شبیه‌سازی سیستم صف خط اتوبوسرانی

دکتر کامران فیضی
(عضو هیئت علمی دانشگاه علامه طباطبایی)
احمد اللهیاری
(کارشناس ارشد مدیریت صنعتی)

چکیده

یکی از مهمترین مسایل پیش روی مدیران امروزی، چگونگی تامین، تخصیص و بهره‌برداری از منابع محدود، دستیابی به بهترین عملکرد است. سیستم‌های حمل‌ونقل شهری نیز با چنین مسایلی مواجه هستند. این سیستم‌ها، بنا به تأثیر عمیقی که بر سیستم‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارند، باید علاوه بر درآمدزایی، رضایت مسافران و حیثیت اجتماعی خود را نیز مدنظر قرار دهند. در این مقاله، برای بهبود عملکرد سیستم صف خطوط اتوبوسرانی شهری در تهران، یک مدل شبیه‌سازی ارایه شده است. به وسیلهٔ این مدل، چگونگی رفتار سیستم در موقعیتهای گوناگون بررسی و

یک "سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری"[1] برای آن، ارایه گردیده است. با استفاده از این سیستم، می‌توان تاثیر تغییرات متغیّرهای اصلی خط اتوبوسرانی را بر کلیّت سیستم، به ویژه خروجی های آن مشاهده نمود. در این تحقیق به عنوان نمونه خط ۴۲۷ اتوبوسرانی شرکت واحد اتوبوسرانی از میدان نازی آباد تا میدان انقلاب مورد بررسی قرار گرفته است.

مقدمه

مردم شهرهای مختلف، برای رسیدن به مقصد از وسایل گوناگون حمل و نقل شهری بهره می‌گیرند. در شهرهای بزرگ، سیستم اتوبوسرانی شهری در جابه‌جایی افراد، جایگاه ویژه‌ای دارد. در چنین حالتی، کارایی هرچه بیشتر سیستم اتوبوسرانی، می‌تواند تاثیر مثبتی بر سایر سیستمها بر جای گذارد. متأسفانه، عملکرد سیستم اتوبوسرانی در کلان شهرهای کشور به ویژه تهران، دچار آشفتگی‌های متعدّدی است. انبوه مسافران منتظر در ایستگاهها به همراه خیل عظیم افراد حاضر در هر اتوبوس و نیز زمان طولانی انتظار، بیانگر وجود مشکل در این سیستم است. وجود مسایل فوق، بررسی رفتار این سیستم را ضروری می‌نماید.

اگر بتوان با استفاده از شیوه‌ها و ابزار علمی، راه حلّی یافت که با کمک امکانات موجود فقط چند دقیقه از وقت مصروفه شهروندان در صفهای اتوبوسرانی کاست، خدمت شایان توجهی در سطح ملی به افراد جامعه صورت گرفته است.

هدف اساسی این مقاله، ارایهٔ یک مدل شبیه‌سازی است که به وسیلهٔ آن می‌توان چگونگی رفتار سیستم صف خط اتوبوسرانی را در موقعیتهای گوناگون بررسی و به پرسشهای مختلف در حد و توان مدل، پاسخ گفت. در این میان، اگر بخواهیم میانگین زمان انتظار افراد در صفها از حدّ مشخصی کمتر باشد و یا میانگین طول صفها و یا میانگین زمان بی‌کاری اتوبوسها، از اندازهٔ مشخصی بیشتر نباشد، باید به این پرسشها پاسخ داد:

- چه تعداد اتوبوس در یک بازهٔ زمانی مشخص، باید مشغول سرویس‌دهی باشند تا در

1- Decision Support System

حد ممکن رضایت نسبی مسافران حاصل گردد؟
- زمان‌بندی حرکت بین دو اتوبوس دربازهٔ زمانی یاد شده، چه مقدار باشد؟
- زمان مناسب برای طی فاصله بین دو ایستگاه چقدر است؟

پرسشهای یاد شده، مهمترین سئوالاتی هستند که مدل، باید قادر به پاسخگویی آنها باشد. در ضمن، منبع اطلاعاتی اصلی مطالبی که در پی می‌آید، مشاهدات مستقیم محققین از یکی از خطوط اصلی اتوبوسرانی تهران در یک دورهٔ چندماهه است. اطلاعات حاصل از مشاهدهٔ رویدادها براساس اصول تئوری صف، جمع‌آوری و در طرّاحی سیستم شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل سیستم صف یک خط اتوبوسرانی

برای شبیه‌سازی سیستم خط اتوبوسرانی باید پنج گام اساسی را طی کرد. در این جا به ذکر این گامهای پنجگانه می‌پردازیم:

۱ـ گام اول: آشنایی با سیستم صف خط اتوبوسرانی

سیستم صف خط اتوبوسرانی، سیستمی است خدماتی که افراد برای جابه‌جایی و رسیدن به مقاصد خود به ایستگاههای اتوبوس مراجعه می‌نمایند و پس از رسیدن به مقاصد، اتوبوس‌ها و ایستگاهها را ترک می‌کنند.

۱ـ۱ـ شناسایی اجزاءِ اصلی سیستم

این سیستم متشکل است از:
- افرادی که وارد ایستگاهها می‌شوند تا به مقصد برسند.
- اتوبوسهایی که برای جابه‌جا کردن مسافران استفاده می‌شوند.
- ایستگاههایی که مسافران در آنجا سوار و پیاده می‌شوند.

در کنار این سه جزءِ اصلی اجزاءِ دیگری از جمله باجه‌های فروش بلیط، کنترل کننده‌های خطوط و مسیرهای حرکت قرار دارند. در عین حال، اجزاءِ اصلی، بیشترین تعامل را با یکدیگر دارند و بر رفتار سیستم تأثیر می‌گذارند.

۲-۱- معیارهای عملکرد سیستم

هر سیستم صف، نیازمند معیارهایی مناسب برای بررسی نحوهٔ عملکرد آن سیستم می‌باشد. با استفاده از چنین معیارهایی، می‌توان تأثیر تصمیم‌های مختلف را بر سیستم مورد بررسی قرار داد. در این سیستم، معیارهای موردنظر عبارتند از:

- بیشترین میانگین طول صف
- بیشترین میانگین زمان انتظار یک مسافر
- بیشترین میانگین زمان بیکاری اتوبوسها

سیستم صف خط اتوبوسرانی، چند ایستگاه را شامل می‌شود. هر ایستگاه، دارای میانگین طول صف و میانگین زمان انتظار ویژه‌ای می‌باشد. هم چنین، اوّلین ایستگاههای هر دو مسیر، میانگین زمان بی‌کاری متفاوتی را برای اتوبوسها ارایه می‌دهند. با برگزیدن بیشترین مقدار این اعداد، معیارهای مناسبی برای عملکرد سیستم پدید می‌آید. با به کارگیری تصمیمات گوناگون، تصمیمی که بتواند معیارهای فوق را به طور معنی‌داری کمتر نماید، به عنوان تصمیم مناسب برگزیده می‌شود[۱].

۳-۱- بررسی مشخصه‌های سیستم صف خط اتوبوسرانی

الف - نحوهٔ ورود مسافران و عکس‌العمل آنها پس از ورود

افراد ممکن است به صورت انفرادی یا گروهی به یک سیستم وارد شوند. در سیستم صف خط اتوبوسرانی نیز مسافران در هر لحظه به شکل انفرادی یا گروهی به ایستگاهها وارد می‌شوند. در صورتی که مسافری پس از ورود به صف، پیش از رسیدن اتوبوس، ایستگاه را ترک نماید مسافر کم‌حوصله نامیده می‌شود. باید درنظر داشت که در ایستگاههای آخر رفت و برگشت، هیچ مسافری جهت دریافت سرویس مراجعه نمی‌کند، بلکه تنها مسافران در آن ایستگاه از اتوبوس خارج می‌گردند.

ب - نحوهٔ سرویس‌دهی اتوبوسها

در سیستم صف اتوبوسرانی شهری، سرویس‌دهی به شکل گروهی و باتوجه به ظرفیت اتوبوسها صورت می‌گیرد و دسته‌ای از مسافران همزمان جابه‌جا می‌شوند. زمان

جابه‌جایی افراد از ایستگاهی به ایستگاهی دیگر، تحت تأثیر تعداد مسافران حاضر در اتوبوس، شدت ترافیک، تصادفات، از کارافتادگی اتوبوسها، لغزندگی و بارش و... می‌باشد. نکته اساسی این است که در بازه‌های زمانی مختلف، عوامل گوناگونی باعث تغییر در زمان جابه‌جایی بین ایستگاهها، می‌شوند و تابع توزیع احتمال و پارامتر آن را تغییر میدهند.

پ ـ چگونگی نظم صف

در سیستم صف اتوبوسرانی، روشهای گوناگونی در نظم صف مشاهده می‌شود. اغلب در اوّلین ایستگاه روش FIFO (First In First Out) و در ایستگاههای میانی FIFO و RSS (Random Service Selection) اعمال می‌گردد. در برخی ایستگاهها به ویژه ایستگاه اوّل، در کنار صف اصلی، صف دیگری موسوم به "صف سرپایی" تشکیل می‌شوند. زمانی که افراد منتظر در صف اصلی از سوار شدن منصرف می‌شوند، افراد این صف اقدام به سوار شدن می‌نمایند.

ت ـ ظرفیت سیستم

در سیستم صف اتوبوسرانی، هیچ محدودیتی بر تعداد مسافران منتظر در ایستگاهها اعمال نمی‌گردد. امّا، آن چه ظرفیت سیستم را محدود می‌سازد، گنجایش تعداد مسافران در اتوبوسها می‌باشد. به کارگیری انواع اتوبوسها و نیز شرایط فیزیکی و نحوهٔ قرارگرفتن مسافران در یک اتوبوس، ظرفیتهای گوناگونی را پدید می‌آورند.

ث ـ تعداد سرویس دهندگان

در سیستم صف اتوبوسرانی، تعداد سرویس دهندگان برابر است با تعداد اتوبوسهایی که یکی پس از دیگری از ایستگاههای اوّل به حرکت درمی‌آیند و اقدام به جابه‌جایی مسافر می‌کنند.

ج ـ تعداد مراحل سرویس

در این سیستم، هر ایستگاه یک مرحله، محسوب می‌شود. هر ایستگاه می‌تواند سرآغاز سرویس‌گیری و یا پایان آن باشد. باید توجه کرد که تعداد ایستگاههایی که یک مسافر طی می‌نماید تا سرویس‌گیری وی تکمیل گردد، برای سیستم معلوم و مشخص

نیست. در برخی خطوط، دو نوع اتوبوس از نظر تعداد مراحل سرویس‌دهی موسوم به "عادی" و "سریع‌السیر" وجود دارند. اتوبوسهای عادی در تمامی ایستگاهها و اتوبوسهای سریع‌السیر تنها در برخی ایستگاهها توقف می‌نمایند.

چ - صف اتوبوسها در اوّلین ایستگاه

اتوبوسها پس از رسیدن به ایستگاه پایانی، تغییر مسیر می‌دهند و در صف اتوبوسهای اوّلین ایستگاه مسیر عکس، قرار می‌گیرند تا به نوبت وارد ایستگاه شوند و به ارایه خدمت بپردازند.

۴-۱- رویدادها

در هر سیستم، ممکن است اتفاقات متعدّدی روی دهد و بر عملکرد سیستم تأثیر گذارد. در سیستم صف اتوبوسرانی مجموعه‌ای از اتفاقات را می‌توان برشمرد، از جمله:

الف - رویدادهای تأثیرگذار

- ورود فردی یا گروهی مسافر به ایستگاه
- خروج مسافر کم‌حوصله از ایستگاه
- رسیدن اتوبوس به ایستگاه
- حرکت اتوبوس از ایستگاه
- پیاده شدن مسافر از اتوبوس در ایستگاه

ب - رویدادهای کم اثر

- عدم ورود یک مسافر به صف پس از ارزیابی ایستگاه اتوبوس
- پیاده شدن یک مسافر در خارج از ایستگاه
- خروج یک مسافر از صف ایستگاه به خاطر ایستادن اشتباهی در صف
- خرابی اتوبوس در حین جابه‌جایی مسافران
- وجود ترافیک بر اثر تصادف، بارندگی و شلوغی خیابانها

از موارد بی‌شمار دیگری نیز می‌توان یاد کرد اما در میان اتفاقات یاد شده چهار رویداد اساسی "ورود مسافر به ایستگاه"، "رسیدن اتوبوس به ایستگاه"، "حرکت

اتوبوس از ایستگاه" و "خروج مسافر کم حوصله از ایستگاه" مورد توجه می‌باشند؛ چرا که تعدّد وقوع و میزان تأثیرگذاری آنها بیش از دیگر اتفاقات است و سایر اتفاقات را می‌توان نادیده انگاشت و یا به واسطهٔ تمهیداتی، تحت کنترل درآورد.

۵ـ۱ـ متغیّرها

الف ـ متغیّرهای وضعیت سیستم

مجموعه متغیّرهایی هستند که حالات و چگونگی سیستم را در یک مقطع زمانی، توصیف می‌کنند. متغیّرهای وضعیت این سیستم عبارتند از:

ـ تعداد افراد حاضر در هر اتوبوس

ـ تعداد افراد حاضر در هر ایستگاه

ـ اتوبوس‌های حاضر در هر ایستگاه (۰، ۱ یا بیشتر)[۱]

ب ـ متغیّرهای تصادفی سیستم

متغیّرهایی هستند که لازم است تابع توزیع احتمالی هر یک مشخص گردد.

ـ فاصلهٔ زمانی بین ورود دو مسافر متوالی به هر ایستگاه

ـ زمان توقف اتوبوس در هر ایستگاه

ـ زمان طی کردن فاصله بین دو ایستگاه

ـ زمان بین رسیدن اتوبوس به ایستگاه آخر مسیر و قرارگرفتن در صف اتوبوسهای مسیر عکس

ـ زمانی که افراد کم‌حوصله پس از قرارگرفتن در صف، آن را ترک می‌کنند

ـ تعداد افرادی که در هر ایستگاه پیاده می‌شوند.

پ ـ ثابتها

مقادیری هستند که در طول یک بازهٔ زمانی مشخص تغییر نمی‌کنند. با این حال، در بازه‌های زمانی گوناگون و اجراهای مختلف ثابتها نیز می‌توانند تغییر نمایند. ثابتها در این سیستم عبارتند از:

ـ ظرفیت اتوبوسها

ـ تعداد اتوبوسها
ـ تعداد ایستگاههای مسیر رفت / برگشت

ت ـ شمارنده‌های آماری

متغیّرهایی هستند که برای نگهداری اطلاعات آماری عملکرد سیستم، به کار میروند[۴]:

ـ میزان کل بیکاری اتوبوسها در ایستگاه اول رفت / برگشت
ـ تعداد کل اتوبوسهای وارد شده به ایستگاه اول رفت / برگشت
ـ تعداد کل افرادی که سوار اتوبوس شده‌اند
ـ تعداد کل افراد کم‌حوصله
ـ مجموع زمانهای انتظار افراد در هر ایستگاه
ـ تعداد کل افراد مراجعه کننده به هر ایستگاه
ـ تعداد کل افراد مراجعه کننده به هر ایستگاه
ـ میانگین طول صف برای هر ایستگاه

۲ـ گام دوم: مدل‌سازی سیستم مورد بررسی

در صورت تعیین شدن نحوهٔ ارتباط بین اجزاءِ، رویدادها و متغیّرها و چگونگی تأثیرگذاری رویدادها بر متغیّرها به کمک قواعد تصمیم‌گیری، مدلی از سیستم به وجود می‌آید. در این مرحله، با بررسی دقیق رویدادهای اساسی، به ساخت مدل می‌پردازیم. پیش از آن، مناسب است تا پیش‌فرض‌های ساخت مدل را روشن سازیم.

۱ـ۲ـ پیش‌فرض‌های ساخت مدل

۱ـ۱ـ۲ـ پیش‌فرض‌های کلی

ـ افراد به شکل انفرادی به سیستم وارد می‌شوند (این پیش‌فرض خللی در مدل‌سازی ایجاد نمی‌کند).
ـ سرویس‌دهی و جابه‌جایی مسافران به شکل گروهی می‌باشد.

ـ تأثیر شدت ترافیک، تصادفات و دیگر عوامل بر سرعت جابه‌جایی، به طور غیرمستقیم بر مدل اعمال می‌گردد، یعنی با درنظر گرفتن آنها به محاسبهٔ پارامترهای زمان جابه‌جایی بین دو ایستگاه می‌پردازیم.
ـ تمام صفها دارای نظم FIFO هستند.
ـ گنجایش اتوبوسها یک عدد ثابت فرض می‌شود.
ـ سیستم به شکل رفت و برگشتی و یا به عبارت دیگر حلقوی می‌باشد [۳].
ـ تمامی اتوبوسها از لحاظ تعداد مراحل سرویس از نوع عادی می‌باشند.

۲ـ۱ـ۲ـ شرایط فرض شده برای زمان صفر

برخی خطوط، هنگام شروع کار، تنها تا مدّتی از یک‌سو اقدام به اعزام اتوبوس می‌نمایند، در حالی که سایر خطوط به علّت تقاضای سرویس در لحظات آغازین در هر دو مسیر، اتوبوسهایی را از دو سو اعزام می‌کنند.

فرض می‌نماییم که در آغاز، تعدادی اتوبوس در ابتدای مسیر رفت و تعدادی در ابتدای مسیر برگشت قرار گرفته‌اند. فرض شده است که در ساعت صفر، یک اتوبوس در ایستگاه اوّل رفت و یک اتوبوس در ایستگاه اول برگشت می‌باشند و سایر اتوبوسها در صفهای مخصوص اتوبوسها در ایستگاههای اوّل رفت و برگشت قرار می‌گیرند. در این زمان، هیچ اتوبوسی در ایستگاههای میانی و آخر وجود ندارد و مسافری وارد ایستگاه نشده است.

۲ـ۲ـ بررسی رویدادهای اساسی جهت تدوین مدل

۱ـ۲ـ۲ـ رویداد ورود مسافران به ایستگاه

به هنگام ورود یک یا چند مسافر به ایستگاه، ممکن است متغیّرهای وضعیت "تعداد مسافران منتظر در صف" و "تعداد مسافران حاضر در اتوبوس" تغییر نمایند. در این هنگام، قواعد خاص این رویداد، چگونگی تحت تأثیر قرار گرفتن وضعیت را نشان خواهند داد. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود به هنگام وقوع این رویداد لازم است:
ـ میانگین طول صف برای تمامی ایستگاهها محاسبه شود.
ـ زمان آخرین رویداد، معادل زمان حال شبیه‌سازی تعیین گردد.

ـ زمان ورود مسافر بعدی به این ایستگاه با تولید یک عدد تصادفی از متغیّر ورود مسافر و افزودن آن به زمان حال، محاسبه شود.
ـ تعداد کل افراد مراجعه کننده به این ایستگاه افزایش یابد.

قواعد زیر واکنش سیستم را به هنگام وقوع این رویداد نشان می‌دهد.

الف) اگر به هنگام ورود فرد، اتوبوسی در ایستگاه باشد و ظرفیت اتوبوس تکمیل نباشد: فرد بدون این که داخل صف شود به اتوبوس وارد می‌شود و متغیّر وضعیت "تعداد افراد حاضر در اتوبوس" تغییر می‌کند.

ب) اگر به هنگام ورود فرد، اتوبوسی در ایستگاه باشد ولی ظرفیت پاسخگوی او نباشد و یا به هنگام ورود افراد، اتوبوسی در ایستگاه نباشد:

فرد در صف قرار می‌گیرد بنابراین:

ـ متغیّر وضعیت "تعداد افراد منتظر در صف ایستگاه" افزایش می‌یابد.
ـ زمان ورود او در آرایهٔ زمان، ثبت می‌گردد.
ـ تعداد کل افراد معطل شده در این صف افزایش می‌یابد.

باتوجه به مشاهدات مستقیم که حاکی از ۲۰ درصد کم‌حوصلگی در میان مسافران است، یک عدد تصادفی یکنواخت از بازه (۰،۱] انتخاب می‌کنیم.

ب ـ۱ـ در صورتی که عدد انتخابی کمتر یا مساوی ۰/۲ بود، وی کم‌حوصله می‌باشد. در این صورت:

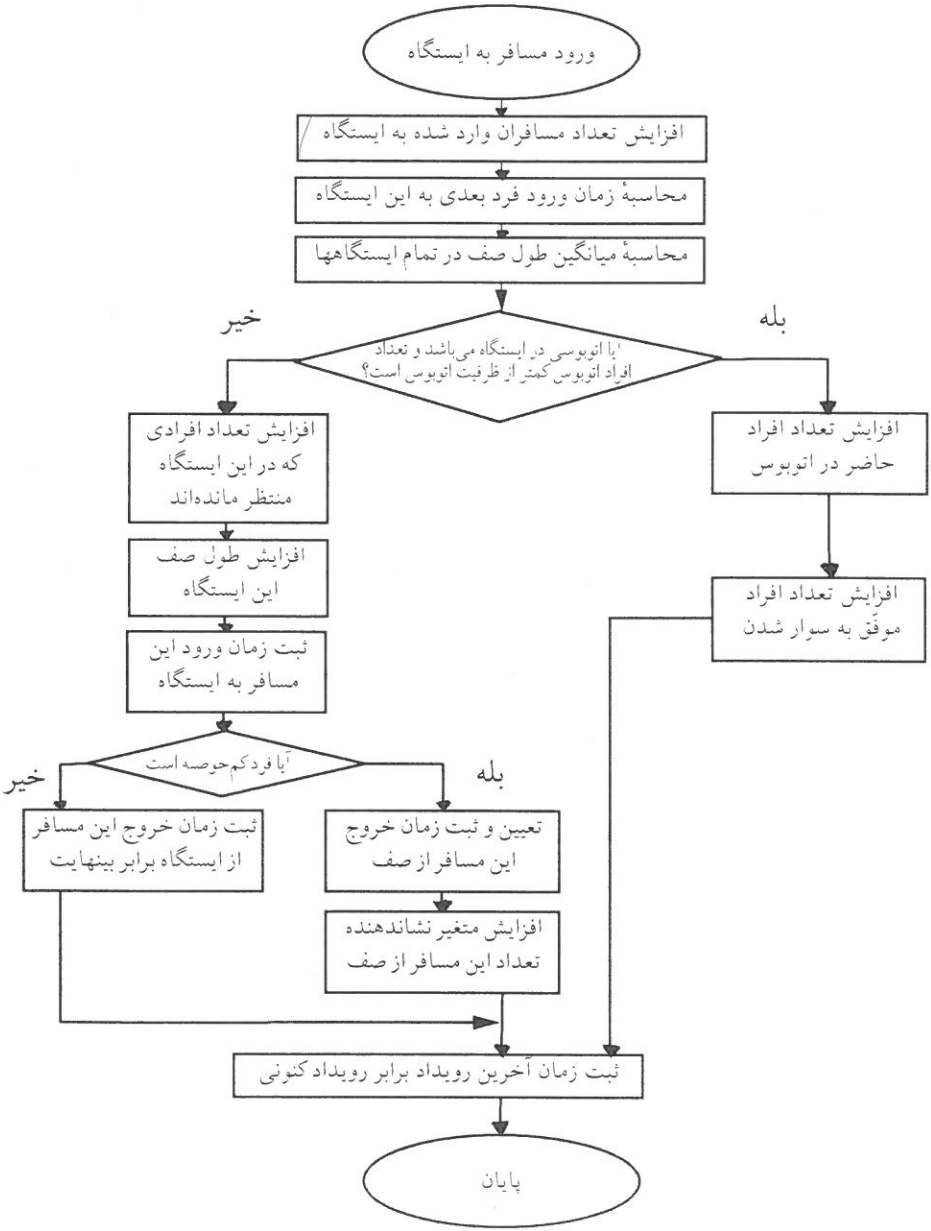
۱ـ باتوجه به نرخ متوسط زمانی که افراد کم‌حوصله در صف صرف می‌کنند، زمان خروج وی از صف مشخص می‌شود.
۲ـ تعداد "کل افراد کم‌حوصله" افزایش می‌یابد.

ب ـ۲ـ در صورتی که عدد انتخابی بزرگتر از ۰/۲ بود، وی کم‌حوصله نیست. در این صورت:

زمان خروج وی یک عدد بزرگ فرض می‌شود تا هرگز قبل از رسیدن اتوبوس از صف خارج نشود.

شکل ـ۱ـ عملیات اجرایی هنگام ورود یک مسافر به ایستگاه را نشان می‌دهد.

شکل شمارهٔ ۱ : چارت رویداد ورود مسافر به ایستگاه



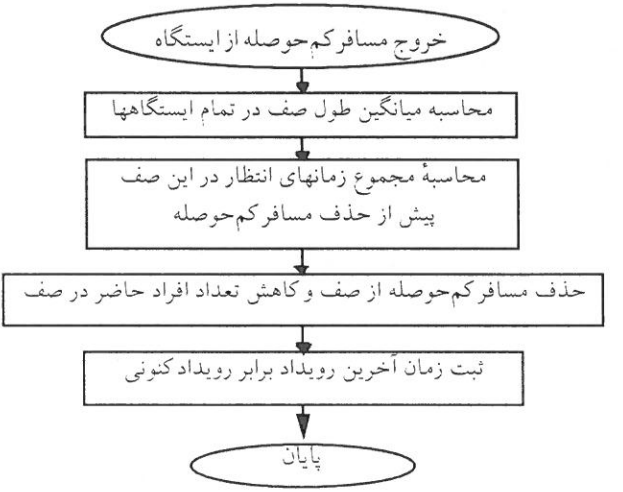
۲-۲-۲- رویداد خروج مسافر کم‌حوصله از صف ایستگاه

برخی مسافران به هنگام خالی بودن ایستگاه از اتوبوس و همچنین شتاب در رسیدن به مقصد، پس از مراجعه به ایستگاه از صف خارج می‌گردند. این عمل، پس از صرف زمانی در صف، صورت می‌پذیرد. خروج مسافر کم‌حوصله، می‌تواند متغیّرهای سیستم را متأثر سازد. این رویداد، در سیستم صف اتوبوسرانی به کرّات مشاهده می‌شود و درصد بالایی از مسافران را شامل می‌شود. بنابراین، چشم‌پوشی از آن می‌تواند، مدل را از نظر صحت عمل به چالش بطلبد.

همانگونه که در شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود با خروج مسافر کم‌حوصله از ایستگاه باید:

- متغیّر وضعیت "تعداد مسافران منتظر در صف" کاهش یابد.
- میانگین طول صف برای تمامی ایستگاهها محاسبه گردد.
- زمان آخرین رویداد معادل زمان حال شبیه‌سازی تعیین شود.
- مجموع زمانهای انتظار این صف با توجه به زمان کنونی به هنگام گردد.

شکل شمارهٔ ۲ : فلوچارت رویداد خروج مسافر کم‌حوصله از ایستگاه



۳-۲-۲- رویداد رسیدن اتوبوس به ایستگاه

با رسیدن اتوبوس به ایستگاه، متغیّرهای وضعیت سیستم تغییر می‌نمایند. بدین معنی که با رسیدن اتوبوس به ایستگاه، تعدادی از آن پیاده می‌شوند و تعداد افراد حاضر در اتوبوس کاهش می‌یابد. در صورتی که ظرفیت اتوبوس امکان دهد:

- تعدادی از افراد صف، سوار اتوبوس می‌گردند و طول صف کاهش می‌یابد.
- تعداد افراد حاضر در اتوبوس دوباره تغییر کرده و افزایش می‌یابد.
- متغیّر وضعیت "اتوبوس حاضر در ایستگاه" معادل اتوبوس رسیده به ایستگاه می‌گردد.

در این رویداد باید متوسط طول تمامی صفها محاسبه شود و زمان آخرین رویداد برابر زمان کنونی ثبت گردد.

همانگونه که در شکل شمارهٔ ۳ مشاهده می‌شود واکنش سیستم چنین می‌باشد:

الف - در صورتی که اتوبوس از صف اتوبوسهای اوّلین ایستگاه، به ایستگاه اوّل رفت/برگشت برسد در این صورت :

- به تعداد اتوبوسهایی که در ایستگاه قرار گرفته‌اند، یک واحد اضافه می‌شود.
- میزان کل زمان انتظار اتوبوسها در صف اتوبوسهای اوّلین ایستگاه محاسبه می‌گردد.
- اتوبوس به عنوان اتوبوس حاضر در ایستگاه ثبت می‌گردد.
- در این حالت، تعداد افراد حاضر در اتوبوس و تعداد افراد پیاده شونده، صفر است.
- زمان حرکت اتوبوس به سوی ایستگاه بعدی تعیین میشود.

الف - ۱- اگر تعداد افراد صف ایستگاه بیشتر از ظرفیت اتوبوس باشد:

تعداد سوار شونده‌ها برابر ظرفیت خواهد بود.

الف - ۲- اگر تعداد افراد صف ایستگاه بیشتر از ظرفیت اتوبوس نباشد:

تعداد سوارشونده‌ها برابر تمامی تعداد افراد صف خواهد بود. در این صورت:

- تعداد افرادی که می‌توانند سوار شوند از تعداد افراد صف کاسته شده و به تعداد افراد حاضر در اتوبوس افزوده می‌گردد.

- تعداد افرادی که در کل ایستگاهها موفق به سوار شدن می‌گردند، به تعداد افراد موفق در سوار شدن، افزوده می‌شود.
- مجموع زمانهای انتظار افراد به هنگام می‌شود.

ب - اگر اتوبوس به ایستگاه میانی برسد در این صورت:

- تعداد افرادی که پیاده می‌شوند به کمک تابع، توزیع آن تعیین می‌گردد و از تعداد افراد حاضر در اتوبوس کاسته می‌شود.
- با مقایسهٔ ظرفیت باقی مانده و طول صف، تعداد افرادی که می‌توانند سوار شوند، محاسبه می‌گردد.
- این تعداد به افراد حاضر در اتوبوس اضافه می‌گردد و از تعداد افراد در صف کاسته می‌شود.
- تعداد کل افرادی که در کل ایستگاهها موفق به سوار شدن گشته‌اند، افزوده می‌شود.
- زمان حرکت اتوبوس به سوی ایستگاه بعدی مشخص می‌شود.
- اتوبوس کنونی به عنوان اتوبوس حاضر در ایستگاه ثبت می‌گردد.
- مجموع زمان انتظار افراد به هنگام می‌شود.

ج - در صورتی که اتوبوس به ایستگاه پایانی برسد:

اتوبوسها پس از رسیدن به ایستگاه پایانی مسیر و پیاده کردن تمامی مسافران تغییر مسیر می‌دهند. پس از تغییر مسیر و قبل از قرارگرفتن در داخل ایستگاه برای سوارکردن مسافر، در صف مخصوص اتوبوسهای ایستگاه، اولِ مسیر عکس، قرار می‌گیرد. در این صورت:

- تعداد اتوبوسهای مسیر عکس، یک واحد افزایش می‌یابد.
- زمان صرف شده جهت تغییر مسیر یک متغیّر تصادفی است که زمان رسیدن اتوبوس به صف اتوبوسهای مسیر عکس را تعیین می‌کند.

ج ـ ۱ـ اگر اتوبوسی در صف اتوبوسهای مسیر عکس نباشد:

زمانی که اتوبوس در ابتدای آن صف قرار گیرد، و زمان قرار گرفتن همان اتوبوس در ایستگاه تعیین می‌گردد.

ج ـ ۲ـ اگر اتوبوسی در صف اتوبوسهای مسیر عکس وجود داشته باشد:

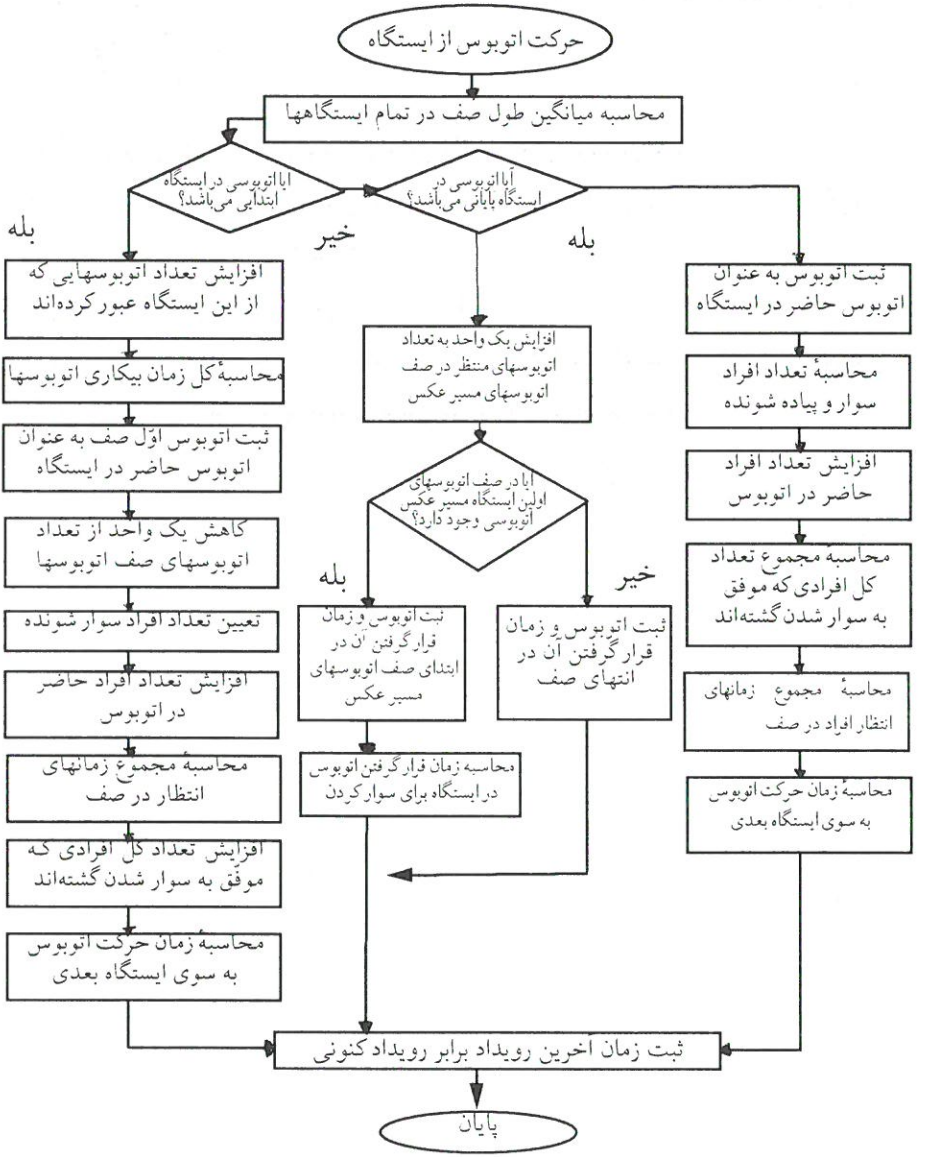
زمان قرار گرفتن اتوبوس در صف اوّل مسیر عکس در انتهای یک آرایه ثبت می‌گردد.

در صورت رسیدن اتوبوس به ایستگاه انتهایی:

ـ تمامی افراد پیاده می‌شوند و کسی سوار نمی‌شود.

ـ زمان رسیدن اتوبوس به داخل ایستگاه اوّل مسیر عکس، تا به هنگام قرار گرفتن اتوبوس در ابتدای صف اتوبوسهای مسیر عکس به تعویق می‌افتد.

شکل شمارهٔ ۳ـ فلوچارت رویداد رسیدن اتوبوس به ایستگاه



۴-۲-۲- رویداد حرکت اتوبوس از ایستگاه

شکل شمارهٔ ۴ نشان می‌دهد که حرکت اتوبوس به سوی ایستگاه بعدی در ایستگاههای مختلف، رفتارهای گوناگونی را نشان می‌دهد.

الف - در صورتی اتوبوس از ایستگاه اوّل رفت /برگشت حرکت کند:

الف - ۱- اگر اتوبوسی در صف اتوبوسهای ایستگاه وجود داشته باشد:

زمان رسیدن اتوبوس بعدی به ایستگاه مشخص می‌گردد.

الف - ۲- اگر اتوبوسی در صف اتوبوسهای ایستگاه وجود نداشته باشد:

زمان رسیدن تمام اتوبوسها به این ایستگاه، عددی بزرگ تعیین می‌گردد.

در حالت الف، زمان رسیدن اتوبوس به ایستگاه بعدی نیز مشخص می‌شود.

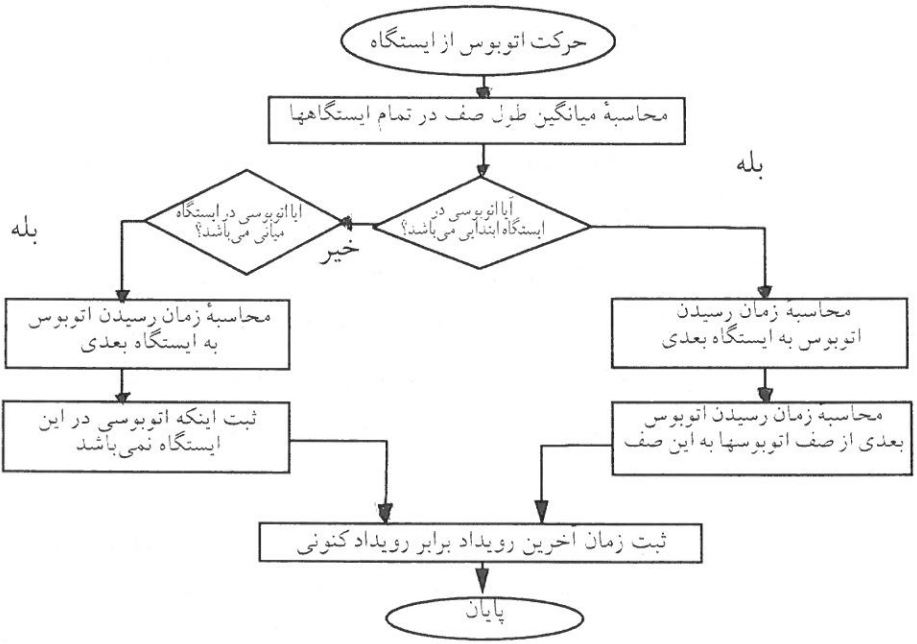
ب - اگر اتوبوس از ایستگاه میانی حرکت کند:

زمان رسیدن اتوبوس به ایستگاه بعدی تعیین می‌گردد.

با حرکت اتوبوس از هر ایستگاهی:

- متغیّر وضعیت "اتوبوس حاضر در ایستگاه" به حالت عدم حضور اتوبوس در ایستگاه تبدیل می‌شود.
- میانگین طول صف برای تمام ایستگاهها محاسبه می‌گردد.
- زمان آخرین رویداد برابر زمان حال ثبت می‌شود.

شکل شمارهٔ ۴ـ فلوچارت رویداد حرکت اتوبوس از ایستگاه



۳ـ گام سوم: پیاده‌سازی مدل در یک خط اتوبوسرانی

سیستم صف خط اتوبوسرانی را که دارای ۲۵ دستگاه اتوبوس و ۱۷ ایستگاه رفت و ۱۷ ایستگاه برگشت می‌باشد درنظر بگیرید. با جمع‌آوری داده‌های مربوط به متغیّرهای تصادفی یاد شده در ایستگاهها، تابع توزیع احتمالی بر آنها پردازش شده است که توابع توزیع آنها [۵] به قرار زیر است:

- تابع توزیع متغیّر تصادفی فاصلهٔ زمانی ورود دو مسافر متوالی، از نوع نمایی با پارامتر ۳۷ ثانیه می‌باشد.
- تابع توزیع احتمالی فاصلهٔ زمانی بین ورود و خروج افراد کم‌حوصله نرمال با میانگین ۲۹۶ و انحراف معیار ۳۶ ثانیه می‌باشد.

- تابع توزیع احتمالی فاصلهٔ زمانی بین قرار گرفتن اتوبوس در ابتدای صف اتوبوسهای ایستگاه اول و قرار گرفتن در ایستگاه جهت سوار کردن نیز نرمال بوده و میانگین و انحراف معیار آن به ترتیب ۲۸ و ۱۰ ثانیه می‌باشد.
- متغیّر تصادفی فاصلهٔ زمانی تغییر مسیر اتوبوس پس از رسیدن به انتهای مسیر، تابع توزیع نرمال با میانگین ۳۰۰ و انحراف معیار ۶۰ دارد.
- تابع توزیع نرمال طی فاصلهٔ بین دو ایستگاه نرمال با میانگین ۱۱۵ و انحراف معیار ۳۱ ثانیه می‌باشد.
- میزان توقف اتوبوس در ایستگاه توزیعی نرمال با میانگین ۸۸ و انحراف معیار ۱۷ دارد.
- تابع توزیع تعداد افرادی که در ایستگاه پیاده می‌شوند پواسون با پارامتر ۳ برآورد می‌شود.
- درصد افراد کم‌حوصله در ایستگاه ۲۰ درصد می‌باشد.

ظرفیت اتوبوس‌ها ۵۰ نفر، مدت شبیه‌سازی ۱۵ ساعت و زمان پایانی سیستم ۳۶۰۰ ثانیه می‌باشد.

۴ـگام چهارم: برنامه‌ریزی برای طرح آزمایش

در هر بار اجرای مدل، هر یک از ایستگاهها میانگین زمان انتظار طول صف ویژه‌ای دارد. همچنین ایستگاههای اوّل هر دو مسیر، مقادیر متفاوتی را برای میانگین زمان بیکاری اتوبوسها ارایه می‌دهند. از این‌رو، مناسب است تا بیشترین هر یک از این مقادیر به عنوان معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم مورد توجه قرار گیرند [۱] و [۷].

برای بهبود عملکرد هر سیستم می‌توان تصمیمات گوناگونی را اتخاذ کرد و به اجرا درآورد. در سیستم صف خط اتوبوس می‌توان تصمیماتی به این قرار را اتخاذ کرد:

- افزایش تعداد اتوبوسها
- افزایش ظرفیت هر اتوبوس
- کاهش زمان توقف اتوبوس در هر ایستگاه
- کاهش زمان طی فاصله بین دو ایستگاه

تصمیمی که به تواند هر یک از معیارهای یاد شده را به طور معنی‌داری کمتر نماید تصمیم مناسبتری می‌باشد.

۵ـگام پنجم: تحلیل آماری خروجی‌ها و مقایسه تاثیر تصمیمات

در این مقاله، تأثیر به کارگیری ۳۰ دستگاه اتوبوس در بهبود عملکرد این سیستم بررسی شده است. به این ترتیب این تصمیم‌ها را می‌توان به این صورت نوشت:

تصمیم ۱: به کارگیری ۲۵ دستگاه اتوبوس در این خط

تصمیم ۲: به کارگیری ۳۰ دستگاه اتوبوس در این خط

با به کارگیری یک برنامه رایانه‌ای که مدل را پشتیبانی می‌نماید این تصمیمات با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

مقایسهٔ تصمیمات

برای مقایسهٔ تاثیر تصمیمات، بر هر معیار، از آزمون t زوجی استفاده شده است که نتایج به این قرار می‌باشند. [۵] و [۶].

الف ـ بیشترین میانگین زمان انتظار

همانگونه که در جدول شمارهٔ ۱ مشاهده میشود، با به کارگیری آزمون t زوجی آشکار می‌شود که افزودن ۵ دستگاه به این خط بطور معنی‌داری باعث کاهش این معیار می‌گردد.

ب ـ بیشترین میانگین طول صف

باتوجه به نتایج اجرای برنامه، جدول ۲، و به کارگیری آزمون t زوجی، معلوم می‌شود که به کارگیری ۳۰ دستگاه اتوبوس در این خط به طور معنی‌داری کاهش بیشترین میانگین زمان انتظار را به همراه خواهد داشت.

ج ـ بیشترین میانگین زمان بیکاری اتوبوسها

مقایسهٔ داده‌های جدول ۳، نشان می‌دهد که افزودن ۵ دستگاه اتوبوس به این خط، به طور معنی‌داری تأثیر بر این معیار ندارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

شناخت مناسب از رفتار سیستم باعث می‌گردد تا در جهت بهبود عملکرد آن اقداماتی آگاهانه صورت پذیرد.

علاوه بر تصمیمات یاد شده برای بهبود عملکرد سیستم، می‌توان موارد دیگری را نیز اعمال کرد از جمله:

- ایجاد تسهیلاتی جهت سرعت بخشیدن به سوار و پیاده شدن مسافران
- نصب سیستم اطلاعاتی مناسب مربوط به ایستگاهها و مسیر حرکت در داخل اتوبوسها و ایستگاهها
- تنظیم فاصلهٔ زمانی حرکت اتوبوسها و سرعت آنها باتوجه به شرایط بازه‌های زمانی مختلف

مدل یاد شده را می‌توان به سایر خطوط و دیگر سیستمهای حمل‌ونقل شهری تعمیم داد و در آنها نیز به کار گرفت.

جدول ۱

ردیف	ضریب	L 1 بیشترین، میانگین طول صف	L 2 بیشترین، میانگین طول صف
۱	۱۳۷۹	۳۱،۳۵	۹،۵۳
۲	۳۱۱۳	۱۹،۶۹	۱۱،۳۲
۳	۵۲۵۳	۴۵،۵۸	۴،۸۹
۴	۱۰۳۷	۳۷،۲۲	۱۰،۶۸
۵	۳۵۳۱	۱۰،۲۵	۸،۴۱
۶	۵۳۱۹	۱۷،۰۳	۶،۳۲
۷	۹۳۲۱	۸،۳۴	۲۰،۲۴
۸	۳۲۴۳	۱۹،۴	۱۰،۲۴
۹	۲۳۷۹	۱۸،۶	۱۰،۸۷
۱۰	۱۰۸۹	۲۵،۹۷	۷،۰۷
۱۱	۵۶۳۷	۱۲،۵۷	۱۸،۰۴
۱۲	۳۱۱۳	۲،۸۱	۲،۶۷
۱۳	۲۱۵۷	۱۱،۳۱	۶،۵۹
۱۴	۲۵۷۹	۱۳،۵۶	۹،۱۶
۱۵	۱۱۹۱	۲۹،۶۴	۱۹،۳۲
۱۶	۹۳۹۷	۱۴،۸۲	۵،۱۵
۱۷	۴۹۷۳	۱۰،۷۸	۶،۲۷
۱۸	۲۷۳۹	۷،۰۲	۱۴،۲۳
۱۹	۳۱۷۳	۲۱،۳۴	۲۱،۸۲
۲۰	۷۴۹۳	۵،۸۶	۲،۵۴
۲۱	۹۳۹۳	۱۰،۱۳	۲۳،۳
۲۲	۳۷۱۳	۱۳،۰۴	۲۶،۸۴
۲۳	۷۹۹۷	۱۴،۱۶	۱۱،۲۲
۲۴	۷۳۷۹	۱۹،۸۱	۹،۵۳
۲۵	۵۳۵۳	۲۴،۴۳	۴،۸۸
۲۶	۲۷۹۵	۱۴،۱۷	۱۲،۰۲
۲۷	۷۹۵۳	۱۵،۷۶	۱۳،۰۲
۲۸	۲۴۵۱	۱،۵۲	۱،۴۲
۲۹	۷۱۱۳	۱۸،۷۹	۵،۴۵
۳۰	۷۱۹۷	۱۲،۸۱	۱۲،۴۶
		۱۶،۹۳	میانگین L 1
		۱۰،۸۵	میانگین L 2

جدول ۲

ردیف	ضریب	W 1 بیشترین، میانگین زمان انتظار	W 2 بیشترین، میانگین زمان انتظار
۱	۱۳۷۹	۳۹۷۳	۱۳۹۷
۲	۳۱۱۳	۲۷۰۰	۱۳۷۶
۳	۵۲۵۳	۳۹۹۷	۷۴۵
۴	۱۰۳۷	۳۷۵۳	۱۶۱۴
۵	۳۵۳۱	۱۵۱۶	۱۰۷۹
۶	۵۳۱۹	۱۶۵۴	۹۳۶
۷	۹۳۲۱	۱۲۸۳	۳۰۱۴
۸	۳۲۴۳	۲۹۷۹	۱۰۵۷
۹	۲۳۷۹	۱۰۳۶	۱۳۸۷
۱۰	۱۰۸۹	۲۹۷۳	۱۰۲۲
۱۱	۵۶۳۷	۱۴۴۱	۲۱۹۱
۱۲	۳۱۱۳	۴۳۸	۴۱۱
۱۳	۲۱۵۷	۱۰۵۹	۹۰۲
۱۴	۲۵۷۹	۱۹۹۳	۱۲۳۱
۱۵	۱۱۹۱	۱۸۶۷	۱۶۰۰
۱۶	۹۳۹۷	۲۲۴۷	۷۰۷
۱۷	۴۹۷۳	۱۵۵۹	۸۷۸
۱۸	۲۷۳۹	۱۰۳۶	۱۳۸۷
۱۹	۳۱۷۳	۲۹۰۱	۳۰۸۹
۲۰	۷۴۹۳	۹۰۵	۴۰۹
۲۱	۹۳۹۳	۱۵۶۲	۲۴۹۲
۲۲	۳۷۱۳	۷۴۳	۴۸۴
۲۳	۷۹۹۷	۱۹۶۱	۱۲۸۸
۲۴	۷۳۷۹	۳۹۷۳	۱۳۹۷
۲۵	۵۳۵۳	۳۱۰۴	۶۵۳
۲۶	۲۷۹۵	۲۲۲۶	۱۹۱۶
۲۷	۷۹۵۳	۲۲۹۸	۱۴۹۰
۲۸	۲۴۵۱	۲۰۳	۱۹۷
۲۹	۷۱۱۳	۱۶۷۶	۶۹۲
۳۰	۷۱۹۷	۱۲۶۵	۱۳۵۰
		۲۰۱۰	میانگین W 1
		۱۲۷۹	میانگین W 2

جدول ۳

ردیف	ضریب	I1 بیشترین، میانگین زمان بیکاری اتوبوسها	I2 بیشترین، میانگین زمان بیکاری اتوبوسها
۱	۱۳۷۹	۸۷۵۷	۲۹۱۴
۲	۳۱۱۳	۳۵۹۶	۵۸۹۲
۳	۵۲۵۳	۴۷۸۳	۵۲۶۸
۴	۱۰۳۷	۴۴۴۷	۵۱۷۸
۵	۳۵۳۱	۷۹۸۲	۳۰۹۵
۶	۵۳۱۹	۳۸۹۵	۴۱۱۲
۷	۹۳۲۱	۵۶۱۳	۶۴۴۱
۸	۳۲۴۳	۴۰۱۶	۴۱۸۳
۹	۲۳۷۹	۳۸۲۰	۵۴۳۳
۱۰	۱۰۸۹	۴۵۷۱	۴۸۸۵
۱۱	۵۶۳۷	۴۲۸۳	۴۳۵۹
۱۲	۳۱۱۳	۶۶۰۷	۶۷۹۲
۱۳	۲۱۵۷	۵۳۱۴	۵۲۳۹
۱۴	۲۵۷۹	۵۶۶۲	۳۳۷۰
۱۵	۱۱۹۱	۴۶۹۴	۴۷۹۱
۱۶	۹۳۹۷	۳۵۳۸	۶۸۷۵
۱۷	۴۹۷۳	۵۷۵۹	۴۴۷۱
۱۸	۲۷۳۹	۶۳۱۳	۶۲۳۴
۱۹	۳۱۷۳	۵۲۸۴	۴۴۴۹
۲۰	۷۴۹۳	۴۰۲۶	۴۵۴۱
۲۱	۹۳۹۳	۵۹۴۸	۴۳۵۷
۲۲	۳۷۱۳	۳۵۵۱	۳۹۷۴
۲۳	۷۹۹۷	۵۳۳۱	۶۵۱۹
۲۴	۷۳۷۹	۸۷۵۷	۲۹۱۴
۲۵	۵۳۵۳	۲۶۸۳	۶۴۰۸
۲۶	۲۷۹۵	۵۲۶۵	۵۴۱۸
۲۷	۷۹۵۳	۵۴۸۰	۵۲۱۴
۲۸	۲۴۵۱	۸۸۴۲	۷۵۴۰
۲۹	۷۱۱۳	۴۰۸۴	۵۵۳۴
۳۰	۷۱۹۷	۵۲۶۷	۵۸۱۴
		۵۲۴۲	میانگین $\bar{I}_1$
		۵۰۷۳	میانگین $\bar{I}_2$

منابع و مآخذ

۱ـ دانـــــلد گـــــراس، کـــارل م. هـــریس. (۱۳۷۲). "مـــبانی نـــظریه صـــف". ترجمهٔ غلامحسین شاهکار. تهران: مرکز نشر دانشگاهی.

۲ـ اقدسی، محمد. (۱۳۷۲). "شبیه‌سازی کامپیوتری و زبان SLAM". چاپ اول، دانشگاه صنعتی شریف.

۳ـ جعفر نژاد، احمد. (۱۳۷۶). "مدیریت تولید و عملیات". تهران : دانشکده مدیریت دانشگاه تهران.

۴ـ ذاکری بتول. (۱۳۷۷). "روشهای ساخت یافته تجزیه و تحلیل و طراحی سیستم‌های اطلاعاتی". تهران : سازمان مدیریت صنعتی.

۵ـ هاشمی پرست مقتدی (۱۳۶۹)، "آمار و احتمال در مهندسی و علوم". تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

۶ـ صادقی محمود. (۱۳۷۴). "روش ویژه تصمیم‌گیری مدیریتی ـ تجزیه و تحلیل کمی". مجله روش، شماره ۲۶.

7- Martinich K. (1996). "Production and Operations Management, An Applied Modern Approach", John Wiely & Sons.