مدل‌سازی تردد ناوگان اتوبوسرانی شهری بر اساس داده‌های موقعیت مکانی موردکاوی: خطوط اتوبوسرانی شهری تهران

آرمان ساجدی نژاد[۱]، عرفان حسن‌نایبی[۲]، جعفر حیدری[۳*] و جعفر رزمی[۴]

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:
حمل و نقل عمومی،
اتوبوس‌رانی شهری،
پیش‌بینی زمان سفر،
شبیه‌سازی،
داده موقعیت مکانی.

چکیده

حمل و نقل عمومی یکی از شاخص‌های توسعه‌یافتگی و از جمله مهمترین جوانب در مدیریت کلان‌شهرهاست. خطوط اتوبوسرانی از جمله پرکاربردترین و شناخته‌شده‌ترین شیوه‌های حمل و نقل عمومی محسوب می‌شوند. امروزه سامانه‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات به منظور ثبت اطلاعات برخط از وضعیت ناوگان و با اهداف متنوعی همچون اطلاع‌رسانی، پیش‌بینی زمان سفر، برنامه‌ریزی و بهبود عملکرد در خدمت حوزه مدیریت شهری می‌باشند. تحلیل حجم بالای داده‌های ثبت شده از سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی و موقعیت‌یاب خودکار نیازمند بکارگیری مدل‌هایی کارا است؛ به نحوی که اطلاعات حاصل بتوانند در مدیریت، برنامه‌ریزی و بهبود عملکرد خطوط اتوبوس‌رانی مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق، مدل‌سازی تردد ناوگان اتوبوسرانی شهری با استفاده از داده‌های موقعیت مکانی و به منظور تخمین زمان سفر و ارزیابی شاخص های کلیدی عملکردی ارائه شده است. بر اساس مدل پیشنهادی امکان تخصیص مناسب ناوگان در ساعات مختلف شبانه‌روز برای مسیرهای اتوبوسرانی فراهم شده و امکان برنامه‌ریزی جامع به منظور مدیریت ناوگان فراهم شده است. کاربردهای عمده مدل پیشنهادی عبارتند از: تخصیص بهینه اتوبوس‌ها به خطوط، زمانبندی موثر تردد ناوگان در خطوط، اطلاع‌رسانی دقیق به شهروندان و نهایتا مدیریت موثر تردد ناوگان اتوبوسرانی.

۱- مقدمه

دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی حمل‌ونقل عمومی همواره افزایش ایمنی و آرامش در سفر، کاهش هزینه و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، کاهش مصرف انرژی و تأخیرهای ناخواسته در طول سفر و در نهایت جلب رضایت مسافرین و روانسازی جریان ترافیک و حمل‌ونقل را به دنبال خواهند داشت. حمل‌ونقل و جابجائی کالا و مسافر، بعنوان یکی از اساسی‌ترین نیازهای شهری، همواره به عنوان شاخصی مطرح و مهم در برنامه‌ریزی‌های کلان هر جامعه، مورد توجه قرار دارد. در سالهای اخیر کاربرد فناوری ارتباطات و فناوری اطلاعات در عرصه حمل‌ونقل عمومی و همچنین تحقق سیستم‌های هوشمند حمل‌ونقل توانسته

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: J.Heydari@ut.ac.ir
۱. دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

است تاثیرات شگرفی بر عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی بر جای بگذارد. در کشور ما استفاده از سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند در ابتدا با نگرش کاربردهای درون‌شهری در ابتدای دهه ۷۰ آغاز شد و هم‌اکنون در سطح وسیعی مورد استفاده دست‌اندرکاران و مسئولین حمل‌ونقل شهری، جاده‌ای و ریلی قرار گرفته است.

متدولوژی‌های تحلیل داده‌ها در یک سیستم حمل‌ونقل عمومی به منظور پردازش داده‌های مختلف سیستم حمل‌ونقل شامل موقعیت وسیله نقلیه، شمارش تعداد مسافرین و سیستم‌های اخذ کرایه طراحی می‌شوند. نتایج ارزیابی و تحلیل داده‌های یک سیستم حمل‌ونقل عمومی می‌تواند کاربردهای مختلفی در مدیریت و برنامه‌ریزی خطوط اتوبوسرانی داشته باشد که از جمله مهمترین این کاربردها می‌توان به ایجاد سیستم‌های ارزیابی خطوط حمل‌ونقل و همچنین سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری به‌منظور برنامه‌ریزی عملیات و مدیریت سفر اشاره نمود.

نحوه بهره‌برداری و مدیریت بکارگیری اتوبوس‌ها و پرسنل عملیاتی یک موضوع حیاتی در شرکت‌های اتوبوسرانی شهری هستند که عملکرد شرکت، وضعیت ترافیکی شهر و سطح رضایت‌مندی شهروندان و استفاده‌کنندگان از اتوبوس به عنوان وسیله حمل‌ونقل عمومی را تحت تاثیر مستقیم قرار می‌دهند. یکی از خدمات سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند، ردیابی مکانی موقعیت ناوگان و بر اساس آن ارائه اطلاعات و برنامه‌ریزی ارائه خدمات به کاربران می‌باشد که نمونه‌ای از آن در بسیاری از کشورها در مورد اتوبوس‌های شهری، اجرا شده است. استفاده موثر از ابزارهای فناوری اطلاعات به همراه مدیریت صحیح اطلاعات می‌تواند در این راستا راهگشا باشد.

در این تحقیق، با تاکید بر ویژگی‌های سیستم حمل‌ونقل اتوبوسرانی شهری، مدلی برای ارزیابی فعالیت ناوگان در خطوط اتوبوسرانی و برآورد زمان سفر ارائه شده است. به عنوان مطالعه موردی، یکی از خطوط اتوبوسرانی فعال تهران جهت ارزیابی مدل پیشنهادی، بررسی شده است.

مسئله مورد بررسی شامل مدل‌سازی تردد ناوگان به کمک مدل شبیه‌سازی و با استفاده از داده‌های واقعی دریافت شده از سیستم‌های برخط موقعیت‌یابی ناوگان است. سوال اصلی تحقیق در ارتباط با چگونگی مدل‌سازی داده‌های موقعیت مکانی ناوگان در خطوط اتوبوسرانی و استفاده از آنها در ایجاد یک مدل شبیه‌سازی در راستای شناسایی و ارائه راهکارهای بهبود و کنترل سیستم تردد ناوگان اتوبوسرانی شهری است.

نوآوری‌های تحقیق حاضر را می‌توان در ارائه تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های موقعیت مکانی و توسعه مدل شبیه‌سازی منطبق با ویژگی‌های مسیر اتوبوسرانی به منظور برآورد زمان سفر و ارزیابی سناریوهای حرکتی ناوگان دانست. تحلیل یکپارچه حرکت و گردش ناوگان در طول یک روز کامل بهره‌برداری در مدل انجام شده است.

از مدل شبیه‌سازی به منظور تخمین مقدار شاخص‌های کلیدی عملکردی استفاده شده و تحلیل‌های مربوط به تغییرات زمانی و مکانی سرفاصله زمانی و تخمین ناوگان در مدل‌های ارائه شده در ادبیات، دیده نشده است.

نتایج قابل انتظار مطالعه حاضر شامل محاسبه شاخص‌های آماری مربوط به عملکرد سیستم و توسعه سناریوهای کنترلی سیستم و مبتنی بر تحلیل داده‌ها است. کاربردهای اصلی تحقیق نیز در پیش‌بینی زمان سفر با تکنیک شبیه‌سازی و ارزیابی سیاست‌های مختلف سرفاصله‌های زمانی[1] به منظور بهبود شاخص‌های عملکردی است.

۲- مرور ادبیات

یکی از اساسی‌ترین کاربردهای مدل‌سازی تردد ناوگان حمل‌ونقل شهری را می‌توان در پیش‌بینی زمان سفر دانست. پیش‌بینی زمان سفر به عنوان یک گام مهم و اولیه در برنامه‌ریزی می‌تواند کمک شایانی به مدیران عملیاتی در مدیریت موثر ناوگان حمل‌ونقل نماید؛ خصوصا

[1] Headway

در مواردی که به دلیل کمبود در ناوگان، تجهیزات یا پرسنل بهره‌بردار، سیستم با محدودیت منابع مواجه است. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان مدل‌های پیش‌بینی و تخمین زمان سفر را به مدل‌های مبتنی بر داده‌های تاریخی، مدل سری‌های زمانی، مدل‌های رگرسیونی، مدل کالمن-فیلتر، مدل‌های مبتنی بر یادگیری، مدل‌های شبکه عصبی و مدل‌های شبیه‌سازی طبقه‌بندی نمود. در مدل‌های مبتنی بر داده‌های تاریخی برای پیش‌بینی زمان سفر از اطلاعات قبلی ثبت شده زمان سفر اتوبوس که در سفرهای قبلی و در همان بازه زمانی انجام شده است، استفاده می‌شود. در این مدل‌ها اغلب فرض ایستا بودن وضعیت ترافیکی مسیر در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه در شرایطی که متغیرهای ترافیکی شرایط نسبتا پایداری نداشته باشند، دقت مدل‌های مبتنی بر داده‌های تاریخی به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. در یک دسته‌بندی می‌توان مدل‌های پیش‌بینی زمان سفر مبتنی بر داده‌های تاریخی را به دو دسته مدل‌های مبتنی بر متوسط زمان سفر و مدل‌های مبتنی بر سرعت متوسط تقسیم‌بندی نمود. در مدل‌های مبتنی بر متوسط زمان سفر، از متوسط زمان سفر تاریخی به‌طور مستقیم یا با ترکیب آن با ورودی‌های مختلف در پیش‌بینی زمان سفر استفاده می‌شود. در یک تحقیق یک مدل آماری برای تخمین امید ریاضی زمان رسیدن یک اتوبوس به یک ایستگاه توسعه داده شده است [۱]. در این مدل، برای پیش‌بینی زمان رسیدن یک اتوبوس به ایستگاه از دو دسته ورودی استفاده می‌شود؛ دسته اول، داده‌های مربوط به اطلاعات تاریخی مرتبط با چندین روز اخیر و دسته دوم، شرایط عملیاتی در روز فعلی است. مدل‌های مبتنی بر سرعت متوسط، از میانگین سرعت وسیله نقلیه در مسیرها برای تخمین زمان سفر استفاده می‌کنند. پیش‌بینی زمان سفر به کمک داده‌های جمع‌آوری شده از سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) و مسافت بین ایستگاه‌ها نیز قابل انجام است. این مدل‌ها برای تخمین زمان سفر معمولا از تکنیک‌های انطباق نقشه[1]، به کمک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی GIS[2] و موقعیت‌یابی فعلی اتوبوس استفاده می‌کنند. در مطالعه [۲] یک مدل برای تخمین زمان‌های رسیدن اتوبوس به ایستگاه‌ها به کمک اطلاعات سیستم GPS در شهر برازیلیا توسعه داده شده است. مدل مذکور از یک الگوریتم اصلی برای محاسبه زمان برآورد شده رسیدن اتوبوس به ایستگاه‌ها و دو الگوریتم فرعی برای تعیین موقعیت و سرعت حرکت اتوبوس در طول مسیر استفاده می‌کند. در این مدل مسیر حرکت اتوبوس به چندین قطعه مسیر کوتاه و مستقیم تقسیم شده و پیش‌بینی زمان صف در هر یک از قطعات مسیر انجام می‌شود. تاثیر متغیرهای طول مسیر، بازه زمانی حرکت، تعداد مسافرین پیاده و سوار شدن در ایستگاه‌ها و تعداد تقاطعات عبوری روی زمان سفر نشان داده شده است [۳]. جدول ۱ نشان‌دهنده ویژگی‌های تحقیقات مرتبط با پیش‌بینی زمان سفر و متغیرهای مورد بررسی برای تخمین زمان سفر و همچنین منبع داده‌های هر تحقیق است. تنها در دو تحقیق [۴ و ۵] متغیرهای مربوط به شرایط ترافیکی مسیر در مدل پیش‌بینی زمان سفر لحاظ شده‌اند و در هر دو مطالعه، داده‌های ترافیکی از داده‌های مدل شبیه‌سازی استخراج شده‌اند. از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی و تحلیل زمان سفر اتوبوس‌ها با اهداف کاربردی مختلفی نظیر ارزیابی میزان کارایی و مناسب بودن بافرهای زمانی در نظر گرفته شده برای ترمیم برنامه زمان‌بندی [۶]، تخمین زمان صرفه‌جویی شده با پیاده‌سازی سیستم‌های اتوبوس‌رانی سریع‌السیر یا توقف- محدود [۷] و آزمایش متغیرهای موثر بر میزان قابلیت اطمینان و پایداری برنامه زمان‌بندی [۸-۱۰] استفاده شده است. کاهش واریانس زمان سفر در افزایش اعتماد و اطمینان مسافرین به استفاده از سیستم حمل‌ونقل موثر بوده و حتی از دیدگاهی، کاهش واریانس زمان سفر نسبت به کاهش متوسط زمان سفر فوائد

[1] Map Matching Techniques
[2] Geographic Information System

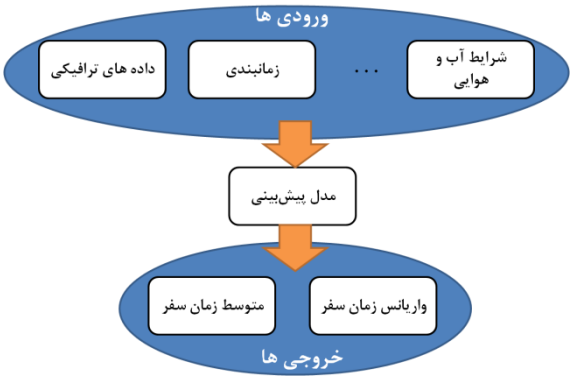
بیشتری دارد [۱۱]. بهبود عملکرد سیستم‌های اتوبوس‌رانی از دیدگاه قابلیت اطمینان در جذب مسافرین بیشتر و بالا بردن تمایل به استفاده از این سیستم حمل‌ونقل، نقش مهمی ایفا می‌کند. در مطالعه [۱۲] به بررسی عوامل موثر بر شاخص پایداری و قابلیت اطمینان در سیستم اتوبوس‌رانی شهر پکن می‌پردازد. بر اساس این تحقیق، قابلیت اطمینان سیستم‌های اتوبوس‌رانی به معیارهایی مرتبط با مسیرها، خطوط اتوبوس‌رانی، توقفات، سروقت بودن، انحراف از برنامه زمان‌بندی و تقارن وابسته است [۱۲].

جدول ۱- دسته‌بندی تحقیقات و متدولوژی‌های مرتبط با پیش‌بینی زمان سفر

نویسندگان	مشخصات مسیر	تقاضای مسافر/زمان توقف در ایستگاه	متغیرهای موقتی / زمان‌بندی	شاخص‌های ترافیکی	پایبندی و استواری زمان‌بندی	داده‌های اتوبوس	داده‌های تاریخی زمان سفر/سرعت و جزئیات مسیر	آب و هوا	منبع داده‌ها
مدل‌های رگرسیون									
[۱۴]	✓	✓		✓					شبیه‌سازی
[۱۵]	✓	✓	✓						APC
مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی									
[۱۶ و ۱۷]			✓		✓				AVL
[۱۸]		✓			✓	✓			AVL
[۱۹]						✓	✓		GPS
[۱۲]		✓	✓					✓	APC
مدل‌های کالمن- فیلتر KF									
[۵]		✓		✓		✓			شبیه‌سازی
[۲۰]		✓					✓		AVL-APC
[۲۱]			✓			✓		✓	APC
[۲۲]						✓	✓		AVL
[۲۳]			✓			✓			AVL-APC
مدل‌های تحلیلی									
[۲۴]			✓		✓	✓			GPS
[۲۵]						✓	✓		GPS
[۲۶]						✓	✓		GPS
[۲۷]							✓		GPS
مدل شبیه‌سازی									
تحقیق حاضر	✓	✓			✓	✓	✓		GPS

در تحقیق [۱۳] به مطالعه روش‌های پیش‌بینی زمان سفر سیستم‌های حمل‌ونقل اتوبوسی و تاثیر واریانس‌ها و تغییرات متغیرهای مستقلی نظیر تاثیرات ترافیکی پرداخته شده است. در تحقیق مذکور عوامل مختلف موثر بر زمان سفر از جمله تاثیر ازدحام ترافیکی و تغییرات وابسته به زمان حجم ترافیک که کمتر مورد توجه سایر

محققین بوده، مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده‌اند. در تحقیق مورد بحث، میانگین و واریانس زمان سفر به عنوان یک متغیر وابسته با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN[1]) برآورد شده است. این متدولوژی بر روی داده‌های مبتنی بر سیستم GPS اتوبوس‌رانی شهر ملبورن استرالیا پیاده‌سازی شده است. اطلاعات ترافیکی نیز به کمک سیستم SCATS[2] به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری میزان استواری و پایبندی برنامه زمابندی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- ساختار کلی مدل پیش‌بینی زمان سفر [۱۳]

در تحقیق [۱۴] تاثیرات عوامل موثر بر تقاضا و عرضه سفر بر توزیع زمان سفر و دسته‌بندی فاکتورهای مختلف آن بررسی شده است. نشان داده شده است که تغییرات تقاضا و عرضه سفر (که در بیشتر حالات وابستگی زیادی به یکدیگر دارند) بر روی توزیع زمان سفر موثر هستند. مادامیکه تغییرات در عرضه و تقاضای سفر وجود داشته باشد، واریانس زمان سفر در طول زمان تغییر خواهد کرد. وجه تمایز فرضیات تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین در لحاظ نمودن شرایطی نظیر مشخصات مسیر، توزیع زمان‌های توقف و سیر اتوبوس‌ها بر اساس اطلاعات تاریخی، در نظر گرفتن شاخص‌های قابل اطمینان و استواری در برنامه زمانبندی و سرفاصله زمانی و نیز استفاده از داده‌های تاریخی در مدل شبیه‌سازی گسسته-پیشامد است.

۳- مدل‌سازی تردد ناوگان اتوبوسرانی

در این بخش مشخصات و فرضیات مدلسازی تردد ناوگان اتوبوسرانی شهری توصیف می‌شود و همچنین مدل شبیه‌سازی طراحی شده برای یکی از خطوط اتوبوس‌رانی شهر تهران بررسی می‌شود. همانطور که در بخش قبل بیان شد، متغیرهای زیادی در زمان سیر و پیش‌بینی حرکت اتوبوس‌ها تاثیرگذارند. با استفاده از داده‌های ثبت شده از سیستم موقعیت‌یاب مکانی، برازش توزیع زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها و زمان سیر اتوبوس‌ها در هر بخش از مسیر بر حسب ساعات روز انجام شده است. در مرحله بعد، مدل شبیه‌سازی مسیر با استفاده از توزیع‌های آماری استخراج شده، طراحی شده است. خروجی‌های مورد انتظار از مدل شبیه‌سازی به قرار زیر هستند:

۱. پیش‌بینی زمان سفر در ساعات مختلف شبانه‌روز در مسیرهای رفت و برگشت
۲. پیش‌بینی فاصله بین ورود دو اتوبوس متوالی به ایستگاه‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز
۳. ارائه سناریوی اعزام ناوگان در فواصل زمانی غیرثابت از ایستگاه مبدا در جهت بهبود موارد ۱ و ۲ و ارائه برنامه زمان‌بندی مربوطه
۴. تحلیل صف اتوبوس‌ها در پایانه‌های مسیر

۳-۱- مدل مفهومی و فرآیند اجرای تحقیق

فرآیند اجرای گام‌های مختلف تحقیق در قالب یک مدل مفهومی در شکل ۲ خلاصه شده است. در گام‌های اولیه از روش‌های پیش‌پردازش داده و روش‌های آماری برای حذف داده‌های خطا استفاده شده است. در گام بعد، برازش توزیع متغیرهای زمان سفر و توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها انجام شده است. این متغیرها به همراه حجم ناوگان موجود و نیز الگوی اولیه سرفاصله زمانی، به عنوان ورودی مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده اند.

[1] Artificial Neural Network
[2] Sydney Coordinated Adaptive Traffic Systems

در انتخاب متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی و نیز در تدوین سناریوها، شرح زیر ضروری است:

متغیر مربوط به طول مسیر از منبع [۲]، متغیرهای موثر بر میزان قابلیت اطمینان و پایداری برنامه زمان‌بندی از منابع [۸-۱۰] و متغیر واریانس زمان سفر از منبع [۱۱] استخراج شده و معیارهای واریانس سرفاصله زمانی، زمان انتظار و صف اتوبوس‌ها در پایانه‌ها نیز با توجه به نیازهای سازمان و خبرگی تیم کارشناسی و تحقیقاتی در این تحقیق لحاظ شده‌اند.

شکل ۲- نمودار فرآیند اجرای گام‌های تحقیق

۳-۲- تعریف خط اتوبوسرانی و ویژگی‌های آن

مسیر انتخابی، خط شماره ۶۷۱۴ اتوبوسرانی از ایستگاه شهرک والفجر تا میدان انقلاب است. مسیر رفت در این خط از ۲۰ ایستگاه و مسیر برگشت به دلیل تفاوت‌های ترافیکی مسیر متشکل از ۱۷ ایستگاه است (شکل ۳).

شکل ۳- بخشی از مسیر رفت و برگشت خط اتوبوس‌رانی مورد مطالعه

۳-۳- داده‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی

دو دسته ورودی مهم مدل شبیه‌سازی، توزیع زمان سیر بین هر دو ایستگاه متوالی و زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها است که از طریق برازش داده‌های ثبت شده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی قابل محاسبه است.

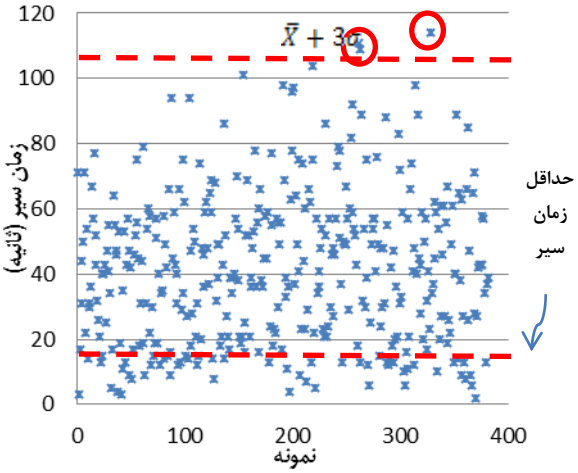
نمونه ها از روی داده‌های ثبت شده توسط سیستم GPS موجود در ناوگان اتوبوسرانی شهر تهران و بر مبنای باز شدن (ورود اتوبوس به ایستگاه) و بسته شدن (خروج اتوبوس از ایستگاه) درب اتوبوس بدست آمده است.

با توجه به تغییرات قابل توجه زمان‌های سیر و توقف اتوبوس‌ها در طول روز (به خصوص در ساعات اوج و غیر اوج تقاضای سفر)، توزیع زمان‌های سیر و توقف اتوبوس‌ها به تفکیک برای بازه‌های مشخصی از طول روز تعیین می‌شود. نحوه تقسیم‌بندی ساعات روز برای تعیین توزیع زمان‌های سیر و توقف اتوبوس‌ها در بخش بعدی توضیح داده شده است.

۳-۴-پیش‌پردازش داده‌ها

قبل از برازش داده‌های زمان سیر و توقف، از دو روش پیش پردازش داده‌ها استفاده می‌شود. در روش اول نقاطی که خارج از بازه $\bar{X} \pm 3\sigma$ قرار گرفته باشند، کنار گذاشته شده و از سایر داده‌ها برای تعیین توزیع‌های آماری

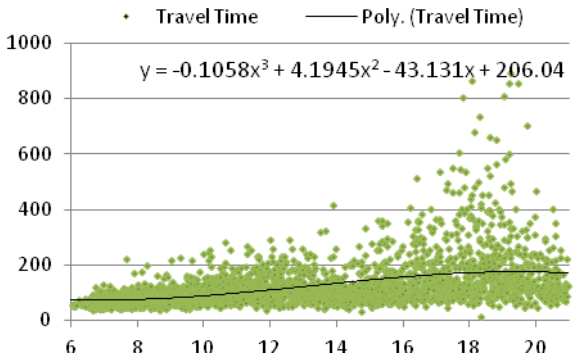
استفاده می‌گردد. منظور از $\bar{X}$ میانگین کل داده‌ها و σ انحراف استاندارد نمونه است. در برازش داده‌ها تنها داده‌های مربوط به روزهای عادی (غیرتعطیل) استفاده شده است. در روش دوم، زمان سیر اتوبوس‌ها بر اساس مسافت بین دو ایستگاه و سرعت متوسط اتوبوس‌ها، پیش‌پردازش می‌شوند. بر این اساس، داده‌هایی که از حداقل زمان سیر قابل قبول کمتر هستند، حذف می‌شوند. عمده داده‌های سیستم GPS بر مبنای باز شدن (ورود به ایستگاه) و بسته شدن (خروج از ایستگاه) درب اتوبوس ثبت می‌شوند. وجود داده‌های خطا عمدتا به دلیل باز و بسته شدن بی‌موقع درهای اتوبوس خارج از ایستگاه بوجود آمده است. نمونه‌ای از پیش‌پردازش داده‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴- پیش‌پردازش داده‌ها در مسیر رفت: ایستگاه ترمبار تا انتهای خ کارگر (۱۶ بعد از ظهر تا ۲۱ شب)

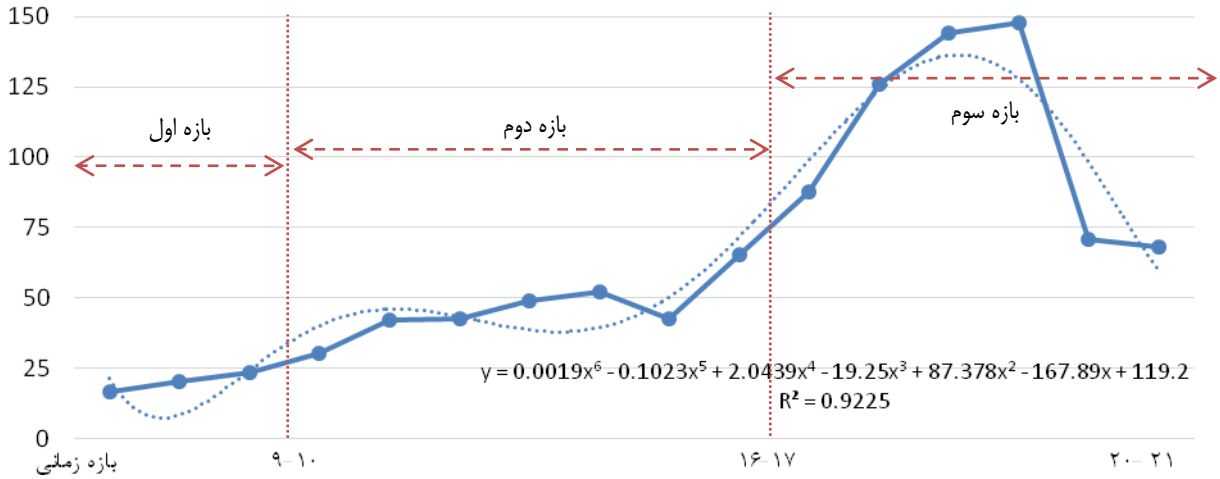
۳-۵- داده‌های زمانی و استخراج الگو

با توجه به شلوغی معابر در ساعات اوج تردد و افزایش تعداد خودروهای عبوری در برخی از ساعات شبانه‌روز، سرعت عبور وسایل نقلیه عمومی نیز کاهش یافته و با بالا رفتن زمان سیر بین هر دو ایستگاه و در نهایت کل مسیر، سطح مطلوبیت خدمات‌رسانی کاهش می‌یابد. تاثیر ساعات شبانه‌روز در زمان سیر بین دو ایستگاه تاثیرگزار است. در شکل ۵ نمونه ۵ ماهه از داده‌های سیر اتوبوس‌ها بین دو ایستگاه متوالی نمایش داده شده است. این داده‌ها در بازه زمانی شهریورماه تا دی‌ماه ۱۳۹۱ جمع‌آوری شده‌اند. با توجه به شکل ۵، مشخص است که نحوه توزیع زمان سیر اتوبوس‌ها در طول روز متفاوت است.

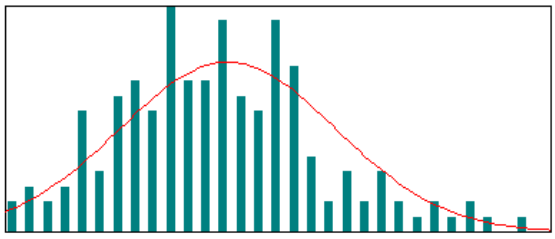


شکل ۵- پراکندگی داده‌های زمان سیر اتوبوس‌ها در ساعات مختلف روز

با توجه به نقاط عطف، بیشینه و کمینه تابع برازش شده برای میانگین واریانس داده‌های جمع‌آوری شده، که از ضریب همبستگی قابل قبولی نیز برخوردار است، سه بازه زمانی مجزا برای تحلیل داده‌ها بدست آمده است. همانگونه که در شکل ۶ پیداست، بازه اول بین ساعات ۶ تا ۹ صبح بازه دوم از ۹ تا ۱۶ و بازه سوم بین ساعات ۱۶ تا ۲۲ تعیین می‌شوند. قابل کر است که این بازه‌ها با نظرات تجربی متخصصان از وضعیت ترافیکی شهر تهران نیز مطابقت دارند. با توجه به تقسیم‌بندی زمانی فوق، توزیع زمان سیر بین هر دو ایستگاه متوالی و زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌های مختلف برازش شده و در مدل شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تمام برازش‌ها، گام پیش‌پردازش قبلا انجام شده است. به عنوان نمونه، زمان سیر در مسیر رفت بین ایستگاه ۵ به ۶ (در بازه ۶ تا ۹ صبح) از توزیع نرمال با میانگین ۳۲،۶۱ و انحراف معیار ۱۵،۸۴ پیروی می‌کند که در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۶- میانگین واریانس زمان سیر



شکل ۷- برازش داده زمان سیر بین ایستگاه ۵ به ۶ در مسیر رفت (۶ تا ۹ صبح)

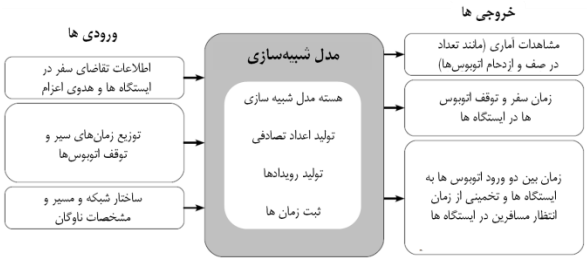
۳-۶- مدل شبیه‌سازی

در این تحقیق، از نرم‌افزار Enterprise Dynamics (ED) استفاده شده است. این نرم‌افزار یک برنامه نرم‌افزاری شیءگرا[1] به منظور ساخت مدل‌های شبیه‌سازی گسسته-پیشامد، ایجاد نمایش گرافیکی و انیمیشن، شبیه‌سازی لحظه‌ای و کنترل فرآیندهای پویا می‌باشد. برای هر یک از اجزای سیستم اتوبوسرانی در مدل شبیه‌سازی، یک اتم یا نهاده در نظر گرفته شده و برای برقراری ارتباط بین اجزای مدل از کانال‌های ارتباطی و اطلاعاتی استفاده می‌شود. یک مسیر خطوط اتوبوسرانی در نرم‌افزار ED با طراحی اتم‌های مسیر، توقفگاه یا ایستگاه، صف انتظار، پایانه و اتم کنترل کننده سرفاصله زمانی[2] قابل مدل‌سازی است. حرکت اتوبوس‌ها از اتم منبع با سرفاصله تعیین شده، شروع شده و به ترتیب عبور از ایستگاه‌ها تا رسیدن به مقصد تکمیل می‌شود.

مدل شبیه‌سازی شامل سه بخش ورودی‌ها، مدل شبیه‌سازی و خروجی‌ها می‌باشد. در مرحله اول، ورودی‌های مدل شبیه‌سازی شامل سرفاصله اعزام اتوبوس‌ها از پایانه‌های مبدا و مقصد، ساختار مسیر و ترتیب ایستگاه‌ها و همچنین توزیع‌های آماری زمان سیر در هر بخش از مسیر و زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها، مشخص می‌شوند. در مدل شبیه‌سازی که از یک هسته مرکزی جهت مدیریت و کنترل فرآیند در پایین‌ترین سطح تشکیل شده است، عملیاتی مانند تولید اعداد تصادفی، تولید وقایع و رویدادها و ثبت زمان‌ها انجام می‌شود. در هر تکرار از شبیه‌سازی، اتوبوس‌ها طبق الگوی سرفاصله زمانی (ثابت یا متغیر)، اعزام شده و پس از رسیدن به هر یک از پایانه‌ها، برای مدتی توقف کرده و سپس با توجه به زمان کنونی و همچنین سرفاصله برنامه‌ریزی شده، در مسیر برگشت اعزام می‌شوند. تعداد اتوبوس‌های تولید شده در مدل شبیه‌سازی به عنوان یکی از ورودی سیستم بوده و گردش اتوبوس‌ها نیز طبق محدودیت تعداد ناوگان و همچنین سرفاصله زمانی انجام می‌شود. در انتهای شبیه‌سازی نیز، مشاهدات آماری شامل متوسط اتوبوس‌های توقف کرده در پایانه‌ها در طول روز،

[1] Object oriented
[2] Headway

زمان سفر کل و سیر بین ایستگاه‌ها، زمان توقف در ایستگاه‌ها و زمان‌های بین دو ورود اتوبوس‌ها به ایستگاه‌ها که تخمینی از زمان انتظار مسافرین در ایستگاه می‌باشد، جمع‌آوری می‌شوند (شکل ۸). شاخص‌های مورد نظر برای تحلیل مدل شبیه‌سازی نیز شامل متوسط و واریانس‌های زمان سفر کل و صف در پایانه‌های مسیر است.



شکل ۸- مشخصات مدل شبیه‌سازی توسعه داده شده

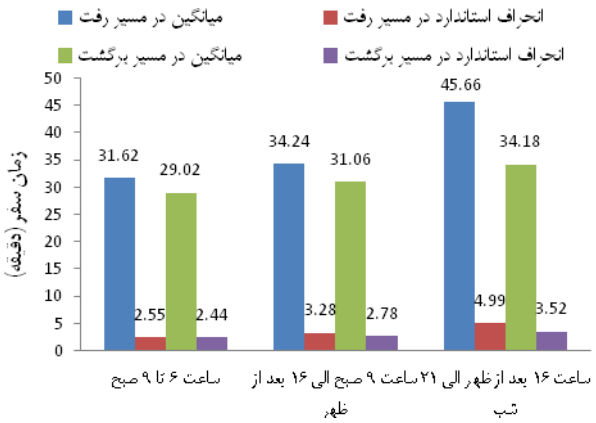
۴- نتایج و تحلیل یافته‌ها

تحلیل‌های مدل شبیه‌سازی در سه بخش تحلیل زمان سفر، سرفاصله زمانی و صف تجمعی اتوبوس‌ها در پایانه‌ها انجام شده است.

۴-۱- تحلیل زمان سفر

با توجه به اینکه در مدل شبیه‌سازی، برازش توزیع‌های زمان سیر و توقف اتوبوس‌ها در بازه‌های مختلف روز انجام شده است، تحلیل زمان سفر نیز در هر یک از این بازه‌های زمانی، نتایج بهتری ارائه خواهد نمود. تحلیل زمان سفر اتوبوس‌ها به تفکیک بازه‌های زمانی، نقش مهمی در یافتن الگوهای موثر سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس‌ها از سمت پایانه‌ها در طول روز و به حداقل رساندن تاثیر انحرافات از زمانبندی اولیه خواهد داشت. به عبارتی، سرفاصله زمانی متغیر که در آن در هر بازه زمانی در طول روز، از فاصله زمانی مشخصی برای اعزام اتوبوس‌ها استفاده می‌شود، می‌تواند در بهبود شاخص زمان انتظار مسافرین در ایستگاه‌ها، موثر واقع شود.

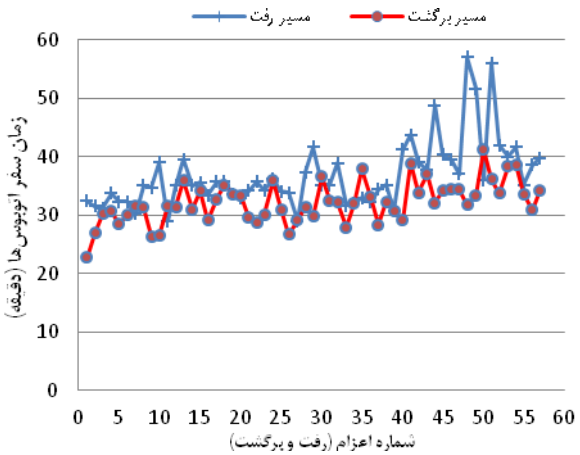
نتایج به‌دست آمده از مدل شبیه‌سازی برای شاخص‌های زمان سفر اتوبوس‌ها به تفکیک در مسیرهای رفت و برگشت (سرفاصله زمانی ثابت ۲۰ دقیقه‌ای) در شکل ۹ خلاصه شده است. محدوده تغییرات زمان سفر به تفکیک برای مسیر رفت (اختلاف حداکثر و حداقل زمان سفر اتوبوس‌ها) نیز در ساعات اولیه صبح حدود ۸ دقیقه، برای بازه ۹ صبح تا ۱۶ بعد از ظهر حدود ۱۳ دقیقه و برای ساعات انتهای روز حدود ۲۰ دقیقه بدست آمده است. این تغییرات برای مسیر برگشت نیز به ترتیب در بازه‌های زمانی در طول روز بصورت ۷,۵، ۱۱ و ۱۲ دقیقه بدست آمده است. نتایج مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد، تغییرات زمان سفر در طول شبیه‌سازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای در مسیر رفت در وضعیت نامناسب‌تری نسبت به مسیر برگشت قرار دارد. همچنین، تغییرات زمان سفر اتوبوس‌ها در مسیر رفت نسبت به مسیر برگشت، میانگین و واریانس بیشتری داشته که با توجه به طول خط و تعداد ایستگاه‌های بین راه در مسیرهای رفت و برگشت، قابل پیش‌بینی بوده است.



شکل ۹- مقایسه شاخص‌های آماری زمان سفر

نمودار پراکندگی زمان سفر اتوبوس‌ها در مسیرهای رفت و برگشت در اعزام‌های مختلف اتوبوس‌ها (به فاصله زمان ۱۵ دقیقه یکبار از دو پایانه) در طول روز نشان می‌دهد که میانگین و واریانس تغییرات زمان سفر به تدریج در طول روز به خصوص برای مسیر رفت افزایش یافته است (شکل ۱۰). رفتار متغیر و میانگین رو به رشد زمان سفر اتوبوس‌ها در طول روز نیز احتمالا باعث افزایش واریانس زمان بین دو ورود متوالی اتوبوس‌ها به ایستگاه‌ها خواهد شد. با توجه به طولانی‌تر بودن مسیر رفت در مقایسه با

مسیر برگشت و همچنین پراکندگی ایستگاه‌های آن در طول مسیر، لزوم به‌کارگیری استراتژی سرفاصله زمانی متغیر حرکت اتوبوس‌ها مشاهده می‌شود که در بخش بعدی راهکاری در این خصوص ارائه شده است.



شکل ۱۰- نمودار پراکندگی زمان سفر اتوبوس‌ها در مسیرهای رفت و برگشت در اعزام‌های مختلف اتوبوس‌ها در طول روز

۴-۲- تحلیل سرفاصله زمانی

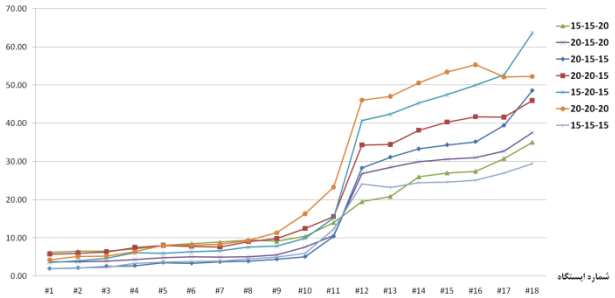
سرفاصله زمانی رسیدن اتوبوس‌های متوالی به ایستگاه‌ها، شاخصی کلیدی در تعیین زمان‌های انتظار مسافرین است. نتایج برای ۱۰۰ تکرار از شبیه‌سازی، برای یک روز کامل از ۶ صبح تا ۲۱ شب بدست آمده است. از جمله نتایج جالب توجه می‌توان به مشاهده اثری مشابه با اثر شلاقی[1] در ادبیات زنجیره تامین و رشد واریانس سرفاصله زمانی در ایستگاه‌های انتهای مسیر اشاره نمود. این موضوع و همچنین نتایج دیگر بدست آمده، اهمیت داشتن یک برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر از اعزام اتوبوس‌ها در پایانه‌ها را تبیین می‌کند. در حالت اعزام با سرفاصله ثابت اتوبوس‌ها در دو سمت پایانه‌ها، در ایستگاه‌های انتهای مسیر با واریانس بیشتر سرفاصله‌ها مواجه هستیم که به تبع آن افزایش زمان انتظار مسافرین را در پی خواهد داشت.

با توجه کوتاه‌تر بودن مسیر برگشت، افزایش واریانس سرفاصله زمانی، رشد کمتری نسبت به افزایش واریانس در مسیر رفت نشان می‌دهد که این نتیجه هم از قبل، قابل پیش بینی بود. از دیگر نکات قابل توجه، نحوه رشد واریانس سرفاصله زمانی در مسیرهای رفت و برگشت است. در مسیر رفت، افزایش واریانس به کندی انجام گرفته و بعد از طی تقریبا نیمی از مسیر (ایستگاه ۱۰ام) روندی رو به افزایش داشته است. اما در مسیر برگشت، رشد واریانس سرفاصله زمانی در ابتدای مسیر بسیار سریع بوده و سپس در ایستگاه‌های انتهای مسیر کندتر شده است. با توجه به اینکه در مدل شبیه‌سازی، مسیرهای رفت و برگشت کاملا بصورت یکپارچه مدل‌سازی شده‌اند، وقوع چنین وضعیتی قابل پیش‌بینی بوده است چراکه با افزایش واریانس سرفاصله زمانی در انتهای مسیر رفت، اتوبوس‌ها با بی‌نظمی بیشتری به انتهای خط رسیده و در برگشت نیز با واریانس بیشتری از سرفاصله زمانی روبرو خواهیم بود. به عبارتی به دلیل اینکه مسیرهای رفت و برگشت بطور مستقل در مدل شبیه‌سازی دیده نشده‌اند که در واقعیت نیز چنین است، وابستگی بین این دو مسیر منجر به یک نتیجه در خور توجه شده است. حال با توجه به اینکه مسیر برگشت کوتاه‌تر است، اتوبوس‌ها معمولا مشکلی از نظر رسیدن به انتهای مسیر برگشت و شروع حرکت مجدد از ابتدای مسیر رفت نخواهند داشت و در نتیجه واریانس سرفاصله زمانی در ابتدای مسیر رفت کاهش می‌یابد.

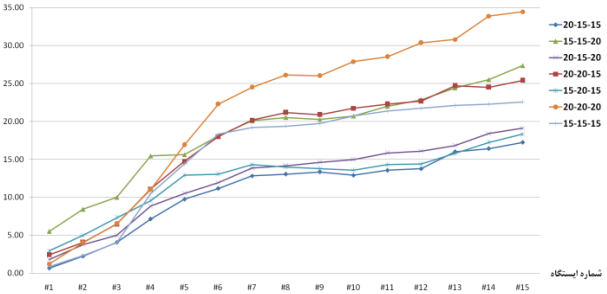
برای بهبود وضعیت عملکردی سیستم از جمله شاخص پایداری و پایبندی به برنامه زمانبندی، چندین سناریوی مختلف از سرفاصله زمانی اعزام اتوبوس‌ها از پایانه‌ها در مدل شبیه‌سازی آزمایش شده است. این سناریوها در راستای انعطاف‌پذیر نمودن سرفاصله زمانی اعزام اتوبوس‌ها در مسیرهای رفت و برگشت ارائه شده و تاثیر آن روی واریانس سرفاصله رسیدن اتوبوس‌ها در طول خط مطالعه شده است. به دلیل تغییرات زمان سفر در طول روز، استفاده از سرفاصله زمانی متغیر در طول زمان که حداقل در سه بازه ۶ الی ۹ صبح، ۹ صبح الی ۱۶ بعدازظهر و ۱۶ بعدازظهر الی ۲۱ شب رخ می‌دهد،

[1] Bullwhip effect

پیشنهاد شده است. به عنوان مثال از نماد ۲۰-۲۰-۱۵ برای یک الگوی اعزام که در آن سرفاصله زمانی اعزام در ابتدای روز هر ۱۵ دقیقه یکبار و در ادامه تا انتهای روز ۲۰ دقیقه یکبار است، استفاده شده است. در مدل شبیه‌سازی، ۲ سناریوی سرفاصله زمانی ثابت و ۵ سناریوی سرفاصله زمانی متغیر از دیدگاه تغییرات واریانس سرفاصله زمانی برای مسیرهای رفت و برگشت مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲).



شکل ۱۱- تاثیر الگوهای سرفاصله زمانی متغیر روی واریانس سرفاصله رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاه‌ها (مسیر رفت)



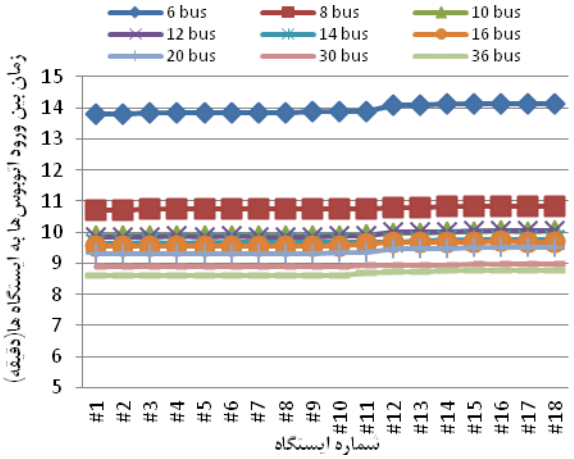
شکل ۱۲- تاثیر الگوهای سرفاصله زمانی متغیر روی واریانس سرفاصله رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاه‌ها (مسیر برگشت)

نتایج پیاده‌سازی سناریوها در مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در سناریوی ۲۰-۱۵-۱۵، به‌طور متوسط، واریانس سرفاصله رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاه‌های مسیر رفت، در وضعیت بهتری در مقایسه با سایر سناریوهای سرفاصله زمانی قرار دارد. البته روند تغییرات واریانس سرفاصله زمانی برای سناریوی اعزام با فواصل ثابت ۱۵ دقیقه یکبار در ایستگاه‌های انتهایی مسیر، بهتر از سایر سناریوهای اعزام بوده است. در مسیر برگشت، سناریوی ۱۵-۱۵-۲۰ در مقایسه با سایر سناریوها از وضعیت بهتری برخوردار است. در این سناریو، فاصله اعزام در طول روز به تدریج کاهش می‌یابد که منجر به بهبود در کاهش واریانس سرفاصله زمانی در مسیر برگشت شده است.

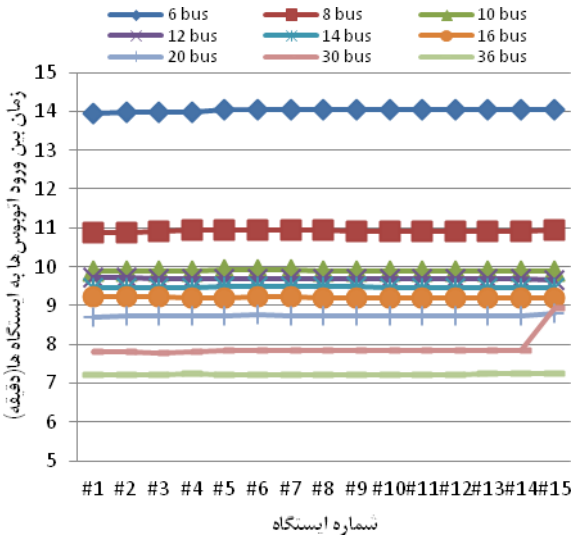
۴-۳- تخمین ناوگان با توجه به سرفاصله زمانی

در این بخش، به بررسی تاثیر تعداد اتوبوس‌ها به ازای سرفاصله زمانی برنامه‌ریزی شده و آنالیز فاصله[1] پرداخته می‌شود. در صورتی که هدف رساندن سرفاصله زمانی به زمان های کمتری باشد، لازم است که تحلیلی روی تعداد ناوگان مورد نیاز برای کاهش سرفاصله زمانی انجام شود. به عنوان مثال، اگر هدف رساندن سرفاصله زمانی اعزام متوالی اتوبوس ها به مقداری مشخص مانند ۵ یا ۱۰ دقیقه باشد، آنگاه باید مشخص شود که چه حجمی از ناوگان مورد نیاز است. بطورکلی، سرفاصله زمانی خط معمولا بر اساس بیشترین تقاضای سفر در طول مسیر تعیین می‌شود که به عنوان یک پارامتر ورودی در تحلیل‌های اینچنینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرفاصله‌های زمانی ورودی برای تحلیل مدل شبیه‌سازی، در دو سناریو به صورت ۵ دقیقه و ۱۰ دقیقه یکبار در نظر گرفته شده‌اند. در هر یک از این دو سناریو، نتایج مدل شبیه‌سازی، شامل متوسط زمان بین دو ورود متوالی اتوبوس‌ها به ایستگاه‌های مسیر رفت و برگشت، به ازای تعداد اتوبوس بین ۶ الی ۳۶ دستگاه، ارائه شده است. در شکل ۱۳ اختلاف بین سرفاصله زمانی مطلوب و سرفاصله زمانی مدل شبیه‌سازی به ازای تعداد ناوگان مختلف (در مسیر رفت) نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۳ حتی با بکارگیری ناوگانی به اندازه ۳۶ اتوبوس نیز رسیدن به سرفاصله برنامه‌ریزی شده ۵ دقیقه امکان‌پذیر نمی‌باشد و این اختلاف و انحراف از برنامه اولیه، چیزی در حدود ۳,۶ دقیقه در ابتدای خط و ۳,۸ دقیقه در انتهای خط می‌باشد.

[1] Gap analysis



شکل ۱۳- اختلاف سرفاصله زمانی حاصل از مدل شبیه‌سازی با مقدار مورد نظر به ازای تعداد ناوگان مختلف (مسیر رفت)



شکل ۱۴- اختلاف سرفاصله زمانی حاصل از مدل شبیه‌سازی با مقدار مورد نظر به ازای تعداد ناوگان مختلف (مسیر برگشت)

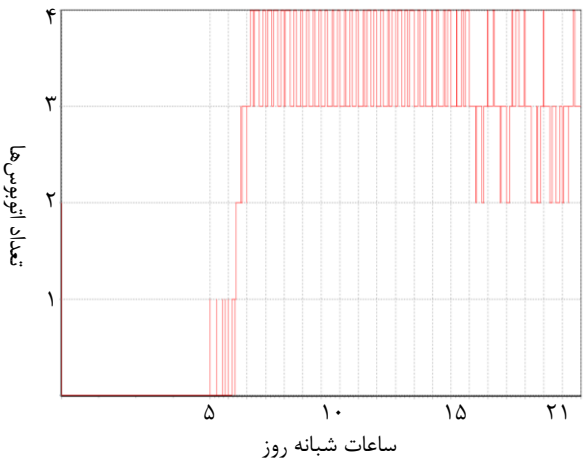
طبق نتایج مدل شبیه‌سازی، برای رسیدن به سرفاصله زمانی ۱۰ دقیقه‌ای در مسیر رفت، به حداقل ۱۰ اتوبوس نیاز است. در مسیر برگشت، این تعداد به ۱۲ دستگاه اتوبوس رسیده است (شکل ۱۴). با توجه به اینکه مسیر رفت و برگشت بطور یکپارچه در نظر گرفته شده‌اند، برای رسیدن به سرفاصله زمانی ۱۰ دقیقه‌ای، استفاده از ۱۲ اتوبوس توصیه می‌گردد.

۴-۴- تحلیل صف تجمعی اتوبوس‌ها در پایانه‌ها

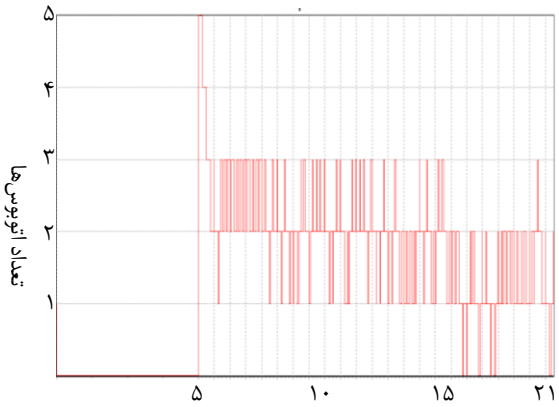
تحلیل وضعیت ایستگاه‌ها و تجمع اتوبوس‌ها در طول مسیر از جمله کاربردهای مناسب مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشند. مطالعه تاثیر رسیدن چندین اتوبوس بطور همزمان به ایستگاه و تحلیل اثرات ازدحام اتوبوس‌ها[1]، در تدوین استراتژی‌های حرکت و اعزام اتوبوس‌ها مفید می‌باشد. ازدحام اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها ناشی از عدم تنظیم مناسب فاصله اعزام از مبدا و واریانس بالای سرفاصله زمانی رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاه‌ها که در طول مسیر تقویت می‌شود، است. تغییرات تصادفی در طول مسیر شامل زمان‌های مختلف پیاده و سوار شدن مسافرین در ایستگاه‌ها، شرایط ترافیکی در طول مسیر (تغییرات زمان سیر) و سایر علل می‌باشد. به طور مشخص، نظم سرفاصله زمانی روی بهبود میانگین و واریانس زمان انتظار مسافرین در ایستگاه‌ها تاثیر مستقیم خواهد داشت. آماره‌های مربوط به تعداد اتوبوس‌های پارک شده در هر پایانه در طول شبیه‌سازی محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورتیکه ۱۴ دستگاه اتوبوس در خط وجود داشته باشند آنگاه بطور میانگین حدودا بین ۳ الی ۴ اتوبوس در پایانه‌های مبدا و مقصد، در طول روز توقف می‌کنند.

تعداد اتوبوس‌های متوقف شده در پایانه‌ها در طول زمان به ترتیب برای پایانه‌های مقصد و در سه سناریوی کاهش سرفاصله زمانی در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدای شبیه‌سازی و تا لحظه زمانی حدود ۶ صبح، هنوز اتوبوسی اعزام نشده است و تعداد اتوبوس‌های پارک شده در پایانه‌ها برابر با صفر می‌باشد. به تدریج به تعداد اتوبوس‌های پارک شده در طول زمان افزوده می‌شود.

[1] Bus bunching



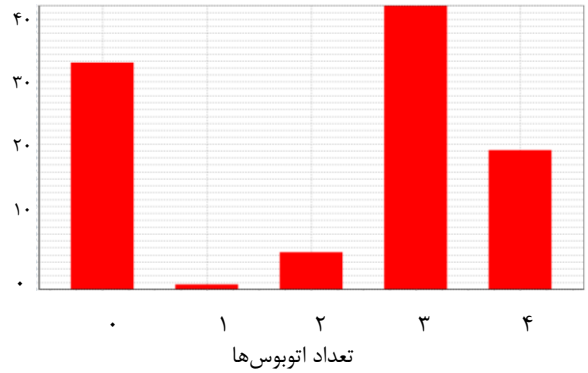
شکل ۱۵- تعداد اتوبوس‌های پارک شده در پایانه مقصد در مسیر رفت در طول شبیه‌سازی (سرفاصله ۲۰ دقیقه)



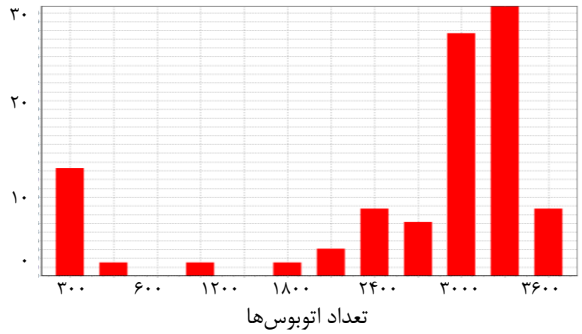
شکل ۱۶- تعداد اتوبوس‌های پارک شده در پایانه مقصد در طول شبیه‌سازی (سرفاصله ۱۰ دقیقه)

نمودارهای فراوانی برای تعداد اتوبوس های متوقف در پایانه‌های مسیر نشان می‌دهد که در اکثر مواقع بیش از ۳ اتوبوس در پایانه‌های مبدا و مقصد توقف کرده‌اند (شکل ۱۷ و شکل ۱۸). همچنین به‌دلیل گردش نامناسب اتوبوس‌ها در طول مسیر، توزیع حضور اتوبوس‌ها در طول مسیر از یکنواختی برخوردار نیست. در اغلب اوقات، پایانه‌ها خالی از اتوبوس بوده یا با ازدحام اتوبوس‌ها روبه رو بوده‌ایم. این موضوع برای هر دو پایانه مبدا و مقصد صادق است. مطابق نمودار فراوانی زمان توقف اتوبوس‌ها در پایانه مقصد (شکل ۱۸)، در اکثر اوقات، زمان های توقف اتوبوس‌ها در پایانه ها بیش از ۱ ساعت بوده است.

ازدحام اتوبوس ها در پایانه‌ها متاثر از سرفاصله زمانی و زمان سفر اتوبوس‌ها در مسیرهای رفت و برگشت می‌باشد.



شکل ۱۷- نمودار فراوانی تعداد اتوبوس‌های پارک در مبدا



شکل ۱۸- نمودار فراوانی زمان توقف اتوبوس ها در پایانه مقصد

۵- نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در این تحقیق، مدلسازی داده‌های عملیاتی مستخرج از سامانه‌های مکان‌یابی وسایط نقلیه به منظور ارزیابی و بهبود شاخص‌های عملکردی خطوط اتوبوسرانی شهری با تمرکز بر خصوصیات سیستم حمل‌ونقل شهری، ارائه شد. با استخراج داده‌های واقعی عملکرد یک خط اتوبوسرانی شهر تهران از سامانه‌های GPS، مدل‌سازی تردد ناوگان مبتنی بر تکنیک شبیه‌سازی انجام شد. با استفاده از داده‌های موقعیت مکانی موجود از خطوط اتوبوسرانی و تحلیل‌های بدست آمده از مدل شبیه‌سازی، چندین راهکار بهبود و کنترل سیستم ارائه شد. توسعه مدل شبیه‌سازی با توجه ویژگی‌های مسیر اتوبوسرانی و به

منظور برآورد زمان سفر، تحلیل صف پایانه‌ها و ارزیابی سناریوهای حرکتی ناوگان انجام شد.

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، می‌توان گفت که برنامه‌ریزی بر مبنای اطلاعات بدست آمده از خطوط اتوبوسرانی می‌تواند نقش بسزایی در افزایش دقت و کاهش انحرافات از برنامه زمانی اولیه داشته باشد. در تحقیقات مختلف از جمله [۸] با بکارگیری آنالیز نقاط زمانی، ۳٪ بهبود در واریانس سرفاصله زمانی حاصل شده است. در این تحقیق با توجه به استفاده از سیاست سرفاصله زمانی متغیر در طول زمان، می‌توان بهبود نتایج برای متغیر واریانس سرفاصله زمانی را در مسیر رفت و برگشت بطور میانگین در حدود ۵،۸٪ برآورد نمود.

با توجه تحلیل یکپارچه مسیرهای رفت و برگشت خطوط اتوبوسرانی در مدل شبیه‌سازی، می‌توان گفت که خروجی‌های مدل شبیه‌سازی از انطباق کافی با شرایط واقعی برخوردار بوده است. از جمله نتایج قابل توجه می‌توان به تاثیر مشخصاتی مانند طول مسیر، بازه زمانی روز و توزیع سرفاصله زمانی روی واریانس زمان سفر اشاره کرد. از جمله پیشنهادات آتی در خصوص مدیریت سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس‌ها بر اساس مدل پیشنهادی، می‌توان به استفاده از تحلیل نقاط و برهه‌های زمانی[1] (TP) در طول مسیر برای تعیین میزان انحراف از برنامه زمان‌بندی به عنوان نقاط کنترلی اشاره نمود. در این حالت تنظیم سرفاصله زمانی در طول مسیر و براساس میزان انحراف (جلو و یا عقب بودن) از برنامه زمانبندی انجام شود. تعیین محل قرارگیری این نقاط ارزیابی، می‌تواند بر اساس تحلیل‌های انجام گرفته در بخش شناسایی گلوگاه‌های مسیر، انجام شود. بدین ترتیب از انتشار و گسترش واریانس زمان بین ورود اتوبوس‌ها به ایستگاه‌ها در طول مسیر جلوگیری خواهد شد. یک کاربرد دیگر شبیه‌سازی می‌تواند تعیین بازه تغییرات زمان انتظار مسافرین در ایستگاه‌ها در شرایط بروز اختلالات در زمان سیر اتوبوس‌ها باشد. مدیریت اختلالات و برنامه‌ریزی تحت شرایط اختلال به کمک تحلیل تصادفی در مدل شبیه‌سازی جزء زمینه‌های تحقیقاتی آتی محسوب می‌شود.

با توجه به یکپارچگی سیستم اتوبوسرانی، با توسعه مدل برای تمام خطوط اتوبوسرانی می‌توان از ظرفیت ناوگان آزاد هر خط در ساعاتی از شبانه روز در خطوطی که دارای پیک حرکتی هستند استفاده نمود. همچنین با توجه به برنامه‌ریزی بر پایه واریانس زمان رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاههای بین مسیر، می‌توان برنامه زمان‌بندی دقیقتری که دارای استواری بیشتر و نیز انحراف عملیاتی کمتر است، ایجاد نمود. همچنین با توجه به تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق در مورد زمانهای اوج ترافیک می توان برنامه زمان بندی را با توجه به ساعات روز به صورت متفاوت در ایستگاه ها تعریف نمود.

نتایج قابل توجهی از تحلیل‌های ارایه شده در این مقاله به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت شهری قابل حصول است؛ تنظیم سرفاصله زمانی ارسال اتوبوس‌ها برمبنای تحقیق انجام شده می‌تواند انحرافات زمانی رسیدن اتوبوسها را به ایستگاه‌های بین راه کاهش دهد و برنامه زمانی هر ایستگاه در مسیر به صورت دقیق‌تری ارایه گردد. همچنین با توجه به تحلیل انجام شده در ایستگاههای مبدا و مقصد، دسترسی بهتر برنامه‌ریزان به منابع (اتوبوسها) در طول ساعات شبانه‌روز فراهم شده و می‌توانند از این منابع در خطوط دیگر که دارای ساعات اوج ترافیکی متفاوتی هستند استفاده نمایند. این مهم با تحلیل و برنامه ریزی همزمان تمامی خطوط اتوبوس رانی با توجه به ساعات مختلف تردد، بسیار کامل‌تر و مثمر ثمرتر خواهد بود چرا که از منابع یک خط که در ساعاتی خاص در پیک قرار ندارند می‌توان در خطوطی که در آن ساعات در پیک حرکتی قرار دارند استفاده نمود. با توجه به الگوی تردد بدست آمده با توجه به ساعات روز و برنامه ریزی ناوگان بر مبنای آن، می توان برنامه زمانبندی پویای دقیقی برای تمام ایستگاه های بین مسیر ایجاد نمود.

[1] Time point (TP) Analysis

۶- مراجع

[1] Cheung, C., Shalaby, A. S., Persaud, B. N., & Hadayeghi, A. (2008). "Models for safety analysis of road surface transit". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2063(1), pp 168-175.

[2] Weigang, L., Koendjbiharie, W., de M Juca, R., Yamashita, Y., & MacIver, A. (2002). "Algorithms for estimating bus arrival times using GPS data. Paper presented at the Intelligent Transportation Systems", 2002. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on.

[3] Tirachini, A. (2013). "Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 30, pp 239-256.

[4] Abdelfattah, A. M., & Khan, A. M. (1998). "Models for predicting bus delays". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1623(1), pp 8-15.

[5] Chien, S. I.-J., Ding, Y., & Wei, C. (2002). "Dynamic bus arrival time prediction with artificial neural networks". Journal of Transportation Engineering, Vol. 128(5), pp 429-438.

[6] Strathman, J. G., Kimpel, T. J., Dueker, K. J., Gerhart, R. L., & Callas, S. (2002). "Evaluation of transit operations: data applications of Tri-Met's automated Bus Dispatching System". Transportation, Vol. 29(3), pp 321-345.

[7] Tétreault, P. R., & El-Geneidy, A. M. (2010). "Estimating bus run times for new limited-stop service using archived AVL and APC data". Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 44(6), pp 390-402.

[8] El-Geneidy, A. M., Horning, J., & Krizek, K. J. (2011). "Analyzing transit service reliability using detailed data from automatic vehicular locator systems". Journal of Advanced Transportation, Vol. 45(1), pp 66-79.

[9] Strathman, J. G., Dueker, K. J., Kimpel, T., Gerhart, R., Turner, K., Taylor, P., Callas, S., Griffin, D., & Hopper, J. (1999). "Automated bus dispatching, operations control, and service reliability: Baseline analysis". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1666(1), pp 28-36.

[10] Strathman, J. G., Dueker, K. J., Kimpel, T., Gerhart, R. L., Turner, K., Taylor, P., Callas, S., & Griffin, D. (2000). "Service reliability impacts of computer-aided dispatching and automatic vehicle location technology": A Tri-Met case study. Transportation Quarterly, Vol. 54(3), pp 85-102.

[11] Bates, J., Polak, J., Jones, P., & Cook, A. (2001). "The valuation of reliability for personal travel". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 37(2), pp 191-229.

[12] Chen, X., Yu, L., Zhang, Y., & Guo, J. (2009). "Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels". Transportation research part A: policy and practice, Vol. 43(8), pp 722-734.

[13] Mazloumi, E., Moridpour, S., Currie, G., & Rose, G. (2011). "Exploring the Value of Traffic Flow Data in Bus Travel Time Prediction". Journal of Transportation Engineering, Vol. 138(4), pp 436-446.

[14] Tirachini, A., & Hensher, D. A. (2011). "Bus congestion, optimal infrastructure investment and the choice of a fare collection system in dedicated bus corridors". Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 45(5), pp 828-844.

[15] Patnaik, J., Chien, S., & Bladikas, A. (2004). "Estimation of bus arrival times using APC data". Journal of public transportation, Vol. 7(1), pp 1-20.

[16] Kalaputapu, R., & Demetsky, M. (1995a). "Modeling Bus Transit Schedule Deviations Using Automatic Vehicle Location Data and Artificial Neural Networks". Paper presented at the 74th TRB Annual Meeting, Washington, DC.

[17] Kalaputapu, R., & Demetsky, M. J. (1995b). "Modeling schedule deviations of buses using automatic vehicle-location data and artificial neural networks". Transportation research record, Vol. (1497), pp 44-52.

[18] Jeong, R., & Rilett, R. (2004). "Bus arrival time prediction using artificial neural network model". Paper presented at the Intelligent Transportation Systems, 2004. Proceedings. The 7th International IEEE Conference on.

[19] Park, T., Lee, S., & Moon, Y.-J. (2004). "Real time estimation of bus arrival time under mobile environment", Computational Science and Its Applications–ICCSA 2004, pp 1088-1096: Springer.

[20] Shalaby, A., & Farhan, A. (2004). "Prediction model of bus arrival and departure times using AVL and APC data". Journal of Public Transportation, Vol. 7(1), pp 41-62.

[21] Chen, M., Liu, X., Xia, J., & Chien, S. I. (2004). "A Dynamic Bus-Arrival Time Prediction Model Based on APC Data". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 19(5), pp 364-376.

[22] Dailey, D., Maclean, S., Cathey, F., & Wall, Z. (2001). "Transit vehicle arrival prediction: Algorithm and large-scale implementation". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1771(1), pp 46-51.

[23] Chen, M., Liu, X., & Xia, J. (2005). "Dynamic prediction method with schedule recovery impact for bus arrival time". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1923(1), pp 208-217.

[24] Lin, W.-H., & Zeng, J. (1999). "Experimental study of real-time bus arrival time prediction with GPS data". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1666(1), pp 101-109.

[25] Lin, W. H., & Bertini, R. L. (2004). "Modeling schedule recovery processes in transit operations for bus arrival time prediction". Journal of advanced transportation, Vol. 38(3), pp 347-365.

[26] Sun, D., Luo, H., Fu, L., Liu, W., Liao, X., & Zhao, M. (2007). "Predicting bus arrival time on the basis of global positioning system data". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2034(1), pp 62-72.

[27] Mishalani, R. G., McCord, M. R., & Forman, S. (2008). "Schedule-based and autoregressive bus running time modeling in the presence of driver-bus heterogeneity", Computer-aided Systems in Public Transport, pp 301-317: Springer.