Archive of SID

بهینه‌سازی مدل تأخیر مسافران مترو با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چند شاخصه(MADM)

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

در این تحقیق، اقدام به مدل‌سازی ریاضی زمان تأخیر مسافران مترو براساس مدت زمان انتظار آنها در ایستگاه‌ها با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چندشاخصه شد و با روش رگرسیون غیر خطی چند متغیره، مدل بهینه‌سازی آن برای عوامل مؤثر طراحی شد.

بر این اساس، در ابتدا به شناسایی ارتباط منطقی هریک از پارامترها و شاخص‌های تأثیرگذار با شرایط ایستگاه بر مبنای مطالعات موردی در متروی تهران، پرداخته شد و سپس با یافتن رابطه معنی‌دار، درجه وابستگی و میزان اثرگذاری آنها با مقوله زمان تأخیر در ایستگاه‌ها و متوسط زمان انتظار مسافران با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه تعیین شد.

در نهایت، در قالب سناریوهای تصمیم‌گیری مختلف، مدل بهینه‌سازی ریاضی برای تأخیر مسافران در ایستگاه به ازاء کاهش زمان انتظار مسافران به دست آمد.

در نتیجه، ضمن به‌دست آوردن درجه تأثیرگذاری میزان و اهمیت شاخص‌های مورد بررسی، با دقت بیش از ۹۶ درصد، نرخ بهبود تابع هدف یعنی متوسط زمان تأخیر براساس زمان انتظار مسافران در تمام ایستگاه‌ها به ازاء هر واحد بهبود در متغیرهای مورد بررسی شامل شاخص‌های نرخ بهره‌برداری از گیشه‌های فروش و گیت‌های کنترل بلیت، سرفاصله‌های زمانی اعزام قطارهادر خطوط مختلف، ظرفیت هر قطار و همچنین نرخ ورود مسافران به ایستگاه‌ها مشخص شد.

واژه‌های کلیدی: تصمیم‌گیری چند شاخصه، زمان تأخیر، زمان انتظار مسافران، مدل بهینه‌سازی

۱. مقدمه

تعیین زمان تأخیر مسافران قطارهای شهری در ایستگاه جهت بهره‌مندی از خدمات ارائه شده، حائز اهمیت فراوانی است زیرا چنان که این زمان ازحد قابل پذیرش فراتر رود، تأثیر آن احتمالاً موجب خواهد شد که بخشی از متقاضیان، از استفاده این سیستم منصرف شوند. در این میان، با توجه به ویژگی سیستم قطارهای شهری که هماناجابجا کردن‌تعداد زیادی مسافر درمسیرهای طویل و پر ازدحام است، رعایت سرفاصله‌های زمانی اعزام قطارها و حداقل کردن زمان تأخیر مسافران آنها در ایستگاه‌ها و به تناسب آن زمان انتظار مسافران، به ویژه در ایستگاه‌های تقاطعی بین دو یا چند خط، از اهمیت زیادی برخوردار است.

بر این اساس، یکی از عوامل مهم برای جذب مردم به استفاده از امکانات حمل‌ونقل همگانی، کاستن از زمان انتظار مسافران آنها در ایستگاه‌ها است که به این منظور، راهکارهای مختلفی وجود دارد، اما عملی شدن آنها در بعضی موارد، ممکن است در قیاس با هزینه‌های مورد نیاز قابل اجرا نباشد. در راستای سنجش این راهکارها از بعد امکان‌پذیر بودن و به ویژه میزان اثربخشی آنها،

*تاریخ دریافت: ۸۶/۵/۵ - تاریخ پذیرش: ۸۷/۳/۲

www.SID.ir

Archive of SID

می‌توان از مدل‌سازی ریاضی با تحلیل تغییرات شرایط در دنیای مجازی با ابزار شبیه‌سازی رفتار سیستم استفاده کرد که این خود، شامل پارامترهای گوناگون است.

از آنجاکه در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی شهری، کوتاه بودن فواصل اعزام قطارها و نظم سرویس‌دهی و ارائه خدمات طبق برنامه زمان‌بندی اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد، بنابراین فاکتور زمان از اهمیت زیادی برخوردار است تا قطارها با حداقل زمان توقف در ایستگاه‌ها و مسافران با صرف حداقل زمان برای انتظار کشیدن، بتوانند جابجا شوند. این مهم به ویژه برای تبادل بین دو سیستم همگانی از اهمیت دوچندانی برخوردار است. به بیان دیگر، لازم است هماهنگی و تناسب لازم بین نرخ ورود مسافر به سیستم با نرخ سرویس‌گیری از آن برقرار باشد تا از توقف بیش از حد مقرر قطار در ایستگاه به واسطه ازدحام مسافران بر روی سکو جلوگیری شود.

هرچند مدل‌های بهینه‌سازی در قرن اخیر و بخصوص پس از پایان جنگ دوم جهانی همواره مورد توجه ریاضیدانان و دست‌اندرکاران صنعت بوده‌اند، ولی در دهه‌های اخیر توجه محققین معطوف به مدل‌های چندمعیاره[1] برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده شده است که در آنها، به جای استفاده از یک معیار سنجش بهینگی، از چندین معیار سنجش استفاده می‌شود. این مدل‌های تصمیم‌گیری به دو دسته عمده تقسیم می‌گردند: مدل‌های چندهدفه[2] و مدل‌های چندشاخصه، به طوری‌که مدل‌های چندهدفه به منظور طراحی به کار گرفته می‌شوند اما مدل‌های چند شاخصه به منظور انتخاب گزینه برتر استفاده می‌شوند. [۱]

در دهه‌های اخیر روش‌های حل مسائل دارای چندین تابع هدف[3] و چندکاربردی[4]، با رشد قابل توجه، از پیشرفت‌های زیادی برخوردار شده است.مسائل دارای تابع هدف چندبخشی به معنای پیدا کردن مقادیر چند تابع مختلف است که مجموعه آنها یک بردار هدف را تشکیل می‌دهد و مجموعه مقادیر آنها در نقطه هدف، جواب مسأله را بیان می‌کند. در اغلب اوقات مشاهده می‌شود که این توابع هدف دارای تضاد با یکدیگر هستند، یعنی بهینه شدن یکی از آنها به معنای بدتر شدن مقدار دیگری است.[۲]

روش حل معمولی چنین مسائلی نیز همان روش‌های استاندارد بهینه‌سازی است که برای مسائل با تابع هدف واحد اعمال می‌شود. یعنی با تغییر ساختار مساله چندهدفه و تبدیل آن به یک مساله با تابع هدف واحد انجام می‌پذیرد. یک روش معمول برای تغییر دادن این مسائل، اختصاص ضریب به هریک از عناصر بردار هدف و بهینه کردن ترکیب خطی حاصل از آنها به عنوان تابع هدف جدید است. اما محدودیت اساسی که در کاربرد این روش وجود دارد، چگونگی انتخاب این ضرایب برای ساخت مدل است.[۳]

در این تحقیق، با توجه به تولید دسته جواب‌های ممکن و منطقی، برای تعیین میزان تغییرات آنها و تأثیر آنها بر سیستم، از ابزار شبیه‌سازی رایانه‌ای استفاده شد و شاخص‌های مؤثر در تصمیم‌گیری گزینه برتر شامل: "میانگین زمان انتظار مسافران در سکو، گیشه و کنترل بلیت ایستگاه"، "سرعت سفر"، "حجم مسافران جابجا شده"و "ظرفیت خط"، در نظر گرفته شد. سپس با رویکردی یکپارچه به تصمیم‌گیری چندشاخصه، از الگوریتم تاپسیس[5] که بر مبنای استخراج وزن شاخص‌های تصمیم‌گیری و تعیین میزان اثرگذاری هریک از آنها بر تابع هدف عمل می‌کند، استفاده شد و در نهایت، با ایجاد مدل ریاضی به روش تابع برگشتی[6] غیرخطی چهار متغیره درجه سوم و حل آن با کمک نرم‌افزار ریاضی MATLAB، مدل بهینه‌سازی سناریوهای شاخص‌های مؤثر بر زمان تأخیر مسافران در ایستگاه به دست آمد و روند تغییرات زمان انتظار مسافران در کل شبکه ناشی از بهبود هریک از آنها یعنی نرخ بهره‌برداری از گیشه فروش و کنترل بلیت، سرفاصله زمانی اعزام قطارها، ظرفیت قطارها و نرخ ورود مسافران به ایستگاه‌ها حاصل شد.

۲. پیشینه تحقیق

هماهنگی تبادل مسافر، یک مسئله چندهدفی و چندوجهی است که برای مدل‌سازی آن، رویکردهای مختلفی در انتخاب ابزار قوی و مناسب پیش روی برنامه‌ریزان قرار دارد. آنچه که توسط Dhingra & Shrivastava مورد ارزیابی واقع شده است، عبارتند از [٤]:

۱- روش مدل‌سازی ریاضی ماهیتاً دشوار بوده ولی امکان کاربرد برای تمامی شبکه‌ها را با اندازه‌های واقعی دارد.

۲- روش مبتنی بر تجزیه که ماهیتاً روشی غیر استدلالی است، هیچ راهکاری را برای بهینه‌سازی ارائه نمی‌کند.

۳- روش شبیه‌سازی، به عنوان یک ابزار قدرتمند مطرح بوده و صرفاً به مسیرهای موجود و یا شبکه‌های کوچک حمل‌ونقل عمومی محدود می‌شود و فاقد قابلیت بهینه‌سازی است بلکه فقط ابزار تسهیل بررسی موضوعی است.

www.SID.ir

Archive of SID

٤- روش‌های ترسیمی عملکرد متقابل ابتکاری[٧] که می‌توانند به طور بهنگام و لحظه‌ای، عملکرد متقابل بین استفاده‌کننده و وسیله نقلیه را منظور کنند. این روش‌ها به طور تجربی قوانین به دست آمده را برای راهکار بهینه ارائه می‌کنند و از توانمندی‌ها و معلومات انسانی مستقیماً درک شده، استفاده می‌کنند تا بهترین راهکار را بیابند. لیکن این مدل‌ها بستگی به معلومات و تجربیات استفاده‌کننده سازگار با آن دارد و لذا، نتایج حاصله معمولاً خیلی کیفی نیست.

٥- روش‌های فرا ابتکاری[٨] یا هوشمندانه شامل روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی[٩] و روش‌های بهینه‌سازی غیر سنتی از جمله الگوریتم ژنتیک[١٠]، الگوریتم مورچگان[١١] و الگوریتم‌های دوگانه (هایبرید) نظیر فازی- عصبی[١٢]، ژنتیک تجمعی[١٣] و در آخر، روش‌های تحقیق هوش مصنوعی[١٤] که اخیراً کاربرد بیشتری یافته‌اند و Dhingra & Shrivastava نیز در مطالعات خود از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بهره‌گیری کرده است[٤].

بر اساس تحقیقات انجام شده متعدد توسط Osuna and Newell, Heap and Thomas, Welding که در گزارش تحقیقی[٥] Muller& Knoppers ارائه شده است، زمان انتظار پیش‌بینی شده E(W) در ایستگاه‌های حمل‌ونقل همگانی شهری تابعی از سرفاصله زمانی اعزام قطارها (H) و تغییرات آن (واریانس) Var (H) بوده که به شرح رابطه زیر است.

$$E(W) = E(H)/2\left(1 + Var(H)/E^2(H)\right) \qquad (١)$$

Muller& Knoppers همچنین نشان دادند که زمان انتظار مسافران سیستم‌های بین شهری، به تناسب نرخ ورود و سیستم‌های تغذیه‌کننده و نرخ اعزام سیستم اصلی، تغییر می‌کند و متوسط زمان انتظار برای جابجایی مسافران بین دو سیستم E(w) را بر مبنای انتگرال‌گیری از زمان انتظار واقعی مسافران W(p) و احتمالات مربوط به آنها به شرح رابطه (٢) به دست آوردند که در نتیجه مشخص شد که متوسط زمان انتظار، تأثیرپذیر از سرفاصله زمانی اعزام سیستم اصلی (H) و نیز انحراف معیار مسافران ورودی (δ)است[٥].

$$E(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} W(p)p_r(p)d_p \qquad (٢)$$

Bookbinder & Desilets در مطالعات خود به بهینه کردن تبادلات مسافران بین خطوط مختلف اتوبوسرانی در مسیر جابجایی پرداختند تا سطح نارضایتی عمومی حداقل شود و در واقع، شاخص حداقل کردن سطح نارضایتی را به عنوان تابع هدف در زمان‌بندی اعزام سیستم اتوبوسرانی انتخاب کردند[٦].

بر مبنای مطالعات و تحقیقات Bookbinder & Desilet مشخص شد که اصلی‌ترین نتیجه، بهینه کردن زمان انتظار مسافران در نقاط تبادل‌ها (ایستگاه‌های تلاقی) است و چون الزاماً هیچ‌یک از وسایل نقلیه در ایستگاه تبادلی با یکدیگر تلاقی فیزیکی نخواهند داشت، بنابراین نیازی به افزودن زمان همپوشانی برای اطمینان از تلاقی وجود ندارد. بنابراین، تعداد وسایل نقلیه لازم برای سرویس‌دهی در مسیری با یک سرفاصله زمانی مشخص، تحت تأثیر بهینه‌سازی تبادلات واقع نخواهد شد. بر این اساس، برای بهینه‌سازی تبادل‌ها، دو نکته در نظر گرفته شد[٦]:

١- تدوین یک تابع هدف که بیانگر نارضایتی کلی ازتبادل‌ها در شبکه بر اساس جدول زمان‌بندی ارائه شده است و از شاخص زمان انتظار کل بر مبنای فرضیات مشخص[١٥] زمان سفر اتوبوس محاسبه شده است.

٢- ایجاد یک الگوریتم برای یافتن جدول زمان‌بندی که این تابع هدف را کمینه کند که به این منظور، یک سامانه رایانه‌ای برای بهینه‌سازی تبادل ایجاد شد تا زمان انتظار کل را به عنوان تابع هدف بهینه کند. این سامانه، از روش تکرار و بهبود ابتکاری بر اساس جدول زمان‌بندی اولیه استفاده کرده و سپس، زمان‌بندی یک خط را تغییر داده تا جایی که بهترین جواب به دست آمد.

Klemt & Stemme نیز نخستین برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای حل مسئله بهینه‌سازی تبادل ایجاد و یک مدل ابتکاری ارائه کردند که یک خط اتوبوسرانی را در یک لحظه زمان‌بندی و سپس، تمام خطوط را زمان‌بندی می‌کرد [٧].

از سوی دیگر مطالعات نظری انجام شده توسط Hicky [٨] در ایستگاه‌های قطار سبک شهری مبین آن است که هماهنگ کردن برنامه زمان‌بندی، به‌طور مؤثر باعث افزایش قابل توجه جذابیت و بهره‌وری در سیستم حمل‌ونقل همگانی چندوجهی خطی می‌شود و برخی مطالعات نظیر Lee & Schonfeld [٩]، Chien & Chowdhury [١١] و Chowdhury [١٠] تلاش برای بهینه‌سازی هماهنگی برنامه زمان‌بندی برای یک چنین سیستمی را داشته‌اند. به این منظور، Lee & Schonfeld [٩] مدلی را برای تعیین بهینه زمان‌های ذخیره وسایل نقلیه در پایانه‌های تبادلی که چندین مسیر را تحت پوشش خود قرار می‌دهد، بسط و توسعه دادند که نرخ ورودی وسایل نقلیه به‌طور اتفاقی[١٦] فرض شد

www.SID.ir

Archive of SID

تا تابع هدف هزینه- تبادل هماهنگ، فرموله شود. سپس نتایج عددی برای هر دو توزیع‌های Empirical و Gamble زمان‌های ورود وسایل نقلیه به دست آمد و مشخص شد که انحراف استاندارد زمان‌های ورود وسایل نقلیه، یک عامل مهم است که بر دوره‌های زمانی ذخیره شده، تأثیرگذار است. در ادامه، Chien & Chowdhury [۱۱] مدلی را برای هماهنگ کردن یک سیستم حمل‌ونقل همگانی چندوجهی ایجاد کردند که توزیع زمان‌های ورود اتوبوس‌ها (سیستم تغذیه‌کننده) به‌طور نرمال معرفی شده بود و بر اساس آن مشخص شد که چنان که سرفاصله زمانی اعزام وسایل‌نقلیه (قطار-اتوبوس) بزرگ باشد، ایجاد یک سیستم هماهنگ بسیار مرجح است.

در مطالعات Vansteenwegen & Van Oudheusden [۱۲] که با هدف کاهش زمان انتظار مسافران در سامانه حمل‌ونقل ریلی برون شهری انجام شد، اقدام به کمینه کردن تابع تأخیر شامل پارامترهای زمان سفر در شبکه، انواع زمانهای انتظار مسافران اعم از در مسیر و در ایستگاه و تأخیر در اعزام و ورود قطارها به ایستگاه شد. به این منظور، با برداشت‌های آماری از توزیع تأخیر در شبکه ریلی و حجم مسافران، شاخص انواع زمانهای انتظار وزن‌دهی شد و سپس، به روش برنامه‌ریزی خطی پیوسته[۱۷] جدول زمانبندی حرکت قطارها بهینه‌سازی شد. همچنین به جهت امکان اعمال تغییرات در شاخص‌ها و مشاهده وضعیت بهینه‌سازی در دنیای مجازی، از ابزار شبیه‌سازی استفاده شد و به این ترتیب، بهبود ٤٠ درصدی در جدول زمانبندی اعزام و حرکت قطارها به واسطه بهبود و مناسب‌سازی زمانهای تبادل مسافران در ایستگاه‌ها و کاهش تأخیر و زمان انتظار به دست آمد.

برای شبکه قطارهای مسافری برون شهری در مقیاس‌های کوچک نظیر قطارهای محلی نیز که با تأخیر در زمانبندی ورود به ایستگاه مقصد مواجه بوده‌اند، مطالعات مشابهی توسط Vansteenwegen & Van Oudheusden [۱۳] انجام پذیرفت که از تکنیک مدل‌سازی ریاضی با وزن‌دهی و تعیین اهمیت شاخص‌های مؤثر در کاهش تأخیر ورود قطارها به ایستگاه با هدف بهبود وضعیت خدمات‌دهی و ارتقاء رضایتمندی مسافران استفاده شد و منجر به ارائه جداول بهینه زمانبندی شد.

در تحقیقات دیگری که توسط Teigen & Keren [١٤] در زمینه زمان انتظار مسافران اتوبوسرانی انجام شد، از روش برآورد تابع احتمال تأخیر استفاده شد که در آن، با انتخاب یک وضعیت پایه براساس شرایط موجود زمانبندی اعزام و ورود اتوبوس‌ها به ایستگاه، عوامل مؤثر بر تغییرات برنامه و به‌وجود آمدن تأخیرات بر مبنای تئوری بایاس[۱۸] تحلیل شد و دو سناریوی[۱۹] H_1 (یعنی اتوبوس هم اکنون اعزام شده است) و H_2 (یعنی اتوبوس به ایستگاه وارد خواهد شد) برای وضعیت زمان انتظار مسافران در قبل و بعد به شرح زیر مدل‌سازی شد:

(۳)

$$[P(H2 \mid data) / P(H1 \mid data) = P(H2) / P(H1) * P(data \mid H2) / P(data \mid H1)]$$

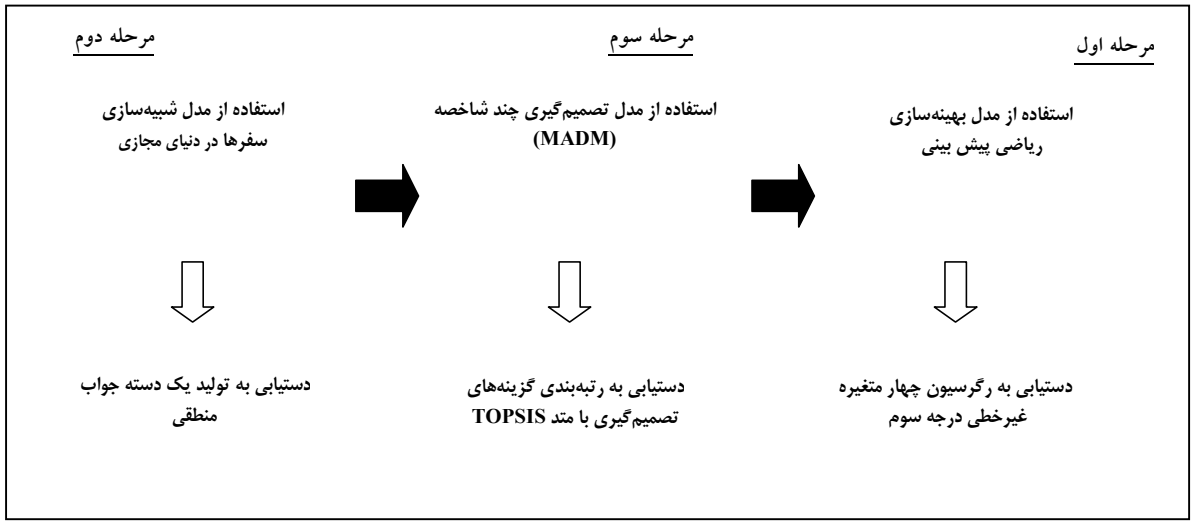
مطالعات انجام شده توسط Assis & Milani [۱۵] با موضوع بهینه‌سازی زمانبندی خطوط مترو با استفاده از مدل پیش‌بینی نیز ارائه کننده یک متدولوژی محاسباتی برای بهینه‌سازی جداول زمانبندی خطوط مترو بر مبنای مدل ریاضی پیش‌بینی با تکنیک برنامه‌ریزی خطی بود که در طی آن، مدل حرکت قطارهای مترو با توجه به معادلات دینامیکی و براساس ارزیابی‌های سرفاصله زمانی اعزام قطارها و حجم مسافران در طول مسیر، به تناسب تغییرات تقاضای مسافران در طول زمان سرویس‌دهی به دست آمد. در این تکنیک، شاخص اطمینان سفر مسافران[۲۰] بر مبنای مجموع پارامترهای وزن‌دهی شده هر یک از متغیرهای مؤثر در تابع به صورت مستقیم یا غیر مستقیم، در مدل برنامه‌ریزی خطی شامل زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها، راحتی مسافران سوار شده در قطارها، طول زمان سفر قطار و تعداد قطارهای در سرویس به دست آمد.

۳. روش تحقیق

رویکرد طراحی مدل بهینه‌سازی تأخیر مسافران قطارهای شهری براساس مدل‌سازی زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها استوار بوده که از تلفیق «مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد با فرآیند تصادفی ورود مسافران» با «مدل بهینه‌سازی تصمیم‌گیری چند شاخصه» حاصل شد و در نهایت با استفاده از «متد رگرسیون غیرخطی چند متغیره»، مدل ریاضی بهینه‌سازی طراحی شد تا به‌واسطه آن، ترکیب مدل‌های مذکور سبب هم‌پوشانی ضعف‌های یکدیگر شده و ابزار قدرت‌مندی جهت دستیابی به سناریوهای بهینه فراهم آید. کلیات متدولوژی مدل تلفیقی مزبور به شرح شکل ۱ ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. کلیات متدولوژی مدل‌سازی تحقیق

با هدف تشریح دقیق‌تر و جزئی‌تر متدولوژی بیان شده، فرآیند گردش منطقی انتخاب شاخص‌ها، طرح مدل، دستاوردها و نتایج سیستم مورد نظر و تجسمی کلی از چارچوب تحقیق مورد اشاره در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است.

٤. طراحی و تدوین مدل بهینه‌سازی

در مدل مورد مطالعه، با انتخاب محیط مطالعات موردی در شبکه متروی تهران، مسافران از لحظه ورود به ایستگاه مورد بررسی و کنترل قرار گرفته‌اند. به این ترتیب مرز سیستم از مدخل ورودی ایستگاه شروع شده و تمام خطوط و ایستگاه‌های شبکه متروی تهران شامل خطوط ۱و۲ شهری و ۵ حومه شهری و بالغ بر ۳۰ ایستگاه را شامل شده است.

گردش مسافران در ایستگاه برای استفاده از ابزار شبیه‌سازی مجازی به این ترتیب در نظر گرفته شد که چنان که مسافر ورودی فاقد بلیت باشد، به گیشه فروش بلیت مراجعه کرده و به ترتیب ورود[۲۱] در صف قرار می‌گیرد. اما اگر دارای کارت اعتباری باشد، مستقیماً به گیت‌های کنترل بلیت مراجعه می‌کند. پس از عبور مسافران از گیت‌های کنترلی و با توجه به مقصد سفر، مسیر و راهروی مربوطه تعیین شده و به سمت سکوی مورد نظر هدایت می‌شوند. سپس، مسافران وارد سکو شده و تا زمان رسیدن قطار و احتمالاً تخلیه بخشی از مسافران درون قطار، مسافران در سکو در انتظار به سر می‌برند. از آنجا که شکل قرارگیری سکو در امتداد طول قطار بوده و واگن‌های قطار درب‌های متعددی دارند، بنابراین نحوه ورود مسافران به قطار به ترتیب تصادفی[۲۲] در نظر گرفته شده است.

ورود مسافران از روی سکو به داخل قطار (فرآیند سوار شدن)، در هنگام توقف در ایستگاه با توجه به ظرفیت ممکن داخل قطار بوده و در صورتی که تعداد مسافران منتظر در سکو بیشتر از ظرفیت بالقوه قطار باشد، تعداد مازاد مسافران در ایستگاه باقی می‌مانند تا ناگزیر و در صورت امکان با قطار بعدی سفر کنند (مسافران جامانده از قطار). مسافران پیاده شده از قطار نیز که به مقصد خود رسیده‌اند، با استفاده از راهروها و دسترسی‌ها به طرف خروجی حرکت می‌کنند.

در صورتی که ایستگاه مترو تقاطعی باشد (مانند ایستگاه امام‌خمینی مترو تهران)، علاوه بر مسافران ورودی از خیابان به ایستگاه، تعدادی از مسافران با توجه به مقصد سفر با تعویض قطار و محور حرکتی خود وارد سکوهای ایستگاه متقاطع می‌شوند که تعیین سکوی مورد نظر با توجه به اطلاعات ماتریس سفرهای مبدأ- مقصد مسافران (ورودی مدل) مشخص می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

شاخص‌های مؤثر بر زمان تأخیر مسافران قطارهای شهری در ایستگاه‌ها		
نرخ تردد و درصد توزیع مسافران	زمان های تردد پیاده مسافران در ایستگاه	اطلاعات قطار
- نرخ ورود مسافران به تفکیک (دارای بلیت، بدون بلیت و دارای کارت اعتباری) - نرخ خدمات‌دهی گیشه فروش بلیت - نرخ عبور مسافران از گیت‌های کنترلی - درصد توزیع مسافران در شبکه	- از ورودی ایستگاه تا گیت فروش بلیت - ازگیت فروش بلیت تا گیت کنترل - از ورودی ایستگاه تا گیت کنترل بلیت (مستقیم) - از گیت کنترل بلیت تا سکوی سوار شدن قطار - از سکو تا گیت کنترل خروجی - از سکو به سکو در ایستگاه‌های تقاطعی	- سرفاصله زمانی اعزام قطارها - نرخ پذیرش مسافر با توجه به ظرفیت واگنهای قطار - نرخ خروج مسافر از قطار در داخل ایستگاه - سرعت سیر قطارها و زمان پیمودن فاصله بین دو ایستگاه - ساعت اعزام اولین و آخرین قطار

طراحی مدل شبیه‌سازی سفرهای مسافران مترو با در نظر گرفتن اهداف و محدودیتهای سیستم

سناریوسازی حاصل از تکرار اجراهای شبیه‌سازی جهت استفاده در الگوریتم تصمیم‌گیری چند شاخصه (متد تاپسیس)

متغیرهای طراحی جهت ساخت سناریوها	شاخص‌های تصمیم‌گیری جهت انتخاب گزینه برتر
۱- ضریب بهره برداری ۲- سرفاصله زمانی اعزام قطارها به تفکیک خطوط ۳- ظرفیت قطارها ٤- نرخ ورود مسافران بر ساعات مختلف به ایستگاه	۱- حداقل کردن میانگین زمان انتظار مسافران در سکو ۲- حداقل کردن میانگین زمان انتظار مسافران در سالن فروش بلیت ۳- حداکثر کردن میانگین سرعت متوسط سفر در شبکه ٤- حداکثر کردن حجم مسافران جابجا شده در شبکه

طراحی مدل ریاضی شاخص‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی زمان تأخیر مسافران در ایستگاه‌ها بر مبنای حداقل کردن زمان انتظار مسافران با روش رگرسیون غیر خطی چهارمتغیره درجه سوم و حداقل کردن مجذور مربعات خطا

آنالیز حساسیت و ارزیابی روابط ریاضی در حالت‌های مختلف		
حالت	شاخص متغیر	شاخص خروجی
۱	نرخ بهره‌برداری گیشه و کنترل بلیت (درصد)	متوسط زمان انتظار مسافران در تیکت هال (دقیقه)
۲	سر فاصله زمانی اعزام قطارهای خط ۱ و ۲ (دقیقه)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)
۳	سر فاصله زمانی اعزام قطارهای خط حومه‌ای ۵ (دقیقه)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)
٤	ظرفیت قطار (نفر)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)
۵	نرخ ورود مسافران به ایستگاه (درصد)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)

شکل ۲. فرآیند طراحی مدل ریاضی بهینه‌سازی تأخیر مسافران قطارها بر مبنای حداقل کردن زمان انتظار مسافران در ایستگاه

www.SID.ir

Archive of SID

برای تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، شاخصهای ورودی شامل سر فاصله‌های زمانی اعزام قطارها در خطوط مختلف(hi) و نرخ بهره‌برداری از قطار (ρ) در حوزه قابل قبول به شرح شکل ۳ در ماتریس M_{input} مقداردهی شد:

	ρ	h_1	h_2	h_5
A1	٪۵۰	۲	۲	۵
A2	٪۵۰	۲	۲	٦
A3	٪۵۰	۲	۲	۷
.	.	.	.	.
$\mathbf{M_{input}}$=	.	.	.	.
	.	.	.	.
	.	.	.	.
A3025	۱	٦	٦	۱۵

شکل ۳. مقداردهی ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس شاخص‌های ورودی M_{input}

سپس با ۳۰۲۵ مرتبه تکرار سناریوی شبیه‌سازی ماتریس (۵ × ۳۰۲۵)، ماتریس خروجی یا M_{OUTPUT} تشکیل شد که هر ردیف ماتریس مذکور بیانگر یک رژیم بهره‌برداری در زمان‌بندی و اعزام قطارها و تحمیل‌کننده یک میانگین زمان انتظار برای مسافران است.

در ماتریس مذکور، شاخص‌های خروجی که مبنای مدل تصمیم‌گیری هستند، عبارتند از :۱- میانگین زمان انتظار مسافران در سکو [۲۳] بر حسب دقیقه ۲- میانگین زمان انتظار مسافران در سالن فروش بلیت[۲٤] بر حسب دقیقه ۳- میانگین سرعت مسافران[۲۵] بر حسب کیلومتر در ساعت ٤- حجم کلی مسافران جابجا شده[۲٦] بر حسب نفر که در شکل ٤، نمونه ماتریس خروجی به همراه شاخص‌های مربوط ارائه شده است.

٤-۱ انجام مراحل تاپسیس

بر اساس ماتریس تصمیم‌گیری، گام‌های متد تاپسیس برای تعیین روش سلسله مراتبی اولویت‌بندی شاخص‌های مؤثر و مناسب به ترتیب زیر طی شد.

گام اول: بدون بعد کردن معیارهای تصمیم‌گیری

گام دوم: وزن‌دهی معیارهای تصمیم‌گیری

با استفاده از تکنیک آنتروپی مقادیر وزن شاخص‌ها به شرح جدول۱ به دست آمد.

X_1 و X_2 به ترتیب متوسط زمان انتظار مسافران بر روی سکو و سالن فروش بلیت بوده که باید حداقل شود و X_3 و X_4 به ترتیب میانگین سرعت سفر و حجم مسافران جابجا شده در شبکه بوده که باید حداکثر شود. در نتیجه، ماتریس شاخص‌های خروجی بر اساس وزن هر شاخص، یعنی $M_V = N_{M_{output}} \cdot \dot{W}$ حاصل شد .

	M.W.T-Platform	**M.W.T- Tickethall**	**Travelspeed**	**PassengerContent**
A1	۱/۷۹۲۷٤۱	۳۰/۳۱٤۲۱	۳۲/۵۱٦٤۲	۳۰۱۷۳٦
A2	۱/۹۲۳٤۰٦	۳۰/۳۱٤۲۱	۳۲/۵٤۵۹٦	۳۰۱۷۲۷
A3	۲/۰۷۱۲۱۲	۳۰/۳۱٤۲۱	۳۲/٤۵۸٦۹	۳۰۱۷۱۸
$\mathbf{M_{output}}$=	.	.	.	.
	.	.	.	.
	.	.	.	.
A3025	٤/۳۲٤۰۹۷	۰	۳٤/٤۷۳۸۸	۳۳٤۳۳٦

شکل ٤. ماتریس خروجی به همراه مقادیر مربوط به شاخص‌های خروجی مدل M_{output}

جدول ۱. مقادیر وزنی شاخص‌های پارامترهای خروجی بر اساس تکنیک آنتروپی

	X_1	X_2	X_3	X_4
E_J	۰/۲۷۱۱	۰/۱۹٦۸	۰/۲۷٤۹	۰/۲۷٤۷
$d_j = 1 - E_j$	۰/۷۲۸۸	۰/۸۰۳۱	۰/۷۲۵۱	۰/۷۲۵۳
w_j	۰/۲٤٤۳	۰/۲٦۹۳	۰/۲٤۳۱	۰/۲٤۳۳

www.SID.ir

Archive of SID

گام سوم: تعیین مقادیر ایده‌آل و ضد ایده‌آل

برای کمینه کردن ۲ شاخص نخست و بیشینه کردن دو شاخص بعدی، کرانه حداکثر مقادیر پاسخ مطلوب (مقادیر ایده‌آل) و کرانه کمینه مقادیر شاخص‌ها (مقادیر ضد ایده‌آل) به ترتیب طبق روابط ٤ و ٥ محاسبه شد.

(٤)

A+ = { min X1 , min X2 , max X3 , max X4 }

A+ = {۰/۰۰٤۱۸۹ , ۰ , ۰,۰۰۱۹۳۲ , ۰,۰۰۳۷۹۳}

(٥)

A- = { max X1 , max X2 , min X3 , min X4 }

A- = {۰,۰۱۰۱۰٤ , ۰,۰۱۰٥٤۹ , ۰,۰۰۱۷٦۱ , ۰,۰۰۳٤۱٦}

گام چهارم: محاسبه فواصل گزینه‌ها از نقطه ایده‌آل و ضد ایده‌آل

ماتریس (۲ × ۳۰۲٥) M_D که ستون اول معرف مجموع قدر مطلق فواصل گزینه‌ها از بردار ایده‌آل و اعداد ستون دوم نمایانگر فاصله گزینه‌ها از بردار ضد ایده‌آل است، به شرح شکل ٥ حاصل شد.

	D_{i^+}	D_{i^-}
A1	۰/۰۱۰٥٥٦	۰/۰۰٥۹۱٥
A2	۰/۰۱۰٥٦	۰/۰۰٥٦۱
A3	۰/۰۱۰٥۷٦	۰/۰۰٥۲٥٦
A4	۰/۰۱۰٥۹۸	۰/۰۰٤۹۹٤
	.	.
MD=	.	.
	.	.
A3024	۰/۰۰٥۳٤۱	۰/۰۱۰٥۷
A3025	۰/۰۰٥٥۸۸	۰/۰۱۰٥٦۲

شکل ٥. ماتریس M_D پس از محاسبه فواصل گزینه‌ها از بردارهای ایده‌آل D_{i^+} و ضد ایده‌آل D_{i^-}

گام پنجم: محاسبه نزدیکی نسبی به ایده‌آل و دوری نسبی از ضد ایده‌آل

گزینه‌ای که بزرگ‌ترین مقدار نزدیکی نسبی به مقادیر ایده‌آل داشته باشد، بهترین گزینه ممکن در فضای جواب است و سایر گزینه‌ها به ترتیب نزولی در ماتریس M_{Results} تنظیم شدند و به این ترتیب اولویت‌بندی پاسخ‌ها در فضای جواب برای شاخص‌های تصمیم‌گیری حاصل شد.

٤-۲ طراحی مدل ریاضی بهینه‌سازی

با هدف بهینه‌سازی پاسخ‌ها در فضای جواب، اقدام به طراحی و تحلیل رابطه ریاضی بین مقادیر زمان انتظار مسافران در سکو با مقادیر متغیرهای نرخ ورودی مسافران، نرخ بهره‌برداری از گیشه فروش و کنترل بلیت و زمان‌های بین اعزام قطارها با استفاده از متد رگرسیون چهارمتغیره درجه سوم و حداقل کردن مجذور مربعات خطا شد.

بر این اساس، ماتریس‌های ورودی و خروجی $M_{\frac{in}{out}}$ با استفاده از ابزار شبیه‌سازی در سه سناریوی ذکر شده مقداردهی و محاسبه شده‌اند. از آنجا که به ازای هر مجموعه بردار ورودی $\overrightarrow{V_{input}}=(x_0, y_0, z_0, t_0)$ متناظراً مقداری معادل $\widehat{f_0}$ به دست می‌آید که باید برای آن معادله یک منحنی را استخراج کرد تا از نزدیک ترین نقاط مذکور عبور کند، بنابراین چهار متغیر ورودی شامل ضریب بهره‌برداری از گیشه فروش و کنترل بلیت (ρ)و زمان‌های اعزام قطارها در خطوط ۱، ۲ و ٥ (h_1, h_2, h_5) به ترتیب x, y, z, t و متناظر با آن متغیر خروجی «میانگین زمان انتظار مسافران» برای سوار شدن قطار $\widehat{f}$ نام‌گذاری شد و برای حل آن، تقریب درجه سوم به جای درجه چهارم (چهار متغیر) با توجه به خوش‌رفتار بودن منحنی و جلوگیری از رشد بی‌اندازه معادلات مورد توجه قرار گرفت. فرآیند طراحی معادله مزبور و روش حل آن، به ترتیب گام‌های زیر است:

گام اول: محاسبه ترکیب کلی معادله چهارمتغیره درجه سوم

ترکیب خطی کلی معادله چهارمتغیره درجه سوم دارای ٣٤ جزء متغیر و یک مقدار ثابت به شرح رابطه ریاضی ٦ است:

$$f(x, y, z, t) = \quad (٦)$$

$$\sum_{i=1}^{3}\left(a_i x^i + b_i . y^i + c_i . z^i + d_i . t^i\right) \longrightarrow \text{ترمهای متجانس}$$

$$+\sum_{i=1}^{4} e_i\left({}_4\mathrm{P}_{3(x,y,z,t)}\right)$$

$$+\sum_{i=5}^{7} e_i\left({}_4\mathrm{P}_{2(x^2),(y,z,t)}\right)$$

$$+\sum_{i=8}^{10} e_i\left({}_4\mathrm{P}_{2(y^2),(x,z,t)}\right) \longrightarrow \text{ترمهای درجه سوم}$$

$$+\sum_{i=11}^{13} e_i\left({}_4\mathrm{P}_{2(z^2),(x,y,t)}\right)$$

$$+\sum_{i=14}^{16} e_i\left({}_4\mathrm{P}_{2(t^2),(x,y,z)}\right)$$

$$+\sum_{i=1}^{6} f_i\left({}_4\mathrm{P}_{2(x,y,z,t)}\right) \longrightarrow \text{ترمهای درجه دوم}$$

$$+g \longrightarrow \text{مقدار ثابت}$$

www.SID.ir

Archive of SID

گام دوم: محاسبه تابع خطا

تابع خطا عبارت از مجموع تفاضل مربعات مقادیر پیش‌بینی از مقادیر واقعی (مجموع مربعات خطا) است که با رابطه ریاضی ۷ محاسبه می‌شود.

$$Error = \sum_{i=0}^{n}\left[f(x_i, y_i, z_i, t_i) - \hat{f}_i \right]^2 \qquad (۷)$$

با توجه به معلوم بودن مقادیر x_0, y_0, z_0, t_0 ، مقدار خطا تابعی از ضرائب معادلات به شرح زیر است.

(۸)

$$Error = f(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, ..., g)$$

گام سوم: محاسبه گرادیان تابع خطا

با هدف حداقل کردن تابع خطا، مشتق نسبی تابع خطا را مساوی صفر قرارداده و در این صورت ۳۵ مرتبه مشتق نسبت به ضرائب معادله گرفته شده و مساوی صفر قرار داده شد. بر این اساس، نتایج عملیات طبق رابطه ریاضی ۹ ارائه شد.

(۹)

$$\frac{\partial Error}{\partial a_3} = 0$$

$$\frac{\partial Error}{\partial a_2} = 0$$

$$\nabla Error = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\partial Error}{\partial g} = 0$$

$$\frac{\partial Error}{\partial a_3} = \sum_{i=0}^{n} x_i^3 \left[\left(a_3 . x_i^3 + a_2 . x_i^2 + ... + g \right) - \hat{f}_i \right] = 0 \Rightarrow$$

$$a_3 . \sum_{i=0}^{n} x_i^6 + a_2 . \sum_{i=0}^{n} x_i^5 + ... + b_3 . \sum_{i=0}^{n} x_i^3 . y_i^3 + ... + g \sum_{i=0}^{n} x_i^3 = \sum_{i=0}^{n} x_i^3 . \hat{f}_i$$

به این ترتیب و به طور مشابه، سایر معادلات (۳۵ معادله) نیز محاسبه شد.

گام چهارم: حل دستگاه ۳۵ معادله ۳۵ مجهول

با توجه به تابع هدف که دارای ۳۵ مجهول بوده و به شکل یک معادله چهار متغیره درجه سوم است، بایستی نسبت به حل آن و یافتن پاسخ اقدام کرد که با استفاده از برنامه‌نویسی ریاضی در محیط نرم‌افزار Matlab این دستگاه ۳۵ معادله و ۳۵ مجهول به شرح ماتریس شکل ٦ محاسبه شد.

$\sum_{i=0}^{n} x_i^6$	$\sum_{i=0}^{n} x_i^5$	$\sum_{i}^{n} x_i^3 . y_i^3$	$\sum_{i=0}^{n} x_i^3$	a_3	$\sum_{i=0}^{n} x_i^3 \hat{f}_i$
.	.	.	.	a_2	.
.	.	a_1	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	b_3	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	g	.

شکل ٦. ماتریس معادله ریاضی چهارمتغیر درجه سوم با ۳۵ مجهول

۵. اجرای مدل

به منظور انجام مطالعات موردی برای به دست آوردن آمار واقعی و استفاده از آنها در طراحی مدل، عملیات میدانی جهت برداشت آمار مسافران شامل تعیین حجم جابجایی، نرخ ورود مسافران و نیز الگوی ماتریس مبدأ- مقصد سفرهای مترو، در روز سیزدهم آذر ماه ۱۳۸٤ به مدت ۱۸ ساعت در تمامی خطوط و ایستگاه‌های فعال متروی تهران انجام شد و در بازه زمانی از ساعت ٦ الی ۱۰ صبح در سطح تمامی ایستگاه‌ها و خطوط مدل‌سازی شد.

سپس برای تولید ماتریس‌های تصمیم‌گیری، سناریوهای زمان‌بندی حرکت قطار و خدمات گیری در گیشه‌های فروش بلیت تعریف شد که بر این اساس، بردار اطلاعات ورودی در سه سناریو تنظیم و شبیه‌سازی شد که به شرح زیرند:

۱- سناریوی نخست: نرخ بهره‌برداری گیشه فروش و گیت کنترل بلیت به همراه زمان‌های اعزام بین قطارها در خطوط ۱، ۲ و ۵ تماماً متغیر انتخاب شده‌اند.

۲- سناریوی دوم: زمان اعزام بین قطارها در خط ۵ ثابت فرض شده و در عوض ظرفیت تمام قطارها متغیردر نظر گرفته‌شده است.

۳- سناریوی سوم: نرخ ورود مسافر متغیر فرض شده و برای آن روند افزایشی با گام‌های ۱۰٪، درنظر گرفته شد.

در ادامه، تولید سناریوهای تصمیم‌گیری با تکرار دفعات شبیه‌سازی و تغییر متغیرهای طراحی ورودی در حوزه قابل‌قبول حاصل شد و بردار ورودی متغیر، تابعی از نرخ بهره‌برداری گیشه و کنترل بلیت و زمان‌های اعزام بین قطارها تعریف شد.

www.SID.ir

Archive of SID

مهم‌ترین شاخص‌های خروجی (X_j) نیز که معیارهای کمی مدل تصمیم‌گیری را تشکیل می‌دهند، به شرح زیر تعریف شدند:

۱- میانگین زمان انتظار مسافران در سکو

۲- میانگین زمان انتظار مسافران در راهروی فروش بلیت

۳- میانگین سرعت سفر مسافران

٤- حجم مسافران جابجا شده.

۵-۱ حل مدل ریاضی برای سناریوی اول

نتایج رتبه‌بندی بر اساس روند نزولی متد تاپسیس برای تابع $\widehat{f} = f(\rho, h_1, h_2, h_5)$ که در آن ρ ضریب بهره‌برداری و h_5,h_2,h_1 به ترتیب سرفاصله‌های زمانی اعزام قطارهاست، در ماتریس شکل ۷ ارائه شده است.

مدل ریاضی به روش رگرسیون چهار متغیره درجه سوم، با استفاده از نرم‌افزار تخصصی MATLAB کد شده و پس از اجرای برنامه مذکور با دقت 10^{-4} مجموعه ضرائب معادله ۳۵ ترمی درجه چهارم برای رابطه ریاضی بین مقادیر زمان انتظار مسافران در سکو با مقادیر متغیرهای ورودی نرخ بهره‌برداری گیشه و کنترل بلیت (ρ) و زمان‌های اعزام بین قطارها (h_5,h_2,h_1) شبکه مترو تهران پس از ساده‌سازی به شرح رابطه ریاضی ۱۰ به دست آمد.

(۱۰)

$$\begin{aligned}&-.0051\rho^3+0.0104\rho^2+0.0121\rho-0.0011h_1^3+0.0127h_1^2+0.1159h_1\\&-0.0015h_2^3+0.0165h_2^2+0.0843h_2+0.0001h_5^3-0.0032h_5^2+0.1606h_5\\&+0.0002\rho^2.h_1-0.0004\rho^2.h_2+0.0004\rho^2.h_5+0.0002h_1^2.\rho-0.0003h_1^2.h_2\\&+0.0001h_5^2.\rho-0.0001h_5^2.h_2-0.0023\rho.h_1+0.0003\rho.h_2-0.0035\rho.h_5\\&+0.0018h_1.h_2+0.0009h_2.h_5+0.5471=\hat{f}\end{aligned}$$

۵-۲ حل مدل ریاضی برای سناریوی دوم

برای سناریوی دوم نیز بر اساس گام‌های یکم تا پنجم الگوریتم عمل کرده، تابع $\hat{f} = f(\rho, h_1, h_2, c_{line})$ که در آن ρ ضریب بهره‌برداری و h_1 و h_2 سرفاصله‌های زمانی اعزام قطارهای خط ۱ و ۲ و c_{line} ظرفیت قطارها است، به شرح ماتریس شکل ۸ ارائه شده است.

	ρ	h_1	h_2	h_3	CL_{i^+}
Rank1	٪۱۰۰	۲	۲	۵	۰/۹۹۹٤۳۹
Rank2	٪۹۵	۲	۲	۵	۰/۰۹۷۸۸۹۳
Rank3	٪۱۰۰	۲	۲	٦	۰/۰۹۷۵۲۰۲
Rank4	٪۱۰۰	۲	۳	۵	۰/۹۷۱۵٤۲
	.	.	.	.	.
$M_{results}$=	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.
Rank3025	٪۵۰	٦	٦	۱۵	۰/۰۰۱۱٦٦

شکل ۷. ماتریس رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها در فضای جواب برای سناریوی نخست

	ρ	h_1	h_2	C_{line}	CL_{i^+}
Rank1	٪۱۰۰	۲	۲	۱٤۰۰-۱۷۰۰	۰/۹۹۹٦۵۳۱۱۹
Rank2	٪۱۰۰	۲	۲	۱۵۰۰-۱۸۰۰	۰/۹۹۹٦۵۳۱۱۹
Rank3	٪۱۰۰	۲	۲	۱٦۰۰-۱۹۰۰	۰/۹۹۹٦۵۳۱۱۹
Rank4	٪۱۰۰	۲	۳	۱۷۰۰-۲۰۰۰	۰/۹۹۹٦۵۳۱۱۹
	.	.	.	.	.
$M_{results}$=	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.
Rank1925	٪۵۰	٦	٦	۲۰۰۰-۲۳۰۰	۰/۲۱۵۸۷۵۳۲۹

شکل۸. ماتریس رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها در فضای جواب برای سناریوی دوم

www.SID.ir

Archive of SID

$$
\begin{aligned}
&-2.087.\rho^3+1.2867.\rho^2+0.9475.\rho-0.2534.h_1^3+3.4393.h_1^2-0.0367.h_1\\
&+0.0055.h_2^3+0.0078.h_2^2+0.2875.h_2+0.0029.c_{line}^3-0.0335.c_{line}^2+0.2665.c_{line}\\
&+5.324.\rho^2.h_1+0.7687.\rho^2.h_2+0.0023.\rho^2.c_{line}-1.0585.\rho.h_1.h_2-0.0025.\rho.h_1.c_{line}\\
&-0.1035.h_2^2.\rho+0.084.h_2^2.h_1-0.0003.h_2^2.c_{line}-3.348.h_1^2.\rho+0.397.h_1^2.h_2+0.001.h_1^2.c_{line}\\
&-4.6989.\rho.h_1-0.3879.\rho.h_2-0.0024.\rho.c_{line}-0.0002.c_{line}^2.\rho+0.0002.c_{line}^2.h_1\\
&0.134.h_1.h_2+0.0002.h_1.c_{line}+0.0014.h_2.c_{line}+0.5155=\hat{f}
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

با توجه به این که ظرفیت قطار (c_{line}) در هر سناریو برای خطوط ۱، ۲ و ۵ جداگانه تعریف می‌شود، بنابراین در معادله رگرسیون جهت قابل محاسبه کردن بردار ورودی ظرفیت قطار، کمترین ظرفیت (یعنی ۱٤۰۰ و۱۷۰۰ نفر) را معادل عدد یک قرار داده و با توجه به نرخ افزایشی ظرفیت، عدد مذکور نیز با همان نرخ افزایش می‌یابد. رابطه ریاضی حاصل از مدل‌سازی به شرح مدل ۱۱ به دست آمد.

۵-۳ حل مدل ریاضی برای سناریوی سوم

گزارش رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر در تابع هدف $\hat{f}=f\left(\rho,h_1,h_2,r_p\right)$ که در آن، r_p نرخ ورود مسافران به ایستگاه است، در ماتریس شکل ۹ نمایش داده شده است.

در این سناریو زمان بین اعزام قطارها در خط ۵ ثابت و معادل ۵ دقیقه در نظر گرفته شد و نرخ ورود مسافر با افزایش‌های درصدی تا ۲ برابر مسافران ورودی آمارگیری شده با گام‌های ۱۰ درصد که قابل تعمیم به مقادیر بالاتر نیز هست، فرض شد. معادله ریاضی آن با استفاده از متد رگرسیون چهارمتغیره درجه سوم به شرح رابطه ۱۲ به دست آمد.

	ρ	h_1	h_2	r_p	CL_{i^+}
Rank1	٪۱۰۰	۲	۲	۲	۰/۹۹۹۱٦
Rank2	٪۹۵	۲	۲	۲	۰/۹۸۹۳۰۹
Rank3	٪۱۰۰	۲	۲	۱/۹	۰/۹۸۵٤۸۵
Rank4	٪۹۵	۲	۳	۱/۹	۰/۹۸۱۲۱۱
$M_{results}=$		.	.	.	.
		.	.	.	.
		.	.	.	.
Rank2749	٪۹۵	٦	٦	۲	۰/۳٤۰۷۲
Rank2750	٪۱۰۰	٦	٦	۲	۰/۳۳٦۸٦۷

شکل۹. ماتریس رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها در فضای جواب برای سناریوی سوم

$$
\begin{aligned}
&-0.3779.\rho^3-2.4999.\rho^2+22.9658.\rho-26.86.h_1^3+56.5063.h_1^2-3.7715.h_1\\
&-0.0234.h_2^3+0.0553.h_2^2+2.1916.h_2+0.0233.r_p^3-0.9413.r_p^2+10.5864.r_p\\
&+1.7686.\rho.h_1.h_2+2.7495.\rho.h_1.r_p-0.0006.\rho.h_2.r_p-0.0013.h_1.h_2.r_p\\
&+3.7703.\rho^2.h_1+0.1475.\rho^2.h_2+0.5297.\rho^2.r_p+1.092.h_1^2.\rho-0.1348.h_1^2.h_2+0.1751.h_1^2.r_p\\
&+0.0779.h_2^2.\rho+0.2045.h_2^2.h_1-0.0002.h_2^2.r_p+0.2273.r_p^2.\rho+0.4904.r_p^2.h_1-0.0001.r_p^2.h_2\\
&-26.2067.\rho.h_1-1.9979.\rho.h_2-5.1718.\rho.r_p-3.4229.h_1.h_2-9.2924.h_1.r_p+0.0042.h_2.r_p\\
&-20.8869=\hat{f}
\end{aligned}
\qquad (12)
$$

www.SID.ir

Archive of SID

٦. اعتبار سنجی مدل

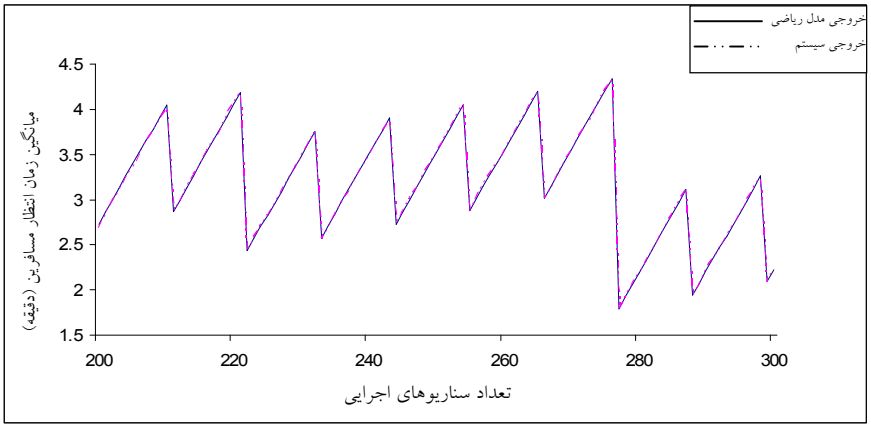
برای محاسبه حداقل مربعات خطا در چندجمله‌ای چهار متغیره درجه سه $f(x, y, z, t)$ ، یا به عبارت دیگر میزان انطباق منحنی پیش‌بینی شده از منحنی مقادیر عددی محاسبه شده، از روابط ریاضی ۱۳ تا ۱۵ استفاده شد.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \left(f_i - \hat{f}_i \right)^2 \qquad (۱۳)$$

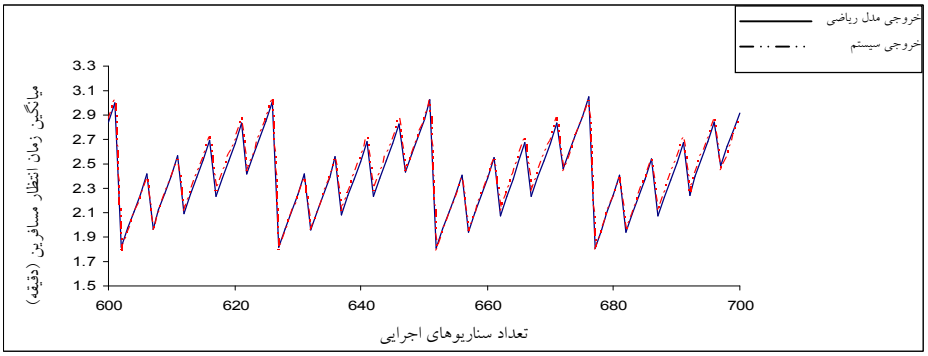
$$SST = \left(\sum_{i=1}^{n} f_i^2 \right) - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} f_i \right)^2}{n} \qquad (۱٤)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \qquad (۱٥)$$

در سناریوی اول $\hat{f} = f(\rho, h_1, h_2, h_5)$ ، درصد انطباق نتایج مدل به میزان R^2=۰/۹۹ بوده و این میزان در سناریوهای دوم $\hat{f} = f(\rho, h_1, h_2, c_{line})$ و سوم $\hat{f} = f(\rho, h_1, h_2, r_p)$ به ترتیب معادل R^2=۰/۹۷ و R^2= ۰/۹۰ محاسبه شد که معرف دقت بالای مدل ریاضی طراحی شده در هر سه سناریو است. برای درک شهودی بهتر این موضوع، نمونه‌هایی از مقایسه هر سه سناریو طراحی شده با مقادیر عددی سیستم در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از نمودار مقایسه‌ای ۱۰۰ خروجی (از اجرای ۲۰۰ الی ۳۰۰) مدل ریاضی سناریوی اول با داده‌های سیستم نمایش داده شده است که حاکی از تطابق کامل نمونه‌های برداشت شده با نمونه‌های مدل‌سازی شده خروجی از مدل دارد. نمونه‌ای از نمودار مقایسه‌ای ۱۰۰ خروجی (از اجرای ٦۰۰ تا ۷۰۰) مدل ریاضی سناریوی دوم با داده‌های سیستم نیز در شکل ۱۱ نمایش داده شده است که نشانگر دقت مدل و تطابق کامل نمونه‌های برداشت شده با نمونه‌های مدل‌سازی شده خروجی از مدل است.



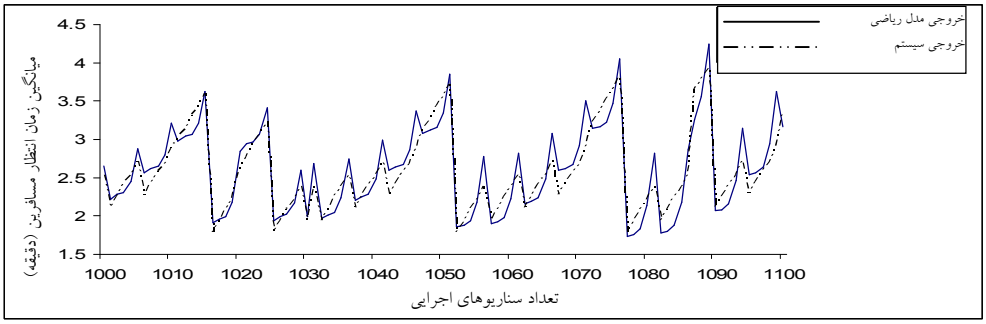
شکل۱۰. نمودار مقایسه‌ای ۱۰۰ خروجی مدل ریاضی با داده‌های سیستم در سناریوی اول



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای ۱۰۰ خروجی مدل ریاضی با داده‌های سیستم در سناریوی دوم

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای ۱۰۰ خروجی مدل ریاضی با داده‌های سیستم در سناریوی سوم

در نهایت نمونه‌ای از نمودار مقایسه‌ای ۱۰۰ خروجی (از اجرای ۱۰۰۰ الی ۱۱۰۰) مدل ریاضی سناریوی سوم با داده‌های سیستم در شکل ۱۲ نمایش داده شده است که روند منحنی‌ها بیانگر دقت مدل و تطابق بسیار نزدیک نمونه‌های برداشت شده با نمونه‌های مدل‌سازی شده خروجی از مدل است.

۷. تحلیل حساسیت و ارزیابی نتایج

با بررسی صورت گرفته بر روی گزارش‌های رتبه‌بندی نهایی سناریو نخست (یعنی بردار ورودی تابعی از نرخ بهره‌برداری گیشه و کنترل بلیت و زمان‌های بین اعزام خطوط ۱، ۲ و ۵ شبکه مترو تهران باشد) همان طور که پیش‌بینی می‌شد کمترین سرفاصله زمانی اعزام قطارها۲، ۲ و ۵ دقیقه و بیشترین نرخ بهره‌برداری[۲۷] گیشه فروش و گیت کنترل بلیت معادل ۱۰۰٪ (طول صف صفر)، ایده‌آل‌ترین وضعیت را رقم زد، اما آنچه در این بین حائز اهمیت است سایر رتبه‌بندی رکوردهای ماتریس ۵ × ۳۰۲۵ است که تغییرات هریک از این متغیرهای ورودی، یک زمان تأخیر در ایستگاه بر مبنای میانگین زمان انتظار مسافران در سکوی متمایزی را در سیستم پدید می‌آورد.

بر مبنای رتبه‌بندی نهایی سناریوی دوم، مشاهده شد که ظرفیت فعلی هر قطار مترو یعنی ۱۴۰۰ نفر در خطوط ۱ و ۲ و ۱۷۰۰ نفر در خط حومه‌ای ۵ با لحاظ حداقل سر فاصله زمانی اعزام قطارهای درون شهری یعنی ۲ دقیقه و نرخ بهره برداری۱۰۰٪، بهینه‌ترین حالت ممکن را رقم زده است.

همچنین ماتریس نهایی سناریوی سوم بیانگر این واقعیت است که اگر نرخ ورود مسافر تا ۲ برابر افزایش یابد، با اعمال حداقل زمان اعزام ممکن (یعنی ۲ دقیقه) باز هم کمترین تأخیر و زمان انتظار مسافران در شبکه حاصل می‌شود.

بر این اساس آنچه مهم است، روند تغییرات نتایج مورد انتظار در اثر تغییرات هریک از بردارهای ورودی است که خلاصه‌ای از نتایج تغییرات شاخص‌های مدل‌سازی شده به تفکیک شاخص متغیر و شاخص‌های خروجی مدل ناشی از سه سناریو مزبور، در حالت‌های پنج‌گانه جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. تحلیل حساسیت پارامترهای اثر گذار بر زمان تأخیر و انتظار مسافران در شبکه

حالت اول		حالت دوم		حالت سوم		حالت چهارم		حالت پنجم	
شاخص متغیر	شاخص خروجی	شاخص متغیر	شاخص خروجی	شاخص متغیر	شاخص خروجی	شاخص متغیر	شاخص خروجی	شاخص متغیر	شاخص خروجی
نرخ بهره‌برداری گیشه و کنترل بلیت (درصد)	متوسط زمان انتظار مسافران در تیک هال (دقیقه)	سر فاصله زمانی اعزام قطارهای خط ۱ و ۲ (دقیقه)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)	سر فاصله زمانی اعزام قطارهای خط حومه‌ای ۵ (دقیقه)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)	ظرفیت قطار (نفر)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)	نرخ ورود مسافران به ایستگاه (درصد)	متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو (دقیقه)
۰/۵	۳۰/۸۵۶۳۵	۲	۱/۷۹۳۹۶۲	۵	۱/۷۹۳۹۶۲	۱۴۰۰–۱۷۰۰	۱/۷۹۳۹۶۲	۱	۱/۷۹۳۹۶۲
۰/۶	۲۲/۴۲۵۷۵	۳	۲/۰۹۱۳۴۴	۷	۲/۰۷۱۷۶۳	۱۵۰۰–۱۸۰۰	۱/۷۶۱۱۳۸	۱/۲	۱/۷۹۹۸۴۵
۰/۷	۱۳/۹۹۷۴۵	۴	۲/۴۲۴۰۳۱	۹	۲/۳۲۰۱۴۹	۱۶۰۰–۱۹۰۰	۱/۷۴۸۶۷۲	۱/۴	۱/۸۱۶۸۴
۰/۸	۵/۵۷۰۷۳۶	۵	۲/۶۸۷۸۵۸	۱۱	۲/۵۷۳۵۶۷	۱۷۰۰–۲۰۰۰	۱/۷۰۰۹۳۵	۱/۶	۱/۸۲۴۹۳۱
۰/۹	۱/۶۵۷۲۶	۶	۳/۰۲۲۵۲۱	۱۳	۲/۸۳۷۸۱۴	۱۸۰۰–۲۱۰۰	۱/۶۹۶۵۹۴	۱/۸	۱/۸۲۹۴۳۸
۱	۰	۷	۳/۵۱۶۳۴	۱۵	۳/۱۱۲۱۴۲	۱۹۰۰–۲۲۰۰	۱/۶۷۴۷۲۸	۲	۱/۸۳۷۶۵۹
$\Delta\rho = 0.1$	ΔW_T=6.17	Δh=1	$\Delta W_P = 0.3$	$\Delta h = 2$	$\Delta W_P = 0.26$	$\Delta c_{line} = 100$	$\Delta W_P = 0.02$	$\Delta r_p = 0.2$	ΔW_P=0.01

www.SID.ir

Archive of SID

در حالت اول، ملاحظه می‌شود کـه نـرخ بهـره‌بـرداری از گیـشه فروش بلیت و گیت‌های کنترلی تأثیر مـستقیم بـر زمـان تـأخیر و انتظار مسافران در سالن فروش بلیت دارد که بیشترین زمان انتظار ۳۰/۸۵ دقیقه بوده که در شرایط ضریب بهره‌بـرداری ۵۰٪ (یعنـی سرعت فروش و کنتـرل بلیـت نـصف سـرعت ورود مـسافر بـه ایستگاه باشد) صورت می‌پذیرد و در نهایت با ضریب ۱۰۰٪ هیچ صفی تشکیل نمی‌شود و سرعت ورود مسافر با سرعت خـدمات فروش و کنترل بلیت متعـادل مـی‌شـود. بـراین اسـاس، ملاحظـه مـی‌شـود کـه بـه ازای هـر ۱۰ درصـد افـزایش متغیـر ضـریب بهره‌برداری گیشه‌های فروش و کنترل بلیت، به طور متوسط زمان انتظار مسافران در سالن فروش بلیت ٦/۱۷ دقیقه کاهش می‌یابد.

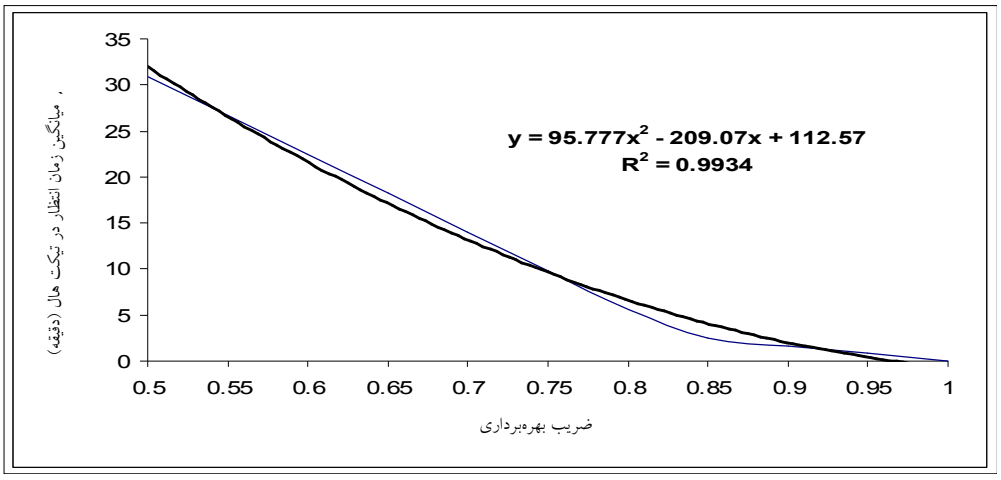
در حالت دوم، سرفاصله زمانی اعـزام قطارهـا در خطـوط ۱ و ۲ شهری متغیر بوده و سایر پارامترها شامل سرفاصـله زمـانی اعـزام قطارهـا در خـط پـنج معـادل ۵ دقیقـه، ضـریب بهـره‌بـرداری از گیشه‌های فروش بلیت و گیت‌های کنترل ۹۰٪ و ظرفیت قطارهـا و نرخ ورود مسافران معادل شرایط واقعی زمان آمـارگیری، ثابـت فرض شده است. براین اساس، ملاحظه می‌شود که به ازای هر ۱ دقیقه کاهش زمان اعزام قطارها، میانگین زمان تـأخیر مـسافران و انتظار آنها در سکوهای ایستگاه‌ها در کل شبکه معادل ۰/۳ دقیقـه کمتر می‌شود.

نتایج آزمایش با فرض متغیر بودن زمان‌های بین اعـزام قطارهـای حومه‌ای خط پنج و ثابت بودن زمان‌های بـین اعـــزام قطارهـــای خطوط یک و دو معادل دو دقیقـه و سـایر پارامترهـا، در حالـت سوم نشان داده شده است. نتایج این حالت بیانگر آن است که بـه ازای هر ۲ دقیقه کاهش زمان‌های بین اعزام قطارهـای خـط پـنج، حدود ۰/۲٦ دقیقه زمان تأخیر مسافران و متوسط زمان انتظار آنهـا در کل شبکه کاهش می‌یابد.

در حالت چهارم، ظرفیت قطارهای خط ۱ و ۲ از ۱٤۰۰ الی ۱۹۰۰ نفر و متناظر آن ظرفیت قطارهای خط ۵ از ۱۷۰۰ الـی ۲۲۰۰ نفـر متغیر فرض شده است و با ثابت بودن سایر پارامترهـا، نتـایج بـه دست آمده موید این نکته است که به ازای هر ۱۰۰ نفـر افـزایش ظرفیت در قطارهای مترو، حدود ۰/۰۲ دقیقه زمان تأخیر مسافران و متوسط زمان انتظار آنها در ایستگاه کاهش می‌یابد.

و در نهایت در حالت پنجم با افزایش نرخ ورود مـسافران تـا دو برابر و ثابت فرض نمودن سایر پارامترهای مدل، می‌توان مشاهده کرد که به ازای هر ۲۰ درصد افزایش نرخ ورود مسافران، حـدود ۰/۰۱ دقیقه بر زمان تـأخیر و متوسـط انتظـار مـسافران در سـکو جهت سوار شدن به قطار افزوده شده است.

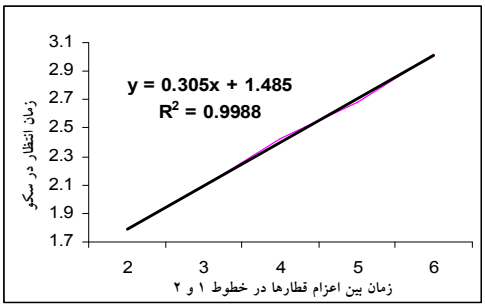
رابطه ریاضی بین میانگین زمان انتظار مسافران در سـالن فـروش بلیت با ضریب بهره‌برداری از گیشه فروش و کنترل بلیت با دقت ۹۹٪ به‌صورت یک عبارت چندجمله‌ای درجه دو در شکل شماره ۱۳ نشان داده شده اسـت (منحنـی نـازک بیـانگر شـکل رابطـه و منحنی ضخیم معرف منحنی تقریب است).



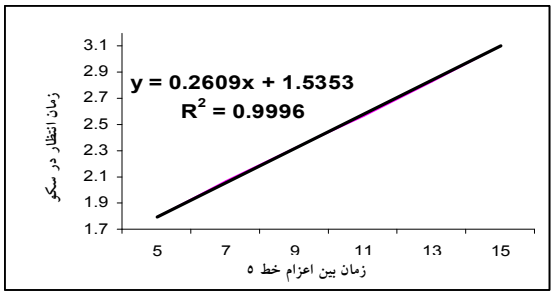
شکل ۱۳. رابطه ریاضی بین ضریب بهره برداری از گیشه فروش و کنترل بلیت با متوسط زمان انتظار مسافران در تیکت هال

www.SID.ir

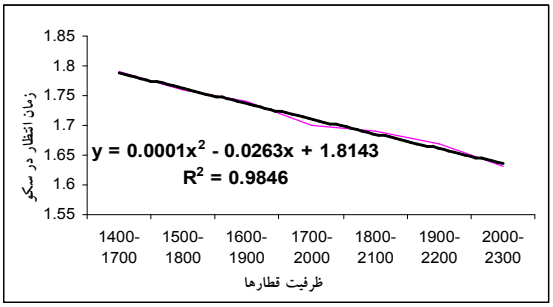
Archive of SID



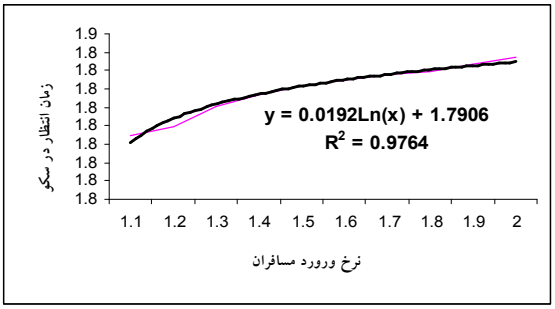
شکل ١٤. رابطه ریاضی بین سر فاصله زمانی اعزام قطارهای خط ۱و۲ با متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو



شکل ۱۵. رابطه ریاضی بین سر فاصله زمانی اعزام قطارهای خط ۵ با متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو



شکل ١٦. رابطه ریاضی بین ظرفیت قطارها با متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو



شکل ۱۷. رابطه ریاضی بین نرخ ورود مسافران به ایستگاه با متوسط زمان انتظار مسافران روی سکو

سایر روابط ریاضی برای حالت‌های دوم تا پنجم به شرح شکل‌های ١٤ تا ١٧ نشان داده شده است.

۸. نتیجه‌گیری

رابطه ریاضی زمان تأخیر مسافران و متوسط انتظار آنها در سناریوهای مختلف شامل زمان‌های بین اعزام قطارها در خطوط یک و دو درون شهری با نرخ بهره‌برداری گیشه و کنترل بلیت، زمان اعزام قطارهای خط حومه شهری، ظرفیت مسافر واگنها و نرخ ورود مسافران به ایستگاه که براساس مطالعات موردی در متروی تهران به دست آمد، قابل تعمیم به سایر شبکه‌های قطار شهری بوده و مهم‌ترین رهیافت این تحقیق است.

علاوه بر این، مهم‌ترین شاخص متغیر ورودی برای تأخیر مسافران و زمان انتظار در سکو، سرفاصله‌های اعزام قطارها و اثر بخش‌ترین شاخص بر زمان انتظار مسافران در شبکه، نرخ بهره‌برداری ازگیشه‌های فروش و کنترل بلیت است که البته این مطلب با تغییر در ساختار طراحی و ارائه خدمات و نیز توسعه فرهنگ استفاده از بلیت‌های مدت دار و اعتباری، تا حدود زیادی قابل برطرف شدن است.

با تعیین میزان اثرگذاری شاخص‌های مفروض بر زمان تأخیر مسافران و مدت انتظار آنها در ایستگاه‌های قطار شهری، مدل ریاضی بهینه‌سازی عملکرد بر مبنای آنالیز حساسیت شاخص‌ها با قابلیت پیش‌بینی شرایط آینده به صورت پارامتری با تغییرات احتمالی به دست آمد و برخلاف تصور که فقط سرفاصله‌های زمانی اعزام قطارها و به تبع آن، تعداد ناوگان در این رابطه مؤثر فرض می‌شد، مشاهده شد که سایر پارامترها از جمله نرخ بهره‌برداری از گیشه فروش و کنترل بلیت در سالن فروش بلیت، ظرفیت قطارها و نرخ ورود مسافران به ایستگاه نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردارند که رابطه ریاضی و میزان اثرگذاری هریک آنها حاصل شد.

www.SID.ir

استفاده
ریاض
Archive of SID

۱۰. پانویس‌ها

1. Multiple criteria decision making (MCDM)
2. Multiple objective decision making (MODM)
3. Multiobjective
4. Multidisciplinary
5. Technique for order- Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
6. Regression
7. Heuristic
8. Metaheuristic
9. Neural Network
10. Genetic Algorithm(GA)
11. Antcolony Algorithm
12. Neueo – fuzzy
13. Cumulative GA
14. Artificial Intelligence
15. Deterministic
16. Stochastic
17. Continuous Linear Programming
18. Bayes theorem
19. Hypothesis
20. Performance Index
21. FirstIn-FirstOut (FIFO)
22. Service In Random Order (SIRO)
23. Mean waiting time _ platform
24. Mean waiting time _ ticket hall
25. Travel speed
26. Passenger Content
27. Utilization

۹. مراجع

۱- اصغرپور، محمد جواد (۱۳۷۷) "تصمیم‌گیری‌های چند معیاره"، انتشارات دانشگاه تهران.

2. Paul Yoon, K. and Hwang, Ching-Lai (2003) "Multiple attribute decision making: An introduction", (Quantitative Applications in the Social Sciences).

3. Triantaphyllou, T. (2002) "Multi-criteria decision making methods: A comparative study" , Journal of Applied Optimization, Vol. 44.

4. Dhingra, S.L. and Shrivastava, Prabhat (2004) "Modeling for co- ordinate bus- train network", Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, New York, USA.

5. Knoppers, P. and Muller, T. (1995) "Optimized transfer opportunities in public transport", Transportation Science, Vol. 27, No. 1.

6. Bookbinder, James H. and Desilets, Alain (1992) "Transfer optimization in a transit network", Journal of Transportation Science, Vol. 26.

7. Klemt, W. D. and Stemme, W. (1998) "Schedule synchronization for public transit networks", Journal of Computer- aided Transit Scheduling, 327- 335, Springer Verlag, New York.

8. Hickey, T.R. (1992) "Coordination of inter modal transfers at LRT stations", Journal of Transportation Research Record, No. 1361.

9. Lee, K.T. and Schonfeld, P.M. (1991) "Optimal slack times for timed transfers at a transit terminal", Journal of Advanced Transportation, 25(22).

10. Chowdhury, M. (2000) "Inter modal transit system coordination with dynamic vehicle dispatching, "Ph.D Dissertation, Institute for Transportation, New Jersey Institute of Technology.

11. Chowdhry, M. and Chien, S. (2002) "Intermodal transit system coordination", the Preprint,79th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C.

12. Vansteenwegen, P. and Van Oudheusden, D. (2007) "Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network", Transportation Research Journal, part B 41, pp. 478 – 492.

13. Vasteenwegen, P. and Van Oudheusden, D. (2006) "Developing railway time tables which guarantee a better service.", European Journal of Operational Research, 137,(1), pp. 337-350.

14. Teigen, Karl H. and Keren, G. (2007) "Waiting for the bus: when base – rates refuse to be neglected", The Cognition Journal of Elsevier, 103, pp. 337-357.

15. Assis, Wanderson O, and Milani, Basilio E.A. (2007) "Generation of optimal schedules for metro lines using model predictive control", The automatica Journal of Elsevier Science Direct, No. 40, pp. 1397 – 1404.

www.SID.ir