بهینه‌سازی زمان انتظار در سیستم حمل و نقل عمومی شهری با رویکرد شبیه‌سازی (مطالعه موردی: شرکت واحد اتوبوسرانی اصفهان)

مریم قانعیان[۱]، دکتر طوبی جبروتیان[۲*]

چکیده

سیستم حمل و نقل عمومی نقش مهمی در رشد اقتصادی و توسعه شهری، از جمله کاهش هزینه‌های حمل و نقل و افزایش بهره‌وری ایفا می‌کند. جهت افزایش سهم سیستم‌های حمل و نقل همگانی از سفرهای درون شهری لازم است تا اقداماتی جهت برنامه‌ریزی به سمت بهبود مدیریت و افزایش بهره‌وری آن انجام گیرد. در همین راستا، مهمترین مرحله در روند برنامه‌ریزی این حوزه، اصلاح و یا باز تعریف مسیر خطوط شبکه می‌باشد. این فرایند به عنوان مرحله راهبردی جهت مدیریت برنامه‌های بلند مدت شبکه شناخته می‌شود. با توجه به روند رو به رشد شهرنشینی در شهرهای بزرگ و نیاز به حمل و نقل عمومی مطمئن و کارآمد، بهینه‌سازی و بهبود عملکرد شبکه‌های حمل و نقل عمومی اهمیت بسیاری دارد. برنامه ریزی کارآمد و عملیات سیستم‌های حمل و نقل نیازمند برآورد دقیق زمان انتظار مسافران است. در این مقاله، با استفاده از سیستم صف به بررسی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل عمومی شهری با مطالعه موردی شرکت واحد اتوبوسرانی اصفهان با هدف کاهش زمان انتظار در ایستگاه‌ها پرداخته شده است. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی، عملکرد فعلی شبکه حمل و نقل عمومی شهر اصفهان مورد بررسی قرار گرفته و سپس با اعمال تغییرات به شبکه و تغییر پارامترهای مختلف، راهکارهای بهینه‌سازی زمان انتظار پیشنهاد شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم اتوبوسرانی شهر اصفهان نشان می‌دهد که با اعمال تغییرات اصلاحی در ساختار و زمان‌بندی اتوبوس‌ها، بهبود قابل توجهی در عملکرد شبکه حمل و نقل عمومی ایجاد می‌شود.

واژگان کلیدی: سیستم صف حمل و نقل عمومی شهری، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی زمان انتظار.

طبقه‌بندی JEL: C۱۵، C٤۱، C٥۳، C٦۷.

[۱]- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران
ghaneian۲۰۷@gmail.com

[۲]- استادیار گروه صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول)
jabarootian@iaukhsh.ac.ir

۱- مقدمه

سیستم حمل و نقل یکی از اجزای جدایی ناپذیر اقتصاد است. سلامت اجتماعی و اقتصادی یک منطقه شهری تا حد زیادی بر عملکرد سیستم حمل ونقل آن وابسته است (تانگ و واترز[۱]، ۲۰۰۵). سیستم حمل و نقل نه تنها تسهیلاتی برای جابه‌جایی و تحرک ارائه می‌دهد، بلکه در درازمدت بر الگوهای رشد و سطح فعالیت اقتصادی یک منطقه، از طریق دسترسی به مناطق مختلف تأثیر می‌گذارد (لی و دکاستا[۲]، ۲۰۱۳). سیستم حمل و نقل عمومی نقش مهمی در کاهش هزینه‌های حمل و نقل و افزایش بهره‌وری دارد. یکی از راه‌های افزایش بهره‌وری وکاهش هزینه‌های عملیاتی در دنیای رقابتی، استفاده از مسئله مسیریابی وسایط نقلیه است که کاربرد بسیاری در بهینه کردن هزینه‌های حمل و نقل و زمان انتظاردر ایستگاه‌ها دارد. طراحی شبکه یکی از موضوعات بسیار متداول در همه سطوح تصمیم‌گیری است و از برنامه‌ریزی در سطح راهبردی گرفته تا بررسی مالی تسهیلات عظیمی مانند زیرساختارها، کاربرد دارد. در سطح تاکتیکی نیز بارزترین کاربرد آن در تجدید سازمان خطوط حمل و نقل است (آرچتی و همکاران[۳]، ۲۰۱۶). استراتژی‌های نوین حمل و نقل شهرها مبتنی بر سیاست برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل و نقل همگانی اعم از شبکه حمل ونقل پایدار، بر توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی اتوبوسرانی به جهت افزایش سهم آن از سفرهای درون شهری به عنوان یکی از راهکارهای موثر، تأکید دارد. پس از طراحی و اجرای اولیه شبکه، به دلیل انعطاف ناپذیر بودن دستگاه‌های بهره‌بردار به ندرت می‌توان اقدامات اصلاحی انجام داد و یا در صورت امکان انجام اصلاحات، اجرای آن‌ها مستلزم صرف هزینه و اتلاف وقت خواهد بود. لذا با توجه به محدودیت‌های موجود، برای دستیابی به سطح سرویس مورد نظر، طراحی بهینه شبکه خطوط اتوبوسرانی ضروری می‌باشد. بهینه‌سازی برنامه‌های حمل و نقل عمومی را می‌توان با ارزیابی تغییرات از برنامه‌های فعلی و تعیین تاثیر آنها بر زمان انتظار به‌دست آورد، که منجر به کاهش کلی زمان انتظار می‌شود (سوفیا[۴]، ۲۰۱۸). برنامه‌ریزی کارآمد و عملیات سیستم‌های حمل و نقل عمومی نیازمند برآورد دقیق زمان انتظار است. در این راستا مقاله حاضر در ۵ بخش تدوین شده است. در بخش دوم به پیشینه پژوهش و در بخش سوم به مبانی نظری تحقیق پرداخته می‌شود. در بخش چهارم با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، شبکه حمل و نقل عمومی شهر اصفهان مورد بررسی و عملکرد فعلی شبکه و نقاط ضعف آن شناسایی می‌شود. سپس تغییرات اصلاحی در ساختار و زمان‌بندی اتوبوس‌ها و نحوه اعمال آن‌ها را توضیح می‌دهد. در بخش پایانی این مقاله، نتایج و پیشنهادات جدید برای بهبود عملکرد شبکه‌های حمل و نقل عمومی شهری جهت کاهش زمان انتظار ارائه می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

پژوهش در موضوع شبیه‌سازی و بهینه‌سازی زمان انتظار در سیستم صف حمل و نقل عمومی شهری، در سال‌های اخیر به عنوان یکی از موضوعات مهم در حوزه حمل و نقل عمومی مطرح شده است، که می‌توان به برخی از آن‌ها اشاره کرد:

از میان پژوهش‌های داخلی مرتبط با موضوع مقاله حاضر، می‌توان به مطالعه انجام شده توسط حسینی و همکاران (۱۳۹۵)، ساحل‌گزین و علیمحمدی (۱۳۹۵)، اشاره کرد که با نگاه اقتصادی، به بررسی مدیریت حمل و نقل همگانی به منظور کاهش هزینه‌ها در سیاست‌گذاری‌ها و الویت برنامه‌های شهری و همچنین بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند برای کاهش زمان سفر و افزایش کارایی اقتصادی و زیست محیطی سیستم پرداخته شده است. در مطالعه دیگر برآورد دقیق میانگین زمان انتظار در سیستم حمل و نقل عمومی توسط امین‌ناصری و برادران (۲۰۱۵)، انجام شده است. این تحقیق با استفاده

۱- Tang & Waters
۲- Li & DaCosta
۳- Archetti et al
۴- Sofia

ازیک مدل شبیه‌سازی گسسته، ارزیابی عملکرد فرمول‌های پیشنهادی بررسی شده است. حسن‌نایبی و همکاران (۲۰۱۷)، با توسعه مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی، کاهش زمان انتظار مسافران را بررسی کرده‌اند.

از میان مطالعات خارجی می‌توان به گائو[۱] و همکاران (۲۰۱۱)، اشاره کرد که با استفاده از توزیع‌های احتمال، یک مدل ریاضی برای محاسبه میانگین زمان انتظار مسافران در حمل و نقل عمومی را توسعه داده‌اند. لیز- میلر[۲] (۲۰۱۶)، سه کران پایینی برای میانگین زمان انتظار مسافران را بر اساس تئوری صف، مسئله ایستا و یک مدل فرآیند تصمیم گیری مارکوف، مورد ارزیابی قرار داده است. دینگ[۳] و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل بهینه‌سازی شبکه حمل و نقل عمومی را برای اهداف دوگانه بهینه‌سازی ایستگاه اتوبوس و بهینه‌سازی مسیرهای اتوبوس بر اساس دسترسی مستقیم ایستگاه‌ها ایجاد و شبکه حمل و نقل عمومی را با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر بهینه کرده‌اند. در مقاله وب[۴] و همکاران (۲۰۲۰)، اثرات تاخیر وسیله نقلیه حمل و نقل عمومی بر زمان انتظار مسافر و همچنین اثرات وضعیت حمل و نقل، مکان سوار شدن، زمان و دفعات سفر مورد بررسی قرار گرفته است. داده های مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از فناوری مکان‌یابی خودکار جمع‌آوری شده است. انصاری و همکاران (۲۰۲۱)، زمان انتظار در نظر گرفته شده در مطالعات قبلی را برای یک مورد مسیر (پیشرفت یکنواخت با خدمات قابل اعتماد) به‌طور انتقادی بررسی و یک رویکرد جامع برای تعیین میانگین زمان انتظار مسافران ایجاد کرده‌اند. همچنین انصاری و همکاران (۲۰۲۲)، یک برآورد دقیق و فرمول‌بندی‌های میانگین زمان انتظار جدیدی را برای سیستم‌های حمل و نقل مختلف به‌دست آورده‌اند.

در مقایسه با تحقیقات پیشین، مقاله حاضر با توجه به داده‌های شرکت واحد اتوبوسرانی اصفهان و با استفاده از شبیه‌سازی، عملکرد فعلی و بهبود یافته شبکه حمل و نقل عمومی شهر اصفهان مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات و راه‌کارهای بهینه‌سازی زمان انتظار مورد استفاده، نخستین بار پیشنهاد شده و جزیی از نوآوری مقاله است.

۳- مبانی نظری

در این بخش از نوشتار برای درک بهتر مطلب، معیارهای عملکرد، مشخصه‌ها ، متغیرها و رویدادهای سیستم صف خطوط اتوبوسرانی بررسی می‌شوند.

۳-۱- آشنایی با سیستم صف خط اتوبوسرانی

مدل‌های صف صرف نظر از اینکه از طریق ریاضی حل یا از طریق شبیه‌سازی تحلیل شوند، ابزار نیرومندی را برای طراحی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های صف در اختیار تحلیل‌گر قرار می‌دهند. سیستم صف خط اتوبوسرانی، سیستمی خدماتی است، که افراد برای جابه‌جایی و رسیدن به مقاصد خود به ایستگاه‌های اتوبوس مراجعه می‌نمایند و پس از رسیدن به مقصد، اتوبوس‌ها و ایستگاه‌ها را ترک می‌کنند. افرادی که وارد ایستگاه‌ها می‌شوند تا به مقصد برسند، اتوبوس‌هایی که برای جابه‌جا کردن مسافران استفاده می‌شوند و ایستگاه‌هایی که مسافران در آنجا سوار و پیاده می‌شوند، این سیستم را شکل می‌دهند. در کنار این سه جزء اصلی، اجزاء دیگری از جمله باجه‌های فروش بلیط، کنترل کننده‌های خطوط و مسیرهای حرکت قرار دارند. البته اجزاء اصلی، بیشترین تعامل را با یکدیگر دارند و بر رفتار سیستم تأثیر می‌گذارند.

۳-۲- 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. بیشترین میانگین طول صف، بیشترین میانگین زمان انتظار یک مسافر و بیشترین میانگین زمان بی‌کاری اتوبوس‌ها، از جمله معیارهای مورد نظر می‌باشند. سیستم صف خط اتوبوسرانی، چند ایستگاه را

۱- Guo et al
۲- Lees-Miller
۳- Ding et al
۴- Webb et al

شامل می‌شود. هر ایستگاه، دارای میانگین طول صف و میانگین زمان انتظار ویژه‌ای می‌باشد. همچنین اولین ایستگاه هر دو مسیر رفت و برگشت، میانگین زمان بی‌کاری متفاوتی را برای اتوبوس‌ها ارائه می‌دهند. با برگزیدن بیشترین مقدار این اعداد، معیارهای مناسبی برای عملکرد سیستم پدید می‌آید. با به‌کارگیری تصمیمات گوناگون، تصمیمی که بتواند معیارهای فوق را به طور معنی‌داری کمینه نماید، به عنوان تصمیم مناسب برگزیده می‌شود (گراس و هریس[۱]، ۲۰۱۸).

۳-۳- بررسی مشخصه‌های سیستم صف خطوط اتوبوسرانی

در این قسمت نحوه ورود مسافران، سرویس‌دهی اتوبوس‌ها، نظم صف و ظرفیت سیستم بررسی می‌شوند:

الف- نحوه ورود مسافران و بازخورد آن‌ها پس از ورود: افراد ممکن است به صورت انفرادی یا گروهی به یک سیستم وارد شوند. در سیستم صف خطوط 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، این مسافر کم‌حوصله نامیده می‌شود. باید در نظر 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- نحوه سرویس‌دهی اتوبوس‌ها: درسیستم صف اتوبوسرانی شهری، سرویس‌دهی به شکل گروهی و با توجه به ظرفیت اتوبوس‌ها صورت می‌گیرد و دسته‌ای از مسافران همزمان جابه‌جا می‌شوند. زمان جابه‌جایی افراد از ایستگاهی به ایستگاه 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.

ج- چگونگی نظم صف: در سیستم صف اتوبوسرانی، روشهای گوناگونی در نظم صف مشاهده می‌شود. اغلب در اولین ایستگاه روش FIFO[۲] و در ایستگاه های میانی FIFO و RSS[۳] اعمال می‌گردد. در برخی ایستگاه‌ها به ویژه ایستگاه اول، در کنار صف اصلی، صف دیگری موسوم به صف سرپایی تشکیل می‌شود. زمانی که افراد منتظر در صف اصلی از سوار شدن منصرف می‌شوند، افراد این صف اقدام به سوار شدن می‌نمایند.

د- 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 نحوه قرار گرفتن مسافران در یک اتوبوس، ظرفیت‌های گوناگون را پدید می‌آورند.

ه- تعداد سرویس‌دهندگان: در سیستم صف اتوبوسرانی، تعداد سرویس‌دهندگان برابر است با تعداد اتوبوس‌هایی که یکی پس از دیگری از ایستگاه‌های اوّل به حرکت در می‌آیند و اقدام به جابه‌جایی مسافر می‌کنند.

و- 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 سریع السیر وجود دارند. اتوبوس‌های عادی در تمامی ایستگاه‌ها و اتوبوس‌های سریع السیر تنها در برخی ایستگاه‌ها توقف می‌نمایند.

ز- 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 به‌پردازند.

۱- Gross & Harris
۲ -First in First out
۳- Random Service Selection

٤-۳- متغیّرها و ثابت‌ها

در این قسمت متغیرها و ثابت‌های سیستم به‌صورت زیر معرفی می‌شوند:

الف- متغیّرهای وضعیت سیستم: متغیّرهایی هستند که حالات و چگونگی سیستم را در یک مقطع زمانی، توصیف می‌کند. تعداد افراد حاضر در هر اتوبوس، تعداد افراد حاضر در هر ایستگاه و اتوبوس‌های حاضر در هر ایستگاه، متغیّرهای وضعیت سیستم هستند.

ب- متغیّرهای تصادفی سیستم: متغیّرهایی هستند که لازم است تابع توزیع احتمال هر یک مشخص گردد، فاصلهٔ زمانی بین ورود دو مسافر متوالی به هر ایستگاه، زمان توقف اتوبوس در هر ایستگاه، زمان طی کردن فاصله بین دو ایستگاه، زمان بین رسیدن اتوبوس به ایستگاه آخر مسیر و قرار گرفتن در صف اتوبوس‌های مسیر عکس، زمانی که افراد کم‌حوصله پس از قرار گرفتن در صف، آن را ترک می‌کنند وتعداد افرادی که در هر ایستگاه پیاده می‌شوند، متغیرهای تصادفی سیستم هستند.

ت- شمارنده‌های آماری: متغیّرهایی هستند که برای نگهداری اطلاعات آماری عملکرد سیستم، به کار می‌روند (ذاکری، ۱۳۷۷). میزان کل بی‌کاری اتوبوس‌ها در ایستگاه اول رفت (برگشت)، تعداد کل اتوبوس‌های وارد شده به ایستگاه اول رفت(برگشت)، تعداد کل افرادی که سوار اتوبوس شده‌اند، تعداد کل افرادی کم‌حوصله، مجموع زمان‌های انتظار افراد در هر ایستگاه، تعداد کل افراد مراجعه کننده به هر ایستگاه، میانگین طول صف برای هر ایستگاه، از جمله متغیرهای آماری هستند.

ث- 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. ظرفیت اتوبوس‌ها، تعداد اتوبوس‌ها وتعداد ایستگاه‌های مسیر رفت (برگشت)، ثابت‌های سیستم هستند.

٥-۳- 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 بر شمرد، که به‌صورت زیر اشاره می‌شود (فیضی و الهیاری، ۱۳۸۱):

الف- رویدادهای تأثیرگذار: ورود فردی یا گروهی مسافر به ایستگاه، خروج مسافر کم‌حوصله از ایستگاه، رسیدن اتوبوس به ایستگاه، حرکت اتوبوس از ایستگاه و پیاده شدن مسافر از اتوبوس در ایستگاه، رویدادهای تأثیرگذار هستند.

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 جابه جایی مسافران و وجود ترافیک بر اثر تصادف، بارندگی و شلوغی خیابان‌ها، از جمله رویدادهای کم اثر هستند. از موارد بی‌شمار دیگری نیز می‌توان یاد کرد که می‌توان آنها را نادیده انگاشت و یا به واسطهٔ تمهیداتی، تحت کنترل درآورد.

٤- روش اجرای پژوهش

در صورت تعیین شدن نحوه ارتباط بین اجزاء، رویدادها و متغیّرها و چگونگی تأثیرگذاری رویدادها بر متغیّرها به کمک قواعد تصمیم‌گیری، می‌توان با استفاده از نرم‌افزار آرنا[۱]، فرایند حمل و نقل عمومی شهری را شبیه‌سازی نمود. در این مرحله، با بررسی دقیق رویدادهای اساسی، به ساخت مدل می‌پردازیم. پیش از آن، مناسب است تا پیش‌فرض‌های ساخت مدل را روشن سازیم.

الف- پیش‌فرض‌های ساخت مدل: افراد به شکل انفرادی به سیستم وارد می‌شوند (این پیش فرض خللی در مدل‌سازی ایجاد نمی‌کند). سرویس‌دهی و جابه‌جایی مسافران به شکل گروهی می‌باشد. تأثیر شدت ترافیک، تصادفات و دیگر عوامل بر سرعت جابه‌جایی، به طور غیر مستقیم بر مدل اعمال می‌گردد. تمام صف‌ها دارای نظم FIFO هستند. گنجایش اتوبوس‌ها یک

[۱]- Arena

عدد ثابت فرض می‌شود. سیستم به شکل رفت و برگشتی و یا به عبارت دیگر حلقوی می‌باشد (جعفرنژاد، ۱۳۷۶). تمامی اتوبوس‌ها از لحاظ تعداد مراحل سرویس از نوع عادی می‌باشند.

ب- شرایط فرض شده برای زمان صفر: برخی خطوط، هنگام شروع کار، تنها تا مدّتی از یک سو 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 می‌شود که در آغاز، تعدادی اتوبوس در ابتدای مسیر رفت و تعدادی در ابتدای مسیر برگشت قرار گرفته‌اند. همچنین در ساعت صفر، یک اتوبوس در ایستگاه اوّل رفت و یک اتوبوس در ایستگاه اوّل 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.

٤-١- رویداد ورود مسافران به ایستگاه

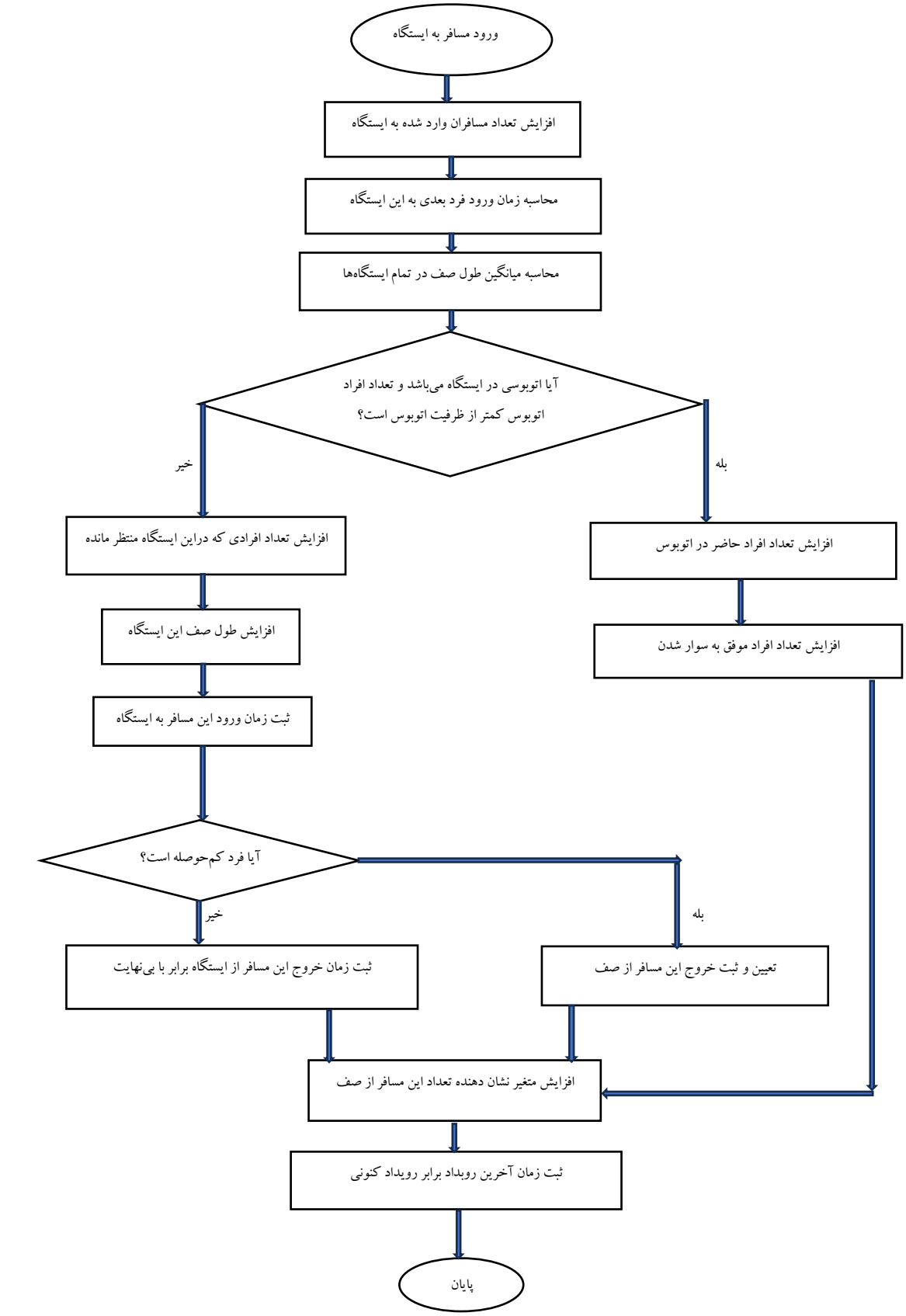
در لحظه ورود یک یا چند مسافر به ایستگاه، ممکن است متغیّرهای وضعیت تعداد مسافران منتظر در صف و تعداد مسافران حاضر در اتوبوس تغییر نمایند. در این هنگام، قواعد خاص این رویداد، چگونگی تحت تأثیر قرار گرفتن وضعیت را نشان خواهند داد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود به هنگام وقوع این رویداد لازم است، میانگین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

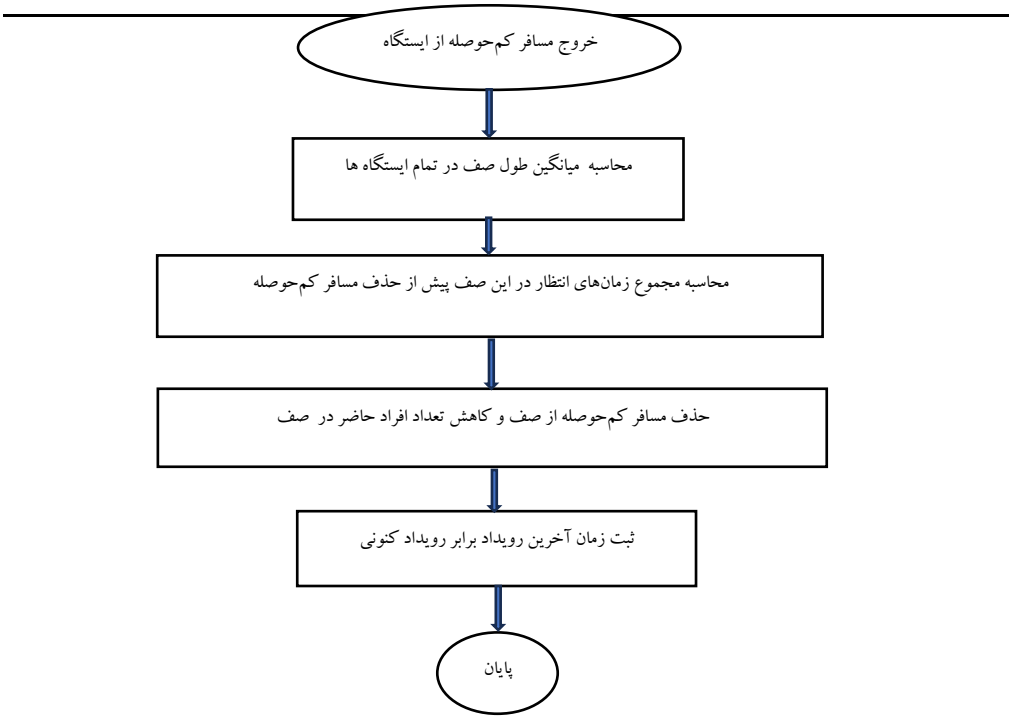
ب- اگر در لحظه ورود فرد، اتوبوسی در ایستگاه باشد ولی ظرفیت پاسخ‌گوی او نباشد و یا به هنگام ورود افراد، اتوبوسی در ایستگاه نباشد، فرد در صف قرار می‌گیرد. بنابراین متغیّر وضعیت تعداد افراد منتظر در صف ایستگاه افزایش می‌یابد. زمان ورود او در آرایهٔ زمان ثبت می‌گردد و تعداد کل افراد معطل شده در این صف افزایش می‌یابد.

٤-٢- رویداد خروج مسافر کم‌حوصله از صف ایستگاه

برخی از مسافران در لحظه 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 گاهی اوقات مشاهده می‌شود و درصد بالایی از مسافران را شامل می‌شود. بنابراین چشم‌پوشی از آن می‌تواند، مدل را از نظر صحت عمل در معرض چالش قرار دهد. با خروج مسافر کم‌حوصله از ایستگاه باید متغیر 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 و مجموع زمان‌های انتظار این صف با توجه به زمان کنونی به هنگام گردد. با توجه به مشاهدات مستقیم که حاکی از ۲۰ درصد کم‌حوصلگی در میان مسافران است، یک عدد تصادفی یکنواخت از بازه [۰،۱) انتخاب می‌کنیم. در صورتی که عدد انتخابی کمتر یا مساوی ۰/۲ بود، وی کم‌حوصله می‌باشد. در شکل ۱ رویداد ورود مسافران به ایستگاه و در شکل ۲ رویداد خروج مسافر کم‌حوصله نشان داده شده است.



شکل ۱- فلوچارت رویداد ورود مسافر به ایستگاه

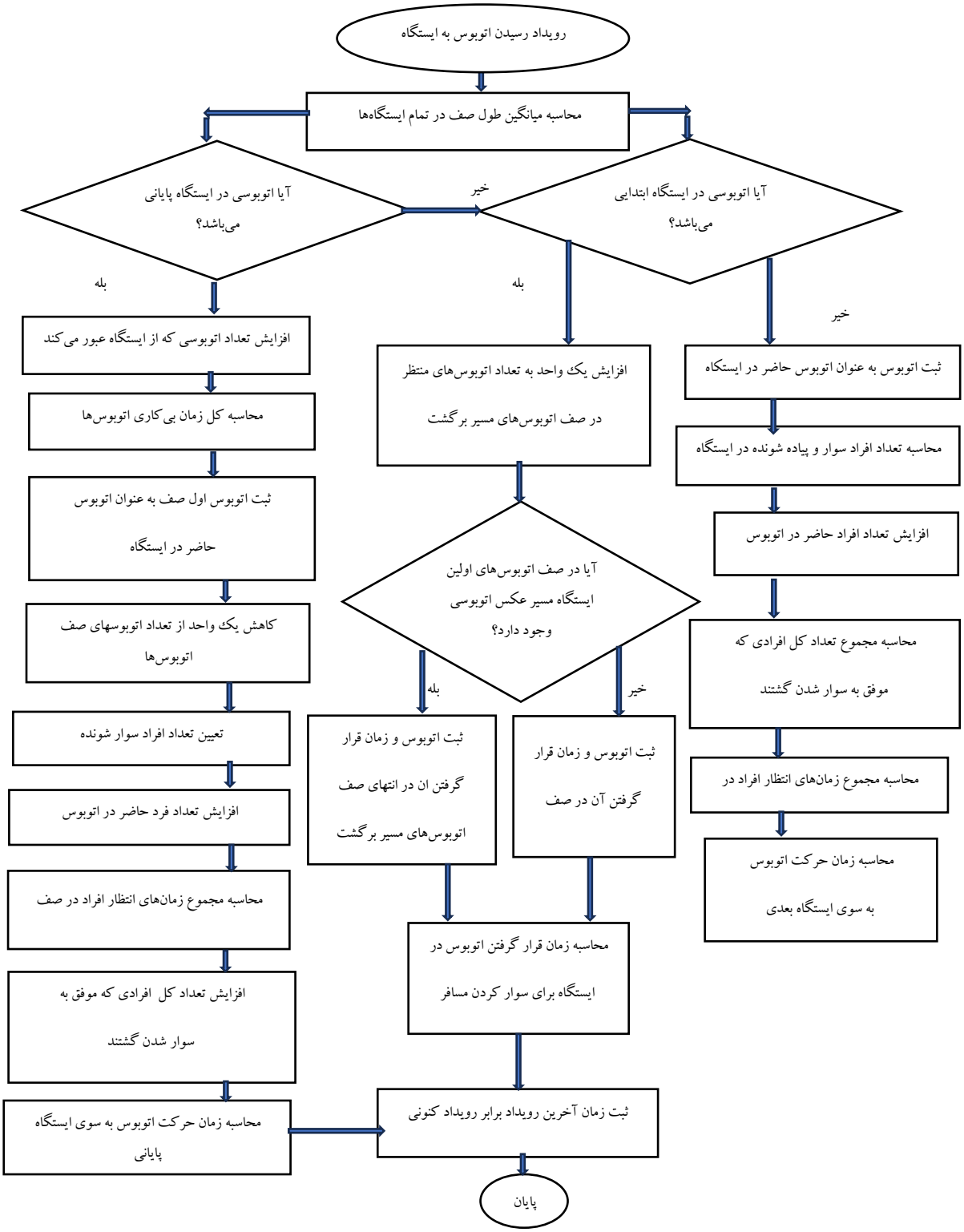


شکل ۲- فلوچارت رویداد خروج مسافر کم‌حوصله از ایستگاه

٤-۳- 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 می‌شوند 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 می‌باشد. در این رویداد باید متوسط طول تمامی صف‌ها محاسبه شود و زمان آخرین رویداد برابر زمان کنونی ثبت گردد. واکنش سیستم چنین است:

اگر اتوبوس از صف اتوبوس‌های اوّلین ایستگاه، به ایستگاه اوّل رفت (برگشت) برسد، به تعداد اتوبوس‌هایی که در ایستگاه قرار گرفته‌اند، یک واحد اضافه می‌شود و میزان کل زمان انتظار اتوبوس‌ها در صف اتوبوس‌های اوّلین ایستگاه محاسبه می‌گردد. اگر اتوبوسی به عنوان اتوبوس حاضر در ایستگاه در نظر گرفته شود، تعداد افراد حاضر در اتوبوس و تعداد افراد پیاده شونده صفر است. زمان حرکت اتوبوس به سوی ایستگاه بعدی تعیین می‌شود. اگر تعداد افراد صف ایستگاه بیشتر از ظرفیت اتوبوس باشد، تعداد سوار شونده‌ها برابر ظرفیت خواهد بود. اگر تعداد افراد صف ایستگاه بیشتر از ظرفیت اتوبوس نباشد، تعداد سوار شونده‌ها 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. اگر اتوبوس به ایستگاه میانی برسد در این صورت، تعداد افرادی که پیاده می‌شوند توسط تابع توزیع آن تعیین می‌گردد و از تعداد افراد حاضر در اتوبوس کاسته می‌شود. با مقایسهٔ ظرفیت باقی‌مانده و طول صف، تعداد افرادی که می‌توانند سوار شوند، محاسبه می‌گردد.



شکل۳-فلوچارت رویداد رسیدن اتوبوس به ایستگاه

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. در صورتی که اتوبوسی به

ایستگاه پایانی برسد، پس از رسیدن به ایستگاه پایانی مسیر و پیاده کردن تمامی مسافران تغییر مسیر می‌دهد و قبل از قرار گرفتن در داخل ایستگاه برای سوار کردن مسافر، در صف مخصوص اتوبوس‌های ایستگاه، اول مسیر عکس، قرار می‌گیرد. در این‌صورت، 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. 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. 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، تمامی افراد پیاده می‌شوند و کسی سوار نمی‌شود. زمان رسیدن اتوبوس به داخل ایستگاه اوّل مسیر عکس، تا به هنگام قرار گرفتن اتوبوس در ابتدای صف اتوبوس‌های مسیر عکس به تعویق می‌افتد.

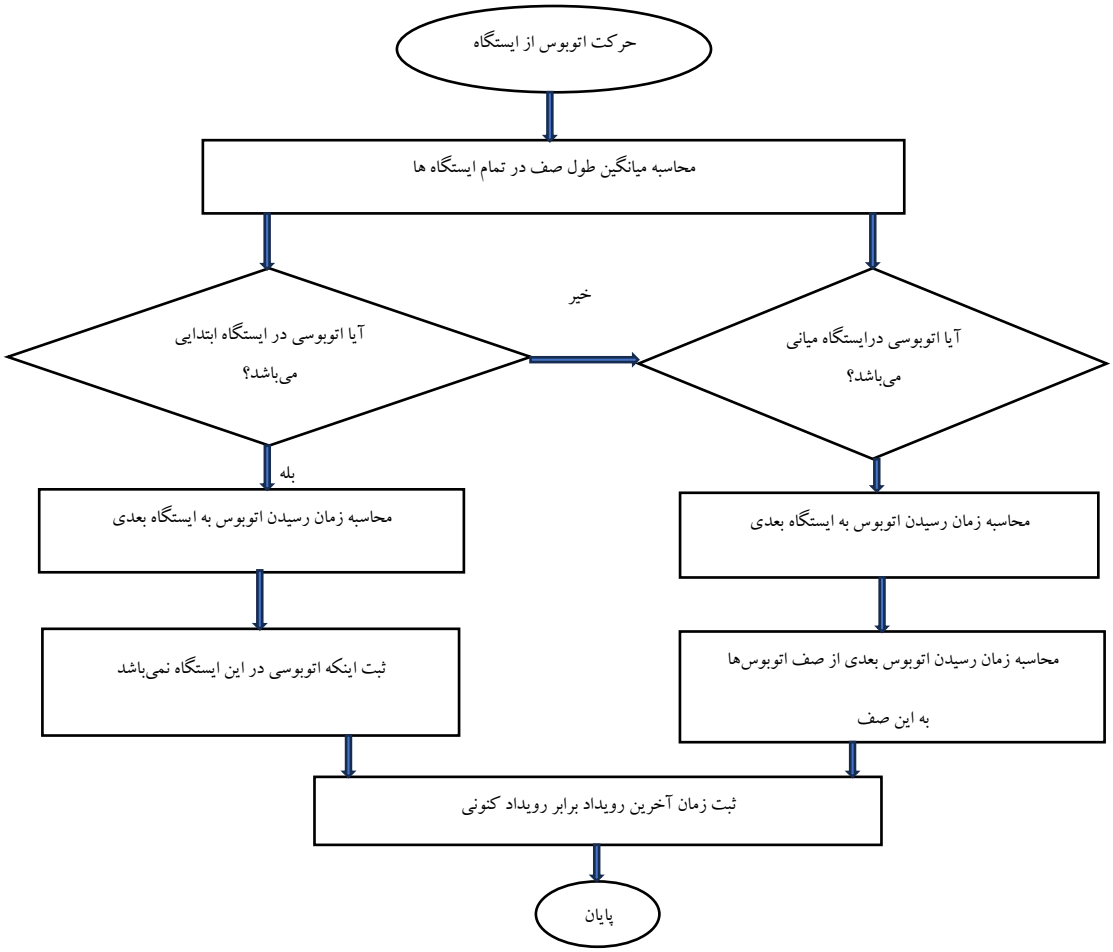
٤-٤- رویداد حرکت اتوبوس از ایستگاه

در صورتی اتوبوس از ایستگاه اوّل رفت (برگشت) حرکت کند، دو حالت زیر را در نظر گرفته می‌شود:

الف- اگر اتوبوسی در صف اتوبوس‌های ایستگاه وجود داشته باشد، زمان رسیدن اتوبوس بعدی به ایستگاه مشخص می‌گردد.

ب- اگر اتوبوسی در صف اتوبوس‌های ایستگاه وجود نداشته باشد، زمان رسیدن تمام اتوبوس‌ها به این ایستگاه، عددی بزرگ تعیین می‌گردد.

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 ٤- فلوچارت رویداد حرکت اتوبوس از ایستگاه

٤-٥ پیاده سازی مدل در یک خط اتوبوسرانی

هدف اصلی شبیه سازی، بدست آوردن زمان انتظار مسافران در ایستگاه و همچنین زمان انتظار اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها می‌باشد. این شبیه‌سازی با توجه به داده‌های شرکت واحد اتوبوسرانی اصفهان در مسیر ایستگاه‌های قدس-صفه (خط ۳۴) و با استفاده از نرم افزار آرنا، دارای ویژگی‌های زیر است:

- تعداد ۳۵ اتوبوس با ۴۳ ایستگاه رفت، ۳۷ ایستگاه برگشت و ۱۰۰ نفر مسافر می‌باشد.
- درصد افراد کم حوصله در ایستگاه ۲۰ درصد می باشد .
- ظرفیت اتوبوس‌ها ۵۰ نفر، مدت شبیه‌سازی ۱۶ ساعت و زمان پایانی سیستم ۳۶۰۰ ثانیه می‌باشد.
- ایستگاه‌های اول هر دو مسیر، مقدارهای متفاوتی برای میانگین زمان بی‌کاری اتوبوس‌ها دارند. به همین دلیل مناسب است تا بیشترین مقدار به عنوان معیار ارزیابی عملکرد سیستم مورد استفاده قرار گیرد.
- در حالت فعلی اتوبوس‌ها در ایستگاه‌های پایانی ۶۰ دقیقه استراحت، بعد از هر رفت دارند و همچنین در ایستگاه‌هایی هم که مسافر نیست توقف دارند.
- در حالت بهبود یافته، هر اتوبوس در ایستگاه‌های پایانی فقط نیم ساعت استراحت داشته باشد و همچنین در ایستگاه‌هایی هم که مسافر نیست توقف نداشته باشند.
- اتوبوس‌ها با احتمال ۳/۵ درصد به هر ایستگاه وارد می‌شوند. مسافران نیز در بازه‌های زمانی مختلف و در مدت‌های بین دو ورود به اتوبوس وارد می‌شوند.

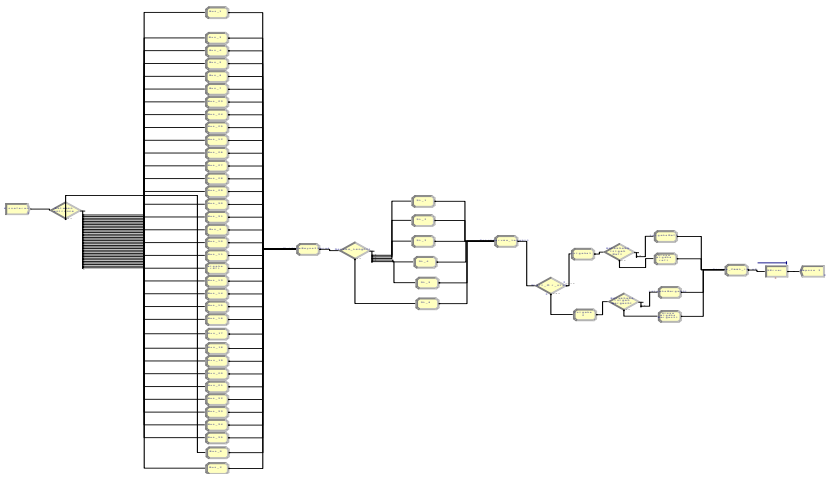
همچنین جدول مورد نیاز برای محاسبه زمان انتظار مسافران و زمان انتظار اتوبوس در ایستگاه‌ها به شرح زیر است:

جدول ۱- زمان‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی

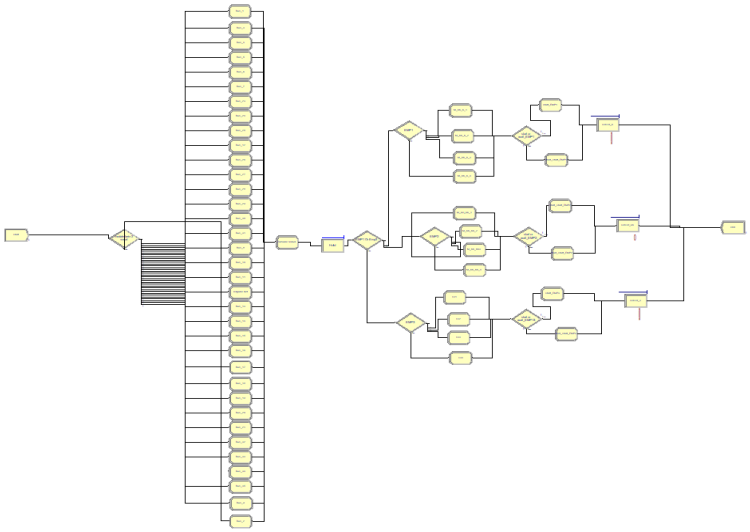
پارامتر	زمان‌های مورد نیاز
توزیع زمانی بین ورود و خروج افراد	نرمال، میانگین ۲۶۷ ثانیه، انحراف معیار ۳۲ ثانیه
توزیع زمانی فاصله پیموده شده توسط اتوبوس پس از رسیدن به انتهای مسیر	نرمال، میانگین ۳۵۰ ثانیه، انحراف معیار ۷۵ ثانیه
فاصله زمانی بین دو ایستگاه	نرمال، میانگین ۱۲۴ ثانیه، انحراف معیار ۲۲/۲۵ ثانیه
توزیع زمانی توقف اتوبوس در ایستگاه	نرمال، میانگین ۶۲ ثانیه، انحراف معیار ۱۲/۲۵ ثانیه
فاصله زمانی ورود دو مسافر متوالی	نمایی، پارامتر ۲۷ ثانیه
توزیع زمانی قرار گرفتن اتوبوس در ابتدای صف تا ایستگاه	نرمال، میانگین ۵۲ ثانیه، انحراف معیار ۵۱ ثانیه

منبع: یافته‌های پژوهش

در شکل ۵، مدل نهایی پس از طراحی در نرم افزار آرنا و در شکل ۶ وضعیت بهینه نمایش داده شده است.



شکل ۵- شبیه‌سازی وضعیت فعلی



شکل ٦- شبیه‌سازی وضعیت بهینه

جدول ۲، نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی بهینه شده توسط نرم‌افزار آرنا را نشان می‌دهد و مقایسه میانگین زمان انتظار وضعیت فعلی و بهبود یافته مورد بحث قرار گرفته است.

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی و مقایسه وضعیت فعلی و بهبود یافته

ویژگی‌های شبیه‌سازی	وضعیت فعلی	وضعیت بهینه شده
میانگین زمان انتظار هر مسافردر ایستگاه رفت (ثانیه)	۶۷/۶	۲۰/۸
میانگین زمان انتظار هر اتوبوس در ایستگاه رفت (ثانیه)	۱۱۷/۴	۵۵/۶
میانگین زمان انتظار هر مسافردر ایستگاه برگشت (ثانیه)	۶۹/۸	۲۲/۱
میانگین زمان انتظار هر اتوبوس در ایستگاه برگشت (ثانیه)	۱۱۸/۹	۵۶/۱
مجموع زمان انتظار کل اتوبوس‌ها در ایستگاه رفت (ثانیه)	۴۱۵۴۰	۱۸۶۰۰
مجموع زمان انتظار کل اتوبوس‌ها در ایستگاه برگشت (ثانیه)	۴۳۷۶۰	۱۹۳۲۰
مجموع زمان انتظار کل مسافران در ایستگاه رفت (ثانیه)	۶۷۶۰	۲۰۸۰
مجموع زمان انتظار کل مسافران در ایستگاه برگشت (ثانیه)	۶۹۸۰	۲۲۱۰
زمان بین دو ورود	۲۳/۴	۷/۸

منبع: یافته‌های پژوهش

با توجه به جدول فوق، شبیه‌سازی وضعیت بهینه، با بهبود شرایط شبیه سازی، میانگین زمان انتظار مسافران، میانگین زمان انتظار اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها و زمان بین دو ورود به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مقاله حاضر، با هدف کاهش زمان انتظار مسافران و اتوبوس‌ها در سیستم اتوبوسرانی شهر اصفهان، بهینه‌سازی زمان انتظار شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، با استفاده از نرم‌افزار آرنا و با توجه به اطلاعات داده شده، متغیرهای مورد نیاز شبیه‌سازی، شامل تعداد مسافران، تعداد ایستگاه‌ها، فاصله زمانی بین ورود دو مسافر متوالی و فاصله زمانی بین دو اتوبوس متوالی، تعریف شده‌اند. همچنین، با توجه به توزیع‌های احتمالی مشخص شده، توزیع‌های نمایی برای فواصل زمانی بین ورود مسافران و فواصل زمانی بین دو اتوبوس متوالی تعریف شده‌اند. در این شبیه‌سازی، به هر ایستگاه، در هر لحظه، احتمال ورود یک مسافر وجود دارد. همچنین احتمال اینکه

یک اتوبوس به یک ایستگاه برسد و در آنجا توقف کند، برابر با یک پارامتر مشخص است. با توجه به این پارامتر، احتمال توقف اتوبوس در هر ایستگاه، با استفاده از توزیع یکنواخت تعریف شده است. در شبیه‌سازی بهبودیافته، اتوبوس‌ها در ایستگاه‌های پایانی نیم ساعت استراحت می‌کنند و در ایستگاه‌هایی که مسافر نیست، توقف نمی‌کنند. همچنین، در هنگام توقف در ایستگاه، زمان لازم برای بارگیری و تخلیه مسافران، با توجه به تعداد مسافران و فاصله ایستگاه از مقصد، محاسبه شده و به زمان توقف اضافه می‌شود.

با اجرای شبیه‌سازی، میانگین زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها و میانگین زمان انتظار اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها، نسبت به شبیه‌سازی اولیه، بهبود قابل توجهی داشته‌اند. در حالت فعلی اتوبوس‌ها در ایستگاه‌های پایانی ۶۰ دقیقه استراحت بعد از هر رفت دارند و همچنین در ایستگاه‌هایی هم که مسافر نیست توقف دارند. با این برنامه‌ریزی هر اتوبوس در هر زمان کاری فقط دو بار موفق به رفت و برگشت می‌شود. در حالی که بر اساس برنامه شبیه‌سازی شده اگر هر اتوبوس در ایستگاه‌های پایانی فقط نیم ساعت استراحت داشته باشد و همچنین در ایستگاه‌هایی هم که مسافر نیست توقف نداشته باشد قطعا می‌تواند در هر شیفت کاری سه بار مسیر رفت و برگشت را طی کند و با این شرایط می‌توان تعداد اتوبوس‌های موجود در مسیر را کاهش داد و با بهینه‌سازی زمان‌ها از تعداد کمتری اتوبوس استفاده کرد، همچنین راننده‌های کمتر و با این شرایط از اتوبوس‌های اضافی و راننده‌های آنها در مسیرهایی که نیاز هست، استفاده کنند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم اتوبوسرانی شهر اصفهان نشان می‌دهد که با اعمال تغییرات اصلاحی در ساختار و زمان‌بندی اتوبوس‌ها، بهبود قابل توجهی در عملکرد شبکه حمل و نقل عمومی ایجاد می‌شود. در نتیجه انجام شبیه‌سازی بهبودیافته، به عنوان یکی از روش‌های بهبود حمل و نقل عمومی در شهراصفهان، پیشنهاد می‌شود. این نتایج، به مدیران شرکت‌های حمل و نقل عمومی در ارائه راهکارهای بهینه‌سازی و بهبود عملکرد شبکه‌های حمل و نقل عمومی در شهرهای دیگر کمک می‌کند.

در مورد موضوع تحقیق پیشنهاد می‌شود که از روش مدل‌سازی پویایی‌های سیستم استفاده و نتایج را براساس آن بررسی کرد. همچنین تحلیل و بررسی نتایج طرح با عدم قطعیت داده‌ها، تغییر سایر متغیرهای کلیدی، تغییر هم‌زمان چندین پارامتر و اثرات این تغییرها بر کل سیستم از جمله راهکارهای پیشنهادی برای بهینه‌سازی زمان انتظاردر سیستم‌های حمل و نقل عمومی شهری است.

منابع

جعفرنژاد، احمد، (۱۳۷۶). مدیریت تولید و عملیات، تهران: مرکز نشر دانشگاهی، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران.

حسینی، منصور، آریانا، محمد، آبرودی، مجتبی، (۱۳۹۵). مدیریت حمل و نقل شهری با نگاه اقتصادی، اقتصاد و مدیریت شهری، ۴، ۱۱۱-۹۵.

ذاکری، بتول، (۱۳۷۷). روش‌های ساخت‌یافته تجزیه و تحلیل و طراحی سیستم‌های اطلاعاتی، تهران سازمان مدیریت صنعتی.

ساحل‌گزین، محمدرضا، علیمحمدی، عباس، (۱۳۹۵). بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت با استفاده از الگوریتم برای کاهش زمان سفر و افزایش کارآیی اقتصادی و زیست محیطی سیستم، مهندسی حمل و نقل، ۸، ۵۱-۲۹.

فیضی، کامران، الهیاری، احمد، (۱۳۸۱). شبیه‌سازی سیستم صف اتوبوسرانی، فصلنامه مطالعات مدیریت، ۳۳، ۹۳-۶۹.

گراس، دانولد، (۱۳۷۲). مبانی نظریه صف، ترجمه غلامحسین شاهکار. تهران: مرکز نشر دانشگاهی.

Amin-Naseri, M.R., Baradaran, V., (۲۰۱۵). Accurate Estimation of Average Waiting Time in Public Transportation Systrms, Transportaion Science, ٤٩(٢), ١٦٣-١٧٣.

Ansari Esfeh, M., Wirasinghe, S. C., Saidi, S., (۲۰۲۱). Waiting Time and Headway Modelling for Urban Transit Systems -a critical review and proposed approach, Transport Reviews, ٤١(٢), ١٤١-١٦٣.

Ansari Esfeh, M., Saidi, S., Wirasinghe, S. C., Kattan, L., (۲۰۲۲). Waiting Time and Headway Modeling Considering Unreliability in Transit Service, Transportation Research, ١٥٥, ٢١٩-٢٣٣.

Archetti, C., Savelsbergh, M., Speranza, M. (۲۰۱٦). Vehicle Routing Problem with Occasional Drivers, European Journal of Operational Research, ٢٥٤(٢), ٤٧٢-٤٨٠.

Ding, J., Zhong, Y., Li, B., Zhang, S. (۲۰۱۹). Study on Public Transit Network Optimization Based on Improved K-Shortest Path Algorithm, J. Hefei Univ. Technol. ٤٢, ١٣٨٨–١٣٩٣.

Guo, S., Yu, L., Chen, X., Zhang, Y., (۲۰۱۱). Modelling Waiting Time for Passengers Transferring from Rail to Buses, Transportation Planning and Technology, ٣٤(٨), ٧٩٥-٨٠٩.

Hassannayebia, E., Zegordia, H., Yaghini, M. Amin-Naseri, M.R., (۲۰۱۷), Timetable Optimization Models and Methods for Minimizing Passenger Waiting Time at Public Transit Terminals, Transportation Planning and Technology, ٤٠(٣), ١-٢٧.

Lees-Miller, J. D., (۲۰۱٦). Minimizing Average Passenger Waiting Time in Personal Rapid Transit Systems, Annals of Operations Research, ٢٣٦, ٤٠٥–٤٢٤.

Li, Y., DaCosta, M. N., (۲۰۱۳). Transportation and Income Inequality in China: ١٩٧٨– ٢٠٠٧, Transportation Research Part, A: Policy and Practice, ٥٦-٧١.

Sofia, Z. M., (۲۰۱۸). Efficient Optimization of Schedules in a Public Transportation System. United States, Patent Application Publication.

Tang, K. X., Waters, N. M., (۲۰۰٥). The Internet, GIS and Public Participation in Transportation Planning, Progress in Planning, ٦٤(١), ٧-٦٢.

Webb, A., Kumar, P., Khani, A. (۲۰۲۰). Estimation of Passenger Waiting Time Using Automatically Collected Transit Data, Public Transport, ۱۲, ۲۹۹–۳۱۱.

Optimizing Waiting Time in Urban Public Transportation System Using Simulation Approach (Case Study: Isfahan Bus Company)

Maryam Ghaneian[۱], Tooba Jabarootian[۲*]

Abstract
Public transportation system plays an important role in economic growth and urban development, including reducing transportation costs and increasing efficiency. To increase the share of public transportation systems in urban travel, measures need to be taken to improve their management and increase their efficiency. In this regard, the most important step in planning for this area is to revise or redefine the routes of the network lines. This process is known as a strategic step in managing long-term programs for the network. Given the growing trend of urbanization in large cities and the need for reliable and efficient public transportation, optimizing and improving the performance of public transportation networks is of great importance. Efficient planning and operation of transportation systems require accurate estimation of passenger waiting times. In this article, using a queuing system, simulation and optimization of urban public transportation system have been investigated with a case study of the Isfahan Bus Company in order to reduce waiting times at bus stops. In this study, first, the current performance of Isfahan's public transportation network was examined using simulation, and then by making changes to the network and various parameters, optimal solutions for reducing waiting times were proposed. The results of the simulation of Isfahan's bus transportation system show that significant improvements in the performance of the public transportation network can be achieved by making corrective changes to the structure and scheduling of the buses.
Keywords: urban public transportation queuing system, simulation, optimization of waiting time.
JEL Classification: C۱۵, C۴۱, C۵۳, C۶۷.

[۱] M.Sc. student in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran Email: ghaneian۲۰۷@gmail.com
[۲]* Assistant Professor, Department of Industries, Faculty of Engineering, KhomeiniShahr Branch, Islamic Azad University, KhomeiniShahr, Isfahan, Iran (Corresponding Author)
Email: jabarootian@iaukhsh.ac.ir