پردازش اطلاعات انجام شود. این مرحله که مهم‌ترین بخش مدل شبیه‌سازی است، شامل الگوریتم‌های ریاضی و محاسباتی برای تولید اعداد تصادفی به منظور شناسایی نرخ ورود مسافران به ایستگاه، مدل برآورد منطقی ورود مسافران به ایستگاه، نحوه شناسایی قطارها، محاسبات زمان انتظار مسافران در سکوی هر ایستگاه به تفکیک مسافران ورودی، خروجی و تبادل بین قطارهاست.

بر این اساس، نظر به ضرورت بیان محاسبات و طراحی روابط ریاضی مربوط به پردازش اطلاعات مدل فوق، در ادامه اقدام به تشریح مهم‌ترین رویکردهای این مرحله یعنی الگوریتم تولید اعداد تصادفی، مدل منطقی فرآیند ورود مسافر به ایستگاه و محاسبه زمان انتظار مسافران شده است.

یکی از ویژگی‌های هر مدل شبیه‌سازی، تغییرات تصادفی است. به منظور تولید مقادیر تصادفی برای هر ویژگی، باید به نمونه‌گیری از توزیع احتمال نظیر آن پرداخت. روش هم‌نهشتی خطی بیش از هر روش دیگری مورد استفاده قرار دارد. این مولد در زبانهای بسیار متداول شبیه‌سازی از قبیل SLAM ARENA و SIMSCRIPT وجود دارد که به تفصیل مورد آزمایش قرار گرفته و معتبر شناخته شده است. [۱۳]

این روش به دلیل بی‌نیازی به عمل ضرب، سرعت قابل توجهی دارد که در ادامه، به تشریح آن پرداخته می‌شود.

۵-۱ تولید اعداد و مقدار تصادفی

روند کار چنین است که یک دنباله n تایی مانند X_1, X_2, \dots, X_n را دریافت و بقیه دنباله یعنی X_{n+1}, X_{n+2}, \dots را تولید می‌کند. اساس تولید مقدار در این روش استفاده از رابطه ۳ است.

$$X_i \equiv (X_{i-1} + X_{i-n}) \pmod{m}, \quad i=n+1, n+2, \dots \quad (3)$$

طبق تعریف، رابطه $a \equiv (b) \pmod{m}$ معادل این است که بگوئیم باقیمانده تقسیم $(b-a)$ بر m مساوی صفر است.

با استفاده از رابطه:

$$R_{i-n} = \frac{X_i}{m} \quad i=n+1, n+2, \dots \quad (4)$$

می‌توان بر اساس روش هم‌نهشتی خطی (با فرض $m = 100$) به تولید اعداد تصادفی بین صفر و یک اقدام کرد.

۵-۲ منطق الگوریتم ورود مسافر به ایستگاه:

منطق ورود مسافران از محل ورود از سطح خیابان تا استقرار مسافر بر روی سکوی اعزام، شامل مقاطع مختلفی است که عبارت از (۱) تهیه بلیت (به تفکیک داشتن یا نداشتن بلیت و کارت اعتباری)، (۲) پیاده‌روی در داخل ایستگاه برای طی مسیر تا استقرار روی سکو و (۳) در انتظار به سر بردن جهت ورود قطار و سرویس‌گیری می‌باشد. بدین منظور، متغیرهای طراحی به شرح جدول ۱ معرفی شده‌اند. لازم به توضیح است منظور از زمان گام شبیه‌سازی (T_i)، مقاطع زمانی تعریف شده از سوی کاربر جهت اجرای شبیه‌سازی است که براساس آن رویدادهای داخل شبکه مترو کنترل و برنامه‌ریزی می‌شود.

الف. محاسبه مسافرانی که هنگام ورود به ایستگاه بلیت ندارند مسافران در بدو ورود به ایستگاه دارای سه وضعیت فاقد بلیت، دارای بلیت و یا دارای کارت اعتباری هستند. آن دسته از مسافرانی که فاقد بلیت بوده، جهت تهیه بلیت باید به گیشه فروش بلیت مراجعه کنند.

به این ترتیب با استفاده از روش تولید مقدار تصادفی گسسته پیشامد به روش جدول‌گرد، ابتدا تعداد مسافران ورودی در واحد زمان به تفکیک ایستگاه‌ها به عنوان نمونه برداشت شده و در ستون فراوانی مشاهده ثبت شد. سپس در ستون بعدی فراوانی نسبی (درصد فراوانی) و در ادامه درصد فراوانی تجمعی محاسبه شد. بدیهی است مقادیر مندرج در آخر ستون درصد فراوانی تجمعی ۱۰۰٪ یا یک است.

$$f_i \quad \% f_i \quad \% \sum_{i < R_i \leq i+1} f_i \quad (5)$$

حال با توجه به این که عدد تصادفی تولید شده مقداری بین صفر و یک دارد (ستون آخر)، بنابراین مشخص می‌شود که عدد تصادفی مزبور بین کدام دو عدد در ستون درصد فراوانی تجمعی قرار می‌گیرد که در این مرحله، مقدار عدد بزرگ‌تر یا حد بالا مشخص شده و مقدار فراوانی (ستون اول) مقدار انتخابی به عنوان عدد کاندیدای ورود انتخاب می‌شود.

جدول ۱. معرفی متغیرهای طراحی برای ورود مسافر به ایستگاه

ردیف	متغیر	شرح متغیر	ردیف	متغیر	شرح متغیر
۱	N	تعداد مسافر	۱۳	$N_{vk}(t)$	تعداد مسافر دارای بلیت کارتی از ورودی به کنترل کارت
۲	$N_{vg}(t)$	تعداد مسافر از ورودی به گیشه	۱۴	$N_{cks}(t)$	تعداد مسافر بین کنترل و سکو
۳	R_g	نرخ واگذاری بلیت گیشه	۱۵	$N_{bn}(t)$	تعداد مسافر ورودی که بلیت ندارند
۴	$N_{gc}(t)$	تعداد مسافر از گیشه به کنترل	۱۶	$N_{bd}(t)$	تعداد مسافر ورودی که بلیت دارند
۵	$N_{vc}(t)$	تعداد مسافر دارای بلیت از ورودی به کنترل	۱۷	$N_{kd}(t)$	تعداد مسافر ورودی که کارت دارند
۶	$L_g(t)$	طول صف گیشه	۱۸	T_i	زمان گام شبیه‌سازی
۷	$L_c(t)$	طول صف کنترل بلیت	۱۹	$T=t$	زمان شبیه‌سازی
۸	R_c	نرخ کنترل بلیت	۲۰	T_{vg}	مدت زمان پیاده روی از ورودی به گیشه
۹	$L_k(t)$	طول صف کنترل	۲۱	T_{gc}	مدت زمان پیاده روی از گیشه تا کنترل
۱۰	R_k	نرخ کنترل کارت	۲۲	T_{vc}	مدت زمان پیاده روی از ورودی تا کنترل
۱۱	$N_{ks}(t)$	تعداد مسافر عبوری از گیت کنترل	۲۳	T_{vk}	مدت زمان پیاده روی از ورودی تا کنترل کارت
۱۲	$N_{cs}(t)$	تعداد مسافر عبوری از گیت کنترل بلیت	۲۴	T_{cks}	مدت زمان پیاده روی از کنترل کارت تا سکو ایستگاه

ج. مدل محاسباتی مسافران ورودی دارای بلیت

مسافران ورودی دارای بلیت مستقیماً از ورودی ایستگاه مترو به سمت گیت‌های کنترل بلیت حرکت می‌کنند. کنترل مقاطع پیاده‌روی در این شرایط نیز به مانند حالت‌های دیگر با استفاده از روابط ۸ تا ۱۰ صورت می‌پذیرد.

$$\sum_0^n n < (T_{vc} / T_i) \leq \sum_1^{n+1} m \Rightarrow \quad (8)$$

$$N_{vel}(t) = N_{bd}(t), N_{ve2}(t-1) = N_{bd}(t-1), \dots, \rightarrow$$

$$N_{vcm}[t-(m-1)] = N_{bd}[t-(m-1)]$$

همان طور که در وضعیت قبلی بیان شد، مسافران فاقد بلیت پس از خرید بلیت، در گام زمانی محاسبه شده به مسافران دارای بلیت اضافه شده و به سمت دروازه‌های کنترل بلیت حرکت می‌کنند.

$$N_c(t) = N_{gc}(t) + N_{vc}(t) \quad (9)$$

شرایط محاسبه عبور از دروازه کنترل بلیت و تشکیل صف در دو حالت دقیقاً مطابق وضعیت قبلی است.

$$N_c(t) + L_c(t-1) - R_c \begin{cases} \leq 0 & (1) \\ > 0 & (2) \end{cases} \quad (10)$$

$$(1) \Rightarrow N_{cs}(t+1) = N_c(t) + L_c(t-1), L_c(t+1) = 0$$

$$(2) \Rightarrow N_{cs}(t+1) = R_c, L_c(t+1) = N_c(t) + L_c(t-1) - R_c$$

د. محاسبه مسافرانی که هنگام ورود کارت اعتباری دارند

آشکار است که دسته‌ای از مسافران ورودی، قبلاً کارت‌های اعتباری مدت‌دار تهیه کرده‌اند و در صف تهیه بلیت و گیشه مربوطه قرار نمی‌گیرند. در این مرحله خواهیم داشت:

$$\sum_0^n n < (T_{vk} / T_i) \leq \sum_1^{n+1} m \quad (11)$$

$$N_{vkl}(t) = N_{kd}(t), N_{vk2}(t-1) = N_{kd}(t-1), \dots, \rightarrow$$

$$N_{vkm}[t-(m-1)] = N_{kd}[t-(m-1)]$$

اگر زمان پیاده روی از ورودی ایستگاه تا گیشه T_{vg} بیشتر از زمان گام پردازش T_i باشد، تعداد گام‌های کنترلی پیاده روی با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد.

(۶)

$$\sum_0^n n < (T_{vg} / T_i) \leq \sum_1^{n+1} m$$

$$N_{vg1}(t) = N_{bn}(t), N_{vg2}(t-1) = N_{bn}(t-1), \dots,$$

$$N_{vgm}[t-(m-1)] = N_{bn}[t-(m-1)]$$

ب. محاسبه نحوه تهیه بلیت از گیشه

هنگام رسیدن مسافر به گیشه، اگر نرخ فروش بلیت R_g بزرگ‌تر از تعداد مسافران ورودی N_{vg} و مسافران منتظر در صف ورودی گام قبلی L_g باشد، در آن گام پردازش دیگر صفی ایجاد نمی‌شود و کلیه مسافران از گیشه بلیت تهیه می‌کنند و به سمت گیت کنترل بلیت حرکت می‌کنند. (حالت ۱)

اما در صورتی که نرخ فروش بلیت کوچک‌تر از نرخ ورود و تعداد در صف قبلی باشد، تعداد مسافرانی که موفق به تهیه بلیت در هر گام پردازش می‌شوند به اندازه سرعت نرخ بلیت فروشی می‌شود. (حالت ۲)

در این حالت، تعداد مسافران منتظر در صف برابر با اختلاف نرخ ورود و تعداد در صف قبلی با نرخ واگذاری بلیت در گیشه است که توسط رابطه ۷ محاسبه شده است.

(۷)

$$N_{vg}(t) + L_g(t-1) - R_g \begin{cases} \leq 0 & (1) \\ > 0 & (2) \end{cases}$$

$$1) \Rightarrow N_{gc}(t+1) = N_{vg}(t) + L_g(t-1), L_g(t+1) = 0$$

$$2) \Rightarrow N_{gc}(t+1) = R_g, L_g(t+1) = N_{vg}(t) + L_g(t-1) - R_g$$

لازم به یادآوری است که تعداد مسافرانی که از گیشه، بلیت تهیه می‌کنند و سپس به سمت کنترل بلیت حرکت می‌کنند، در گام زمانی مربوطه با مسافرانی که از قبل بلیت داشته و مستقیماً از ورودی به سمت کنترل بلیت حرکت می‌کنند، جمع می‌شوند که این مطلب در توضیح شرایط بعدی (مسافرانی که از قبل بلیت دارند) آورده شده است.

برای محاسبه عبور از گیت کنترل کارت اعتباری، از رابطه ۱۲ استفاده شد:

$$N_{vk}(t) + L_k(t-1) - R_k \begin{cases} \leq 0 & (1) \\ > 0 & (2) \end{cases}$$

$$(1) \Rightarrow N_{ks}(t+1) = N_{vk}(t) + L_k(t-1), L_k(t+1) = 0$$

$$(2) \Rightarrow N_{ks}(t+1) = R_k, L_k(t+1) = N_{vk}(t) + L_k(t-1) - R_k$$

۳-۵ محاسبه مدت زمان انتظار مسافران در سکو

از آنجا که قطار قبلی در زمان t از ایستگاه خارج شده و قطار بعدی در زمان T وارد ایستگاه می‌شود، آنگاه تعداد مسافران جامانده از قطار قبلی را $N_{sb}(t)$ و تعداد مسافران روی سکو را $N_s(t)$ نامیده و چون بین زمانهای t و T تعداد $m+1$ رکورد جدید وجود دارد، خواهیم داشت: $T = t + (m+1)t_i$ که در آن، زمان گام پردازش t_i ، مدت زمان انتظار مسافران روی سکو از زمان t الی T است.

در جدول ۲، نحوه محاسبه مدت زمان انتظار مسافران در سکو نشان داده شده است.

جدول ۲. الگوریتم نحوه محاسبه زمان انتظار مسافران در سکو

clock	N_s	N_{sb}	Train
t	$N_s(t)$	$N_{sb}(t)$	out
$t+t_i$	$N_s(t+t_i)$	-	
$t+2t_i$	$N_s(t+2t_i)$	-	
.....	
$T=t+(m+1)t_i$	$N_s(t+(m+1)t_i)$	-	In

به این ترتیب نحوه محاسبه زمان انتظار کل در بین فاصله زمانی رسیدن دو قطار به شرح ذیل مدل شدند:

(۱۳)

$$T_s(t) = [N_s(t) + N_{sb}(t)] * (T - t) = [N_s(t) + N_{sb}(t)] * (m+1)t_i$$

$$T - t = t + (m+1)t_i - t = (m+1)t_i$$

$$T_s(t+t_i) = [N_s(t+t_i) - N_s(t) - N_{sb}(t)] * (T - (t+t_i))$$

$$T_s(t+2t_i) = [N_s(t+2t_i) - N_s(t+t_i)] * (T - (t+2t_i))$$

.....

$$T_s(t+mt_i) = [N_s(t+mt_i) - N_s(t+(m-1)t_i)] * (T - (t+mt_i))$$

$$T_s(t, T) = T_s(t) + T_s(t+t_i) + T_s(t+2t_i) + \dots + T_s(t+mt_i)$$

در ادامه، میانگین زمان انتظار مسافران روی هر سکو با توجه به مجموع تعداد مسافران منتظر برای سوار شدن به قطار از سکوی مورد نظر در ایستگاه مبدا تا زمان پردازش کنونی و مدت زمان هر گام پردازش بر این اساس رابطه ۱۴ محاسبه شده که واحد آن دقیقه است.

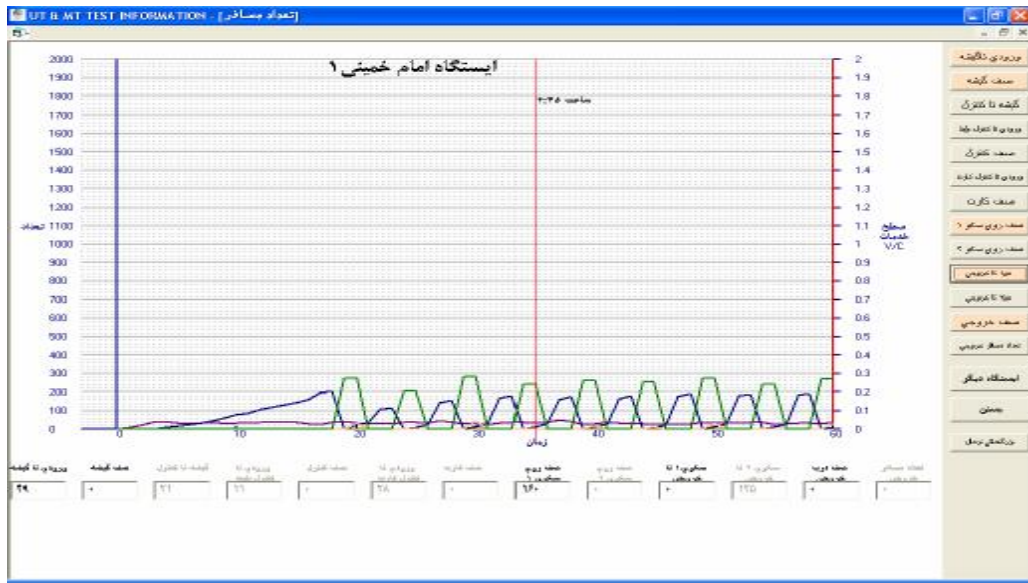
(۱۴)

$$\text{Time_wait}(c, m, j) = \frac{\sum_{c=1}^{\text{steps}} N_s(c, id, j) \times \text{time_step}}{\sum_{c=1}^{\text{steps}} N_s(c, id, j)}$$

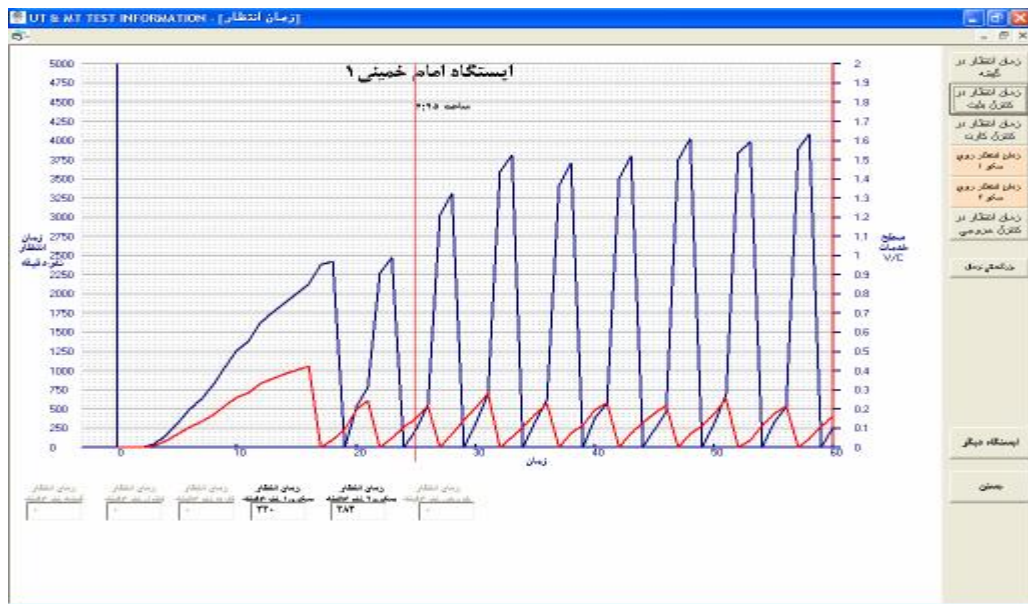
در رابطه (۱۴)، time_step زمان هر گام پردازش و N_s مجموع مسافران روی سکو تا گام جاری است. j , id , C_i نیز به ترتیب کد ایستگاه، کد محور و کد سکوی مورد نظر است.

۶. نتایج اجرای مدل شبیه‌سازی

پس از تکمیل مرحله پردازش، به طراحی خروجی مدل شبیه‌سازی پرداخته شد. براین اساس، نرم‌افزار مدل شبیه‌سازی مترو METSIM^۴ با استفاده از زبان ویژوال بیسیک ۶ تهیه و تدوین شد که با استفاده از اطلاعات ورودی حاصل از جمع‌آوری آمار و اطلاعات ورود مسافر در شبکه مترو تهران (اطلاعات متغیر) و تنظیم اطلاعات مربوط به ساختار شبکه و اجزای اطلاعاتی آن (اطلاعات ثابت)، اقدام به شبیه‌سازی مدل زمان انتظار مسافران از ساعت ۶ الی ۱۰ صبح (ساعت اوج صبحگاهی یک روز عادی) در کلیه ایستگاه‌های فعال مترو بر خطوط ۱ و ۲ و ۵ که بالغ بر ۳۰ ایستگاه^۵ است، با استفاده از شیوه تمام شماری تردد در مقاطع زمانی ۵ دقیقه‌ای شده و با تبدیل آنها به گام‌های زمانی ۱ دقیقه‌ای، به عنوان داده ورودی به مدل، وارد شد. سپس خروجی‌های برنامه در سه بخش ایستگاه، محور و شبکه ارائه شدند که بخشی از نتایج آن در قالب گزارش محور به شرح زیر تنظیم شده است. تمامی بندهای اطلاعاتی برنامه در گزارش‌های خروجی به دو شکل تصویری و توصیفی ارائه شده است تا کاربران برنامه علاوه بر دسترسی به مقادیر دقیق خروجی برنامه شبیه‌سازی، درک شهودی از نتایج کسب شده نیز داشته باشند.



شکل ۲. نمونه گزارش خروجی از نرم افزار شبیه سازی (METSIM) برای تعداد مسافر ایستگاه امام خمینی ۱



شکل ۳. نمونه گزارش خروجی از نرم افزار شبیه سازی (METSIM) برای زمان انتظار مسافران ایستگاه امام خمینی ۱

از فرضیات اساسی و مهم، زمانهای بین اعزام خطوط یک و دو درون شهری است که برابر ۵ دقیقه منظور شد، در حالی که برای خط ۵ حومه ای ۱۵ دقیقه فرض شد. با توجه به جدول گزارش خطوط سه گانه مترو، نتایج کلی محورها (شبکه مترو) به شرح جدول ۴ و ارائه تصویری از آن به شرح شکل ۴ است.

در بخش گزارش های محور به تفکیک خطوط سه گانه متروی تهران، اطلاعات مربوط به هر خط با ذکر ایستگاه های طول مسیر قابل دستیابی است. اجزای تشکیل دهنده این گزارش شامل فهرست ایستگاه های هر خط به انضمام میانگین زمان انتظار در سکو، تعداد مسافر ورودی به ایستگاه و تعداد مسافر جا مانده از قطار به تفکیک مسیر رفت و برگشت است، که در جدول ۳ ارائه شده است.

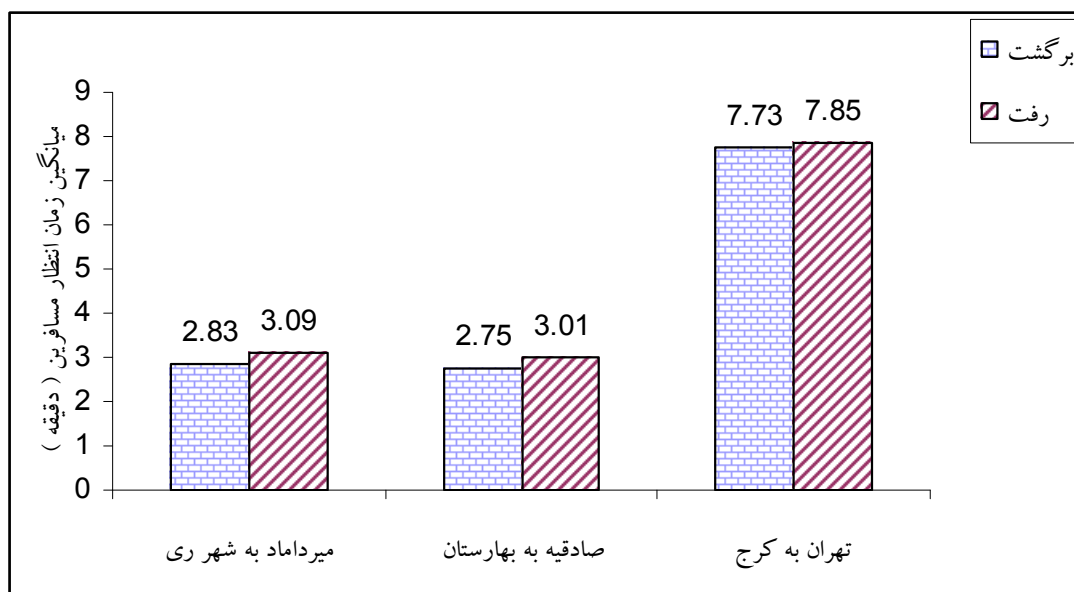
تحلیل زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی

جدول ۳. نمونه‌ای از خروجی مدل شبیه‌سازی در قالب گزارش محور

نام ایستگاه	میانگین زمان انتظار به دقیقه		تعداد مسافران ورودی		تعداد مسافران جامانده	
	رفت	برگشت	رفت	برگشت	رفت	برگشت
میرداماد	۰	۲/۹۷۹	۰	۱۲۳۹۷	۰	۰
مصلی	۰	۲/۲۳۱	۰	۸۱۵۷	۰	۰
شهید بهشتی	۳/۲۸۶	۲/۸۵	۹۶	۳۰۷۱	۰	۰
شهید مفتاح	۳/۲۰۹	۳	۹۱	۲۱۱۷	۰	۰
هفت تیر	۳/۰۹	۳	۳۲۱	۴۳۶۲	۰	۲۶
علی آباد	۲/۹۷۹	۳/۲۰۹	۱۱۷۸۸	۱۵۷	۰	۰
جوانمرد قصاب	۳	۳/۲۶۲	۶۱۳۳	۲۴	۰	۰
شهری	۲/۹۱۷	۰	۱۷۷۳۳	۰	۰	۰
میانگین	۳/۰۹	۲/۸۳	۴۷۸۶	۲۹۱۶	۴	۲
صادقیه	۲/۶۴۶	۰	۳۶۹۱۱	۰	۰	۴۷
طرشت	۲/۹۵۸	۳/۱۳۶	۳۰۱۱	۶۳۱	۰	۰
دانشگاه شریف	۲/۹۵۷	۳/۱۱۱	۵۷۱۷	۲۰۳۲	۱۲	۰
حسن آباد	۳/۱۰۱	۲/۹۷۹	۸۳۰	۹۶۱	۰	۰
امام خمینی ۲	۳/۰۶۶	۲/۹۵۷	۱۳۷۶	۲۷۶۴۶	۰	۳۱
ملت	۳/۲۰۵	۲/۸۹۶	۱۷	۳۶۴	۰	۰
بهارستان	۰	۲/۹۱۷	۰	۷۵۳۲	۰	۰
میانگین	۳/۰۱	۲/۷۵	۵۴۷۶	۴۱۷۷	۱	۷
تهران	۰	۶/۹۳۸	۰	۲۰۹۲۵	۰	۵۸
چینگر	۸/۲	۷/۸۱۲	۱۳۲۳	۲۰۶	۰	۰
ایران خودرو	۷/۸۶۷	۸/۱۸۸	۵۳۵	۴۰	۰	۰
ورد آورد	۷/۹۳۸	۸	۱۸۸۳	۲۹۹	۰	۰
کرج	۷/۳۷۵	۰	۱۶۸۷۹	۰	۳۶	۰
میانگین	۷/۸۵	۷/۷۳	۵۱۵۵	۵۳۶۸	۷	۱۲

جدول ۴. نمونه‌ای از خروجی مدل شبیه‌سازی در قالب گزارش شبکه

کد محور	نام محور	میانگین زمان انتظار مسافران (دقیقه)		زمان بین اعزام قطارها (دقیقه)	
		رفت	برگشت	رفت	برگشت
۱	میرداماد به شهری	۳/۰۹	۲/۸۳	۵	۵
۲	صادقیه به بهارستان	۳/۰۱	۲/۷۵	۵	۵
۵	تهران به کرج	۷/۸۵	۷/۷۳	۱۵	۱۵



شکل ۴. نمونه‌ای از خروجی تصویری مدل شبیه‌سازی برای متغیر « میانگین زمان انتظار مسافران »

۷. اعتبارسنجی مدل

با توجه به این که مدل مذکور از مدل‌های بزرگ مقیاس است، بررسی و کنترل کلیه متغیرهای خروجی مدل، امری دشوار و زمان بر است. بنابراین میزان تبادل مسافران بین طبقات ایستگاه امام خمینی یعنی محل تلاقی دو خط مترو و تبادل مسافرجهت تغییر محور سفر (خط یک و دو) به عنوان متغیر مبنای جهت بررسی اعتبار مدل شناسایی و انتخاب شد.

آزمون شبیه‌سازی و عملیات میدانی آن برای برداشت آمار مسافران، مربوط به داده‌های روز سیزدهم آذر ماه ۱۳۸۴ بوده و بازه زمانی برداشت آمار نیز از ساعت ۶ الی ۱۰ صبح در سطح تمامی ایستگاه‌های متروی تهران و حومه (خطوط یک، دو و پنج) است. با توجه به این که ایستگاه امام خمینی محل تلاقی دو محور است، بنابراین ایستگاه یادشده به دو ایستگاه امام خمینی ۱ (در امتداد خط شمال-جنوب یک) و امام خمینی ۲ (در امتداد خط غربی-شرقی دو) تقسیم شده است.

حال با توجه به این که در هر محور دو مسیر رفت و برگشت وجود دارد، بنابراین حالات ممکن تبادلات مسافر بین دو ایستگاه به شرح زیر تعریف شد:

۱-۷ انتقال مسافران از خط یک به خط دو شامل:

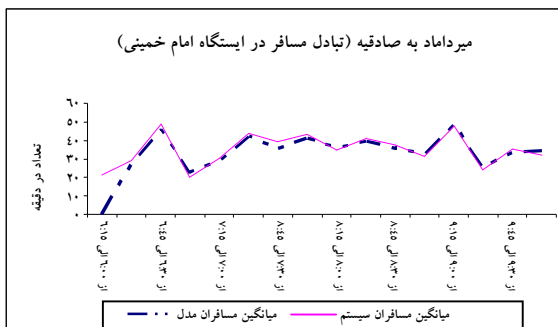
الف. از محور شهر ری (حرم مطهر) به محور صادقیه

- ب. از محور شهر ری به محور بهارستان
- ج. از محور میرداماد به محور صادقیه
- د. از محور میرداماد به محور بهارستان

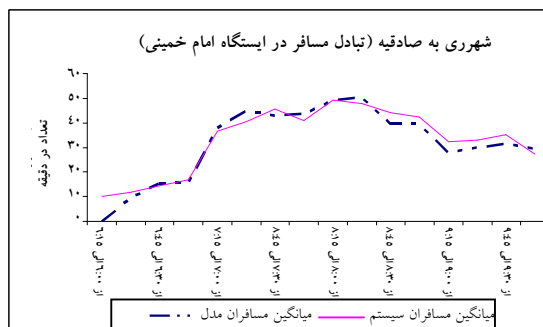
۲-۷ انتقال مسافران از خط دو به خط یک شامل:

- الف. از محور صادقیه به محور شهر ری
 - ب. از محور صادقیه به محور میرداماد
 - ج. از محور بهارستان به محور شهرری
 - د. از محور بهارستان به محور میرداماد
- یادآوری می‌شود مسافران خط ۵ (تهران - کرج) در ایستگاه صادقیه تبادل شده و جزو آمار به شمار می‌آیند.
- دوره زمانی آزمایش شبیه‌سازی نیز از ساعت ۶ الی ۱۰ صبح در گام‌های زمانی یک دقیقه‌ای انجام شده است. در این آزمایش، زمانهای بین اعزام قطارهای خطوط یک و دو در فواصل ۵ دقیقه‌ای و قطارهای خط پنج در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای تنظیم شده است.
- شکل ۵، از ۵ - الف تا ۵ - ح، نمودارهای مقایسه‌ای خروجی شبیه‌سازی با داده‌های حاصل از نمونه برداری برای شاخص میانگین تعداد مسافران جابجا شده (در دقیقه) به تفکیک تبادلات فوق‌الذکر در ایستگاه امام خمینی (ره) را نشان می‌دهد.

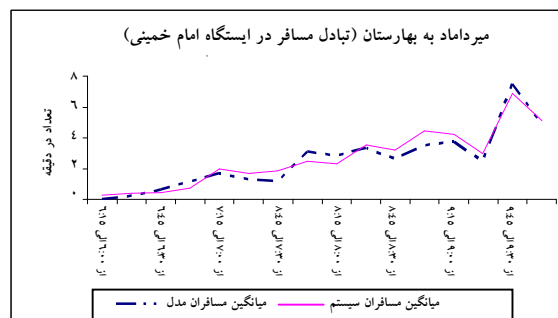
تحلیل زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی



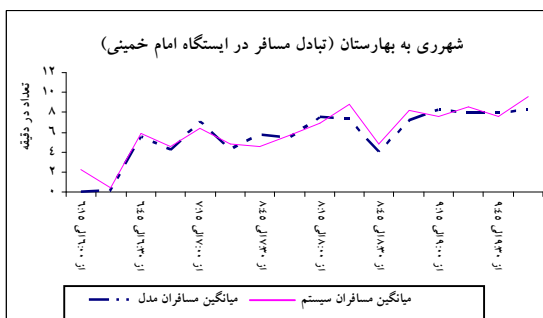
شکل ۵-ب- تبادل مسافران از شهری به صادقیه



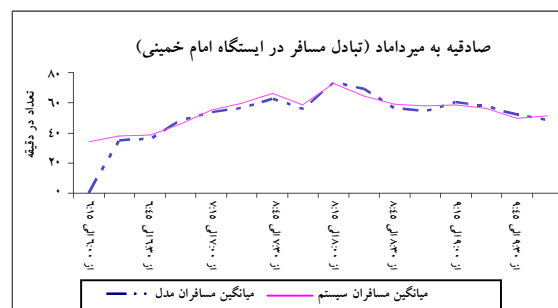
شکل ۵-الف- تبادل مسافران از میراداماد به صادقیه



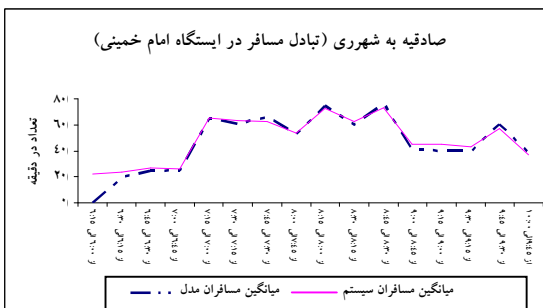
شکل ۵-د- تبادل مسافران از شهری به بهارستان



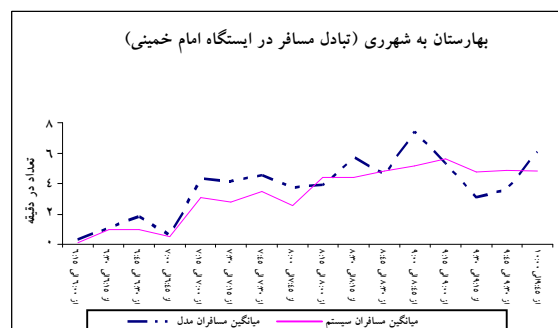
شکل ۵-ج- تبادل مسافران از میراداماد به بهارستان



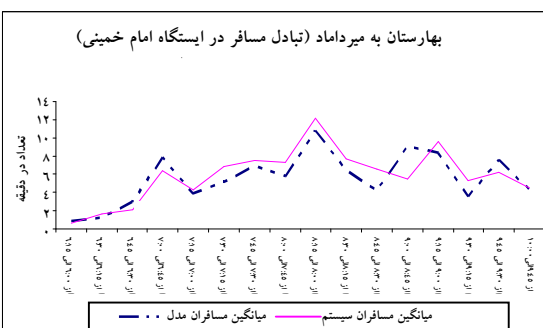
شکل ۵-و- تبادل مسافران از صادقیه به شهری



شکل ۵-ه- تبادل مسافران از صادقیه به میراداماد



شکل ۵-ح- تبادل مسافران از بهارستان به شهری



شکل ۵-ز- تبادل مسافران از بهارستان به میراداماد

شکل ۵- نمودارهای مقایسه‌ای خروجی شبیه‌سازی با داده‌های حاصل از نمونه برداری برای شاخص میانگین تعداد مسافران جابجا شده در تبادلات مختلف ایستگاه امام خمینی

در صورتی که رابطه $|t_0| > t_{\alpha/2, k-1}$ صادق باشد، باید فرض H_0 را رد کرد و نتیجه گرفت که مدل مناسب نیست و در غیر این صورت، فرض H_0 را رد نکرده و نتیجه گرفته می شود که دلیل کافی مبنی بر نامناسب بودن مدل شبیه سازی وجود ندارد. [۱۳] نتایج آزمون اعتبار سنجی مدل در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به یادآوری است آمارورود مسافر مربوط به ساعت ۶:۰۰ الی ۶:۱۵ در کلیه جداول در محاسبه آماره منظور نشده است، زیرا شبیه سازی از ساعت ۶:۰۰ صبح آغاز شده و بنابراین ۱۵ دقیقه اول شبیه سازی به دلیل این که سیستم در حالت ناپایدار^۱ است، برای جلوگیری از خطای عدم تعادل سیستم حذف شده است. در آزمون t با توجه به اینکه مقدار $0/1$ برای سطح معنا دار بودن $(\alpha/2)$ در نظر گرفته شده است و میانگین های مقایسه ای به تعداد ۱۶ رکورد می باشند، با در نظر گرفتن اولین رکورد حذف شده، درجه آزادی آزمون $14 = 15 - 1 = k - 1$ خواهد بود. از سوی دیگر مشاهده شده است که مقدار آماره t_0 در هر ۸ مرحله آزمون همواره از مقدار $t_{\alpha/2, k-1}$ (مقدار جدول: ۱۳۴۵) مندرج در جدول کوچک تر بوده $(|t_0| < t_{\alpha/2, k-1})$ و در سطح معنادار بودن $0/1$ دلیلی برای رد فرض H_0 وجود ندارد و نتیجه گیری می شود که دلیل کافی مبنی بر نامناسب بودن مدل شبیه سازی وجود ندارد. به عبارت دیگر می توان چنین نتیجه گرفت که حداقل انطباق خروجی های مدل شبیه سازی با نمونه برداری انجام شده، با دقت ۹۵٪ است.

در ادامه به چگونگی روند بررسی اعتبار نتایج مدل شبیه سازی پرداخته می شود، اگر k مجموعه از داده های خروجی مربوط به گذشته (نتایج واقعی حاصل از آمارگیری میدانی) همراه با k مشاهده از یکی از متغیرهای پاسخ سیستم مانند Z_j گردآوری شود $(Z_1, \dots, Z_j, \dots, Z_k)$ ، می توان با در اختیار داشتن k مجموعه از داده های ورودی، در مدل شبیه سازی به ازای هر مجموعه از این داده ها یک بار مدل را اجرا کرد و طی k مرتبه اجرا، نتایج $W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jk}$ را که نظیر Z_{ij} ها $(j = 1, 2, \dots, k)$ است به دست آورد. در بسیاری از موارد هر Z_j و W_j خود یک میانگین نمونه است به طوری که بنا بر قضیه حد مرکزی، تفاوت های $d_j = Z_{ij} - W_{ij}$ تقریباً از توزیع نرمال با میانگینی مانند μ_d ، و واریانس σ_d^2 پیروی می کند. به این ترتیب آزمون آماری مناسب، یک آزمون t برای فرض صفر مبتنی بر نبود تفاوت بین میانگین ها در برابر معنادار بودن تفاوتهاست، یعنی:

$$H_0 : \mu_d = 0 \quad (15)$$

$$H_1 : \mu_d \neq 0$$

به بیان دیگر آزمون مناسب، یک آزمون t زوجی است که بر این اساس مقادیر میانگین نمونه تفاوتها d_j $\bar{d} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k d_j$ و واریانس نمونه $s^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (d_j - \bar{d})^2$ محاسبه شده و سپس به ازای $\mu_d = 0$ مقدار عددی آماره $t_0 = \frac{\bar{d} - \mu_d}{S_d / \sqrt{k}}$ را محاسبه کرده و به ازای $k-1$ درجه آزادی و مقدار $0/1$ برای سطح معنادار بودن (α) ، مقدار مندرج در جدول را برای $t_{\alpha/2, k-1}$ تعیین کرد.

جدول ۵. نتایج آزمون اعتبار سنجی مدل شبیه سازی به تفکیک محورهای حرکت خطوط مترو

ردیف	محور	واریانس نمونه	میانگین نمونه	آماره
۱	شهر ری به صادقیه	۸/۱۰	۰/۸۹	۱/۲۰۶
۲	شهر ری به بهارستان	۶۰/۰	۰/۲۵	۱/۲۵۸۷
۳	میرداماد به صادقیه	۴/۳۷	۰/۶۶	۱/۲۱۸۰
۴	میرداماد به بهارستان	۰/۲۵	۰/۱۶	۱/۲۴
۵	صادقیه به شهر ری	۷/۹۱	۰/۸۷	۱/۱۹۹۴
۶	صادقیه به میرداماد	۷/۸۱	۰/۹۷	۱/۳۳۹۳
۷	بهارستان به شهری	۳/۰۳	۰/۴۴	۰/۹۸۹۱
۸	بهارستان به میرداماد	۲/۸۲	۰/۳۹	۰/۸۹۲۱

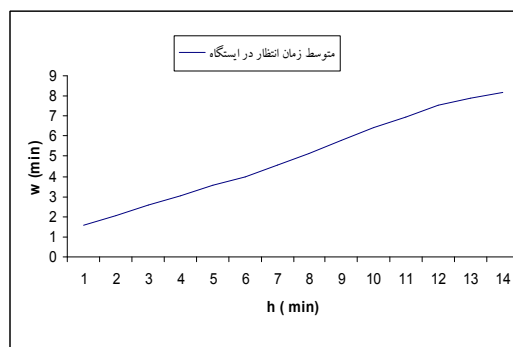
۸. نتیجه‌گیری

با توجه به مدل شبیه‌سازی طراحی شده و انجام کالبراسیون و اعتبارسنجی آن، زمان انتظار مسافران جهت سوار شدن به قطار برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساعت اوج صبحگاهی یک روز عادی میان هفته‌ای (۶ الی ۱۰ صبح) در مترو تهران به شرح جدول ۶ محاسبه شده است.

جدول ۶. نسبت زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌های مترو به سر فاصله زمانی اعزام قطارها در محورهای مختلف متروی تهران بر اساس مدل شبیه‌سازی

محور	نسبت زمان انتظار به هدوی	
	رفت	برگشت
میرداماد - شهر ری	۰/۶۲	۰/۵۷
صادقیه - بهارستان	۰/۶۰	۰/۵۵
تهران - کرج	۰/۵۲	۰/۵۲

با تکرار آزمایش شبیه‌سازی، روند زمان انتظار مسافران متروی تهران با تغییرات سر فاصله زمانی قطارها با فرض ثابت بودن زمان بین اعزام قطارهای خط ۵ (تهران - کرج) به میزان ۱۵ دقیقه، به صورت نمودار شکل ۶ به دست آمد.



شکل ۶. نمودار روند تغییرات زمان انتظار مسافران به تناسب تغییرات سر فاصله زمانی قطارها در خط ۵

رابطه زمان انتظار مسافران متروی تهران W_i (خطوط ۱ و ۲ درون شهری) با زمان بین اعزام قطارها $h_i = 2 - 15$ (min) به شرح جدول ۷ به دست آمد.

جدول ۷. رابطه زمان انتظار مسافران متروی تهران (خطوط درون‌شهری) با زمان بین اعزام قطارها

h_i (min)	رابطه W_i با h_i
۲-۳	$W_i = 0.49h_i + 0.58$
۴-۵	$W_i = 0.48h_i + 0.63$
۶-۷	$W_i = 0.44h_i + 0.9$
۸-۹	$W_i = 0.57h_i - 0.005$
۱۰-۱۱	$W_i = 0.68h_i - 1.03$
۱۲-۱۳	$W_i = 0.57h_i + 0.04$
۱۴-۱۵	$W_i = 0.29h_i + 3.91$

بر این اساس، رابطه ریاضی کلی بین زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها با سر فاصله زمانی اعزام بین قطارها، به طور میانگین برای طول دوره زمانی شبیه‌سازی شده در کل شبکه به شرح رابطه ۱۶ به دست آمد:

$$w_i = 0.6h_i + 1.9 \quad (16)$$

از سوی دیگر با ایجاد تغییر در ورودی‌های شبیه‌سازی از قبیل تعداد امکانات موجود کنترلی در ایستگاه و یا تغییر برنامه زمانبندی حرکت قطارها و بررسی خروجی‌های به دست آمده (میانگین زمان انتظار مسافران در سکو) می‌توان شناخت ارزشمندی درباره مهم‌ترین متغیرها و چگونگی رابطه متقابل آنها به دست آورد و یا برای آزمایش طرح‌های جدید پیش از اجرای آنها، استفاده کرد و آمادگی لازم را برای رو به رو شدن با پیشامدهای ممکن به دست آورد.

به هر حال، تنظیم و اجرای رژیم‌های مختلف بهره برداری با توجه به متغیر بودن وضعیت ورود مسافران به شبکه مترو در طول روز و محدودیت ناوگان و تأسیسات زیر بنایی و لزوم بهره برداری مناسب از امکانات موجود و تنظیم برنامه متغیر سیر و حرکتی متناسب با تغییرات تقاضای سفر، همگی ضرورت استفاده از ابزار توانمندی همچون شبیه‌سازی را دو چندان می‌کند.

9. Chow, W. K. and Ng, Candy, M.Y. (2007) "Waiting time in emergency evacuation of crowded public transport terminals", Safety Science.
۱۰. شانون، رابرت (۱۳۷۳) "علم و هنر شبیه سازی سیستم ها"، تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
۱۱. بنکس، جری و کارسن، جان (۱۳۸۲) "شبیه سازی سیستم های گسسته - پیشامد"، تهران: موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، چاپ سوم.
12. Doo, Kwon (2005) "Systems modeling and simulation: Theory and applications", Baik, Springer.
۱۳. فروند، جان، والبول، رانلد (۱۳۸۰) "آمار ریاضی"، تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
1. Li, Janiuce P. (2001) "Train station passenger flow study", Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, New York.
2. Abkowitz, M., Josef, Tozzi, R. and Driscoll, M. K. (1987) "Operational feasibility of timed transfer in transit systems", Journal of Transportation Engineering, No 113.
3. Bukkapatnam, Satish, Dessouky, Maged and Zhao, Jiamin (2003) "Distributed architecture for real-time coordination in transit networks", METRANS, Department of Industrial and Systems, Eng. University of Southern California, California, Los Angeles.
4. Knoppers, P. and Muller, T.(1995) "Optimized transfer opportunities in public transport", Transportation Science, Vol. 29, No.1.
5. Rudnicki, Ardrzej (2003) "Investigation by computer simulation; some aspect of transportation service reliability in urban public transport", Crakow, University of Technology, Cracow, Poland.
6. Vansteenwegen P. and Oudheusden, D. Van (2007) "Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network", Transportation Research, Part B, 41, pp.478-492.
7. Vansteenwegen P. and Oudheusden, D. Van (2006) "Developing railway time tables which guarantee a better service", European Journal of Operational Research, 137 (1) pp.337-350.
8. Teigen, Karl Harver and Keren, Gideon (2007) "Waiting for the bus: when base-rates refuse to be neglected", Cognition, 103, pp.337-357.

پانویس ها

1- Holding and stop skipping

2- Linear Programming

3- Intercity

4- Metro Simulation Model

۵- مبنای ۳۰ ایستگاه، بر اساس اطلاعات آمارگیری روز سیزدهم آذر ماه سال ۱۳۸۴ متروی تهران است

6- Unstable