مدل‌سازی تأخیر سرویس‌های اتوبوسرانی شهری و تحلیل فنی-اقتصادی راهبردهای کاهش تأخیر

مقاله علمی-پژوهشی

حسین محمدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
*سید علی ضیائی (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
محسن موسی آبادی، دانش آموخته دکتری، گروه ایمنی ترافیک، دانشکده علوم و فنون راهنمایی و رانندگی، دانشگاه جامع علوم انتظامی امین، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:sa-ziaee@um.ac.ir

دریافت:۱۴۰۵/۰۴/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۲۴۰-۲۲۷

چکیده

در سیستم حمل‌ونقل عمومی شهری، منظم بودن حرکت ناوگان اتوبوسرانی یکی از پایه‌های اصلی رضایت مسافران به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف کمی‌سازی میزان تأخیر سرویس‌های اتوبوسرانی و شناسایی مؤثرترین شیوه‌های کاهش آن در خطوط درون‌شهری انجام شده است. محدوده مورد مطالعه، شبکه خطوط اتوبوسرانی کلان‌شهر شیراز می‌باشد. برای دستیابی به اهداف تحقیق، داده‌های میدانی شامل تعداد مسافران سوار و پیاده شده، تعداد ایستگاه‌ها، مدت زمان مکث در هر ایستگاه و روش پرداخت کرایه (نقدی یا الکترونیکی) از ۲۸ دستگاه اتوبوس در ۱۴ خط اصلی جمع‌آوری گردید. با بهره‌گیری از تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره، مدلی برای برآورد زمان تأخیر ارائه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که به ترتیب تعداد مسافران سوار و پیاده شده، مدت زمان توقف در ایستگاه، تعداد ایستگاه‌ها و استفاده از کارت بلیت (با اثر منفی) بیشترین سهم را در پیش‌بینی تأخیر دارند. بر اساس نتایج، جایگزینی پرداخت الکترونیکی به جای پول نقد می‌تواند زمان تأخیر را تا حدود ۳۲ درصد کاهش دهد. همچنین ایجاد ایستگاه‌های پهلوگیری و توسعه سامانه‌های هوشمند اطلاع‌رسانی به عنوان مؤثرترین راهکارهای فنی-اقتصادی معرفی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: اتوبوسرانی شهری، تأخیر زمانی، رگرسیون خطی، سامانه‌های هوشمند، شیراز

۱-مقدمه

سیستم اتوبوسرانی به دلیل هزینه راه‌اندازی کمتر و انعطاف‌پذیری بالای مسیریابی، در مقایسه با سایر شیوه‌های حمل‌ونقل عمومی از جایگاه ویژه‌ای در برنامه‌ریزی شهری برخوردار است. تنظیم جدول زمانی منظم برای حرکت ناوگان، نه تنها بهره‌وری تجهیزات را افزایش می‌دهد، بلکه تأثیر مستقیمی بر رضایت مسافران و تمایل آن‌ها به استفاده پایدار از حمل‌ونقل عمومی دارد. در مقابل، هرگونه بی‌نظمی در زمانبندی و بروز تأخیرهای مکرر، ضمن کاهش جذابیت اتوبوس در برابر خودروی شخصی، بار ترافیکی شبکه معابر را نیز افزایش می‌دهد.یکی از حساسترین نقاط عملکردی در شبکه اتوبوسرانی، ایستگاه‌ها هستند. مدت زمان مکث اتوبوس در ایستگاه (Dwell Time) به عنوان شاخصی کلیدی، تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر منظم بودن حرکت و

قابلیت اعتمادپذیری سیستم دارد. مطالعات نشان داده‌اند که مسافران، زمان سپری‌شده در ایستگاه (زمان انتظار) را نامطلوب‌ترین بخش سفر خود ارزیابی می‌کنند. عواملی چون تعداد مسافران سوار و پیاده‌شونده، روش پرداخت کرایه (نقدی یا الکترونیکی)، تعداد ایستگاه‌ها و طراحی ایستگاه از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر طول توقف هستند. در سطح بین‌المللی، مطالعات گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی و کاهش تأخیر اتوبوس‌ها انجام شده است. کراکورت (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از درخت تصمیم و شبکه بیزی، عوامل حیاتی مؤثر بر تأخیر در سیستم متروبوس استانبول را تحلیل کرد. یانگ و همکاران (۲۰۲٤) مدل بهینه‌سازی دو مرحله‌ای برای کاهش تأخیر در کریدور BRT یانچنگ چین ارائه دادند. در ایران نیز پژوهش‌هایی در این زمینه صورت گرفته؛ از جمله اقاسی و همکاران (۱۳۹۳) تأثیر سیستم مدیریت مکانیزه ناوگان (AVL) را بر بهبود شاخص‌هایی همچون سرعت، نظم سرفاصله زمانی و کاهش زمان توقف در خطوط اتوبوسرانی اصفهان بررسی کردند.

مرور نظام‌مند ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که علی‌رغم مطالعات متعدد، خلأ اصلی در فقدان مدلی جامع است که به طور همزمان متغیرهای رفتاری مسافران (روش پرداخت کرایه)، مشخصات فنی خط (تعداد ایستگاه‌ها) و شرایط عملیاتی (زمان توقف در ایستگاه) را در یک چارچوب تحلیلی واحد ترکیب کند. نوآوری پژوهش حاضر در سه جنبه خلاصه می‌شود: نخست، توسعه مدل رگرسیون خطی چندمتغیره با قابلیت پیش‌بینی زمان تأخیر بر اساس سه دسته متغیر یادشده؛ دوم، استفاده از داده‌های میدانی به‌روز از شبکه اتوبوسرانی کلان‌شهر شیراز که تاکنون مطالعه مشابهی روی آن انجام نشده است؛ سوم، ارائه توصیه‌های فنی-اقتصادی عملیاتی مبتنی بر یافته‌های مدل.

هدف اصلی، ارائه مدلی کمّی برای برآورد تأخیر اتوبوس‌ها در خطوط شهری و ارزیابی فنی-اقتصادی راهکارهای کاهش آن است. اهداف فرعی شامل: (۱) شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر تأخیر؛ (۲) تعیین سهم هر یک از متغیرهای مستقل در پیش‌بینی زمان تأخیر؛ (۳) ارائه مدل ریاضی بومی‌شده برای خطوط اتوبوسرانی شیراز؛ و (٤) ارائه راهکارهای اجرایی جهت کاهش تأخیر و بهبود کیفیت خدمات.

علی‌رغم پژوهش‌های متعدد در زمینه تأخیر سیستم‌های اتوبوسرانی، سه خلأ اساسی در مطالعات پیشین مشاهده می‌شود: (۱) فقدان مدلی جامع که همزمان متغیرهای رفتاری مسافران (روش پرداخت کرایه)، مشخصات فنی خط (تعداد ایستگاه‌ها) و شرایط عملیاتی (زمان توقف در ایستگاه) را در یک چارچوب تحلیلی واحد ترکیب کند؛ (۲) عدم وجود مطالعه علمی-پژوهشی دقیق در زمینه مدل‌سازی تأخیر در شبکه خطوط اتوبوسرانی کلان‌شهر شیراز؛ (۳) کمبود پژوهش‌های کمّی که تأثیر روش پرداخت کرایه بر کاهش تأخیر را به صورت عددی و در قالب مدل ریاضی ارائه دهند. پژوهش حاضر در نظر دارد تا با پوشش این خلأها، مدلی جامع و بومی‌شده برای برآورد تأخیر در خطوط اتوبوسرانی شیراز ارائه دهد.

۲-پیشینه پژوهش

در دهه اخیر، توسعه سامانه‌های اتوبوس تندرو در کلان‌شهرهای جهان، توجه پژوهشگران را به چالش‌های عملیاتی این سیستم‌ها از جمله پیش‌بینی و کاهش تأخیر معطوف کرده است. ژانگ و همکاران (۲۰۲٤) در مقاله «تحلیل تأخیر رسیدن اتوبوس به ایستگاه در زمان واقعی با استفاده از مدل رگرسیون به ظاهر نامرتبط» در شبکه اتوبوسرانی استکهلم نشان دادند که عوامل عملیاتی نظیر تأخیر در ایستگاه‌های بالادست و زمان توقف در ایستگاه، بیشترین تأثیر را بر تأخیر دارند. یافته‌های آنان حاکی از آن بود که تأثیر این عوامل در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است و راهکارهای مدیریتی باید متناسب با ویژگی‌های هر بخش از مسیر طراحی شوند.

وانگ و همکاران (۲۰۲٤) در مطالعه‌ای بر روی کریدور اتوبوس تندرو شهر یانچنگ چین تحت عنوان «پیش‌بینی فاصله اطمینان زمان سفر اتوبوس مبتنی بر اشتراک قطعات راه و شباهت سبک رانندگی در مسیرهای چندگانه»، یک مدل بهینه‌سازی دو مرحله‌ای برای کاهش اشباع بیش از حد ارائه کردند. رویکرد پیشنهادی آنان توانست مدت زمان اشباع سیستم را تا ۳۵ درصد کاهش دهد.

این پژوهش بر اهمیت تاب‌آوری سیستم در برابر اختلالات روزمره مانند تراکم ناگهانی تأکید داشت.

در حوزه مدل‌سازی تأخیر با روش‌های یادگیری ماشین، کاراکورت (۲۰۲۵) در مقاله «رمزگشایی پویایی تأخیر در اتوبوس تندرو: رویکرد درخت تصمیم و شبکه بیزی برای سیستم متروبوس استانبول» به تحلیل عوامل حیاتی مؤثر بر تأخیر پرداخت. یافته‌های وی نشان داد که نرخ اشغال مسافر ٤۳ درصد با احتمال ۷٦ درصد به عدم بروز تأخیر منجر می‌شود، در حالی که جریان بالای ترافیک این احتمال را به ۵۵ درصد کاهش می‌دهد. همچنین شرایط جوی بارانی و ناکارآمدی عملیاتی، خطر تأخیر را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

در زمینه پیش‌بینی زمان سفر اتوبوس با روش‌های نوین، کی‌منش و پروینی (۱۴۰۳) در مقاله «تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقل در صورت تغییرات سرفاصله اتوبوس تندرو» با استفاده از نتایج مدل کلان‌نگر و برازش رگرسیون خطی به تحلیل حساسیت شاخص‌ها پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که به ازای هر یک درصد افزایش سرفاصله، تعداد مسافران اتوبوس تندرو ۵۸ مسافر کاهش می‌یابد و به ازای هر یک دقیقه افزایش سرفاصله، متوسط زمان سفر حدود ۱۰ ثانیه افزایش می‌یابد. همچنین آنان نشان دادند که سرفاصله بهینه برابر ۵ دقیقه است.

کی‌منش و پروینی (۱۴۰۲) در پژوهش دیگری با عنوان «طراحی شبکه اتوبوس تندرو با لحاظ کردن تقاضای سفر (مطالعه موردی شهر کرج)» یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوتایی غیرخطی ارائه کردند که هدف آن بیشینه کردن تقاضای پوشش داده شده و کمینه کردن هزینه ساخت است. نتایج طراحی شبکه آنان حاکی از آن است که کریدورهای پیشنهادی جمعاً ۲۴۴،۶۰۰ سفر را معادل ۲۸,۷ درصد از کل سفرهای یک ساعت اوج صبح شهر کرج در سال ۱۴۱۰ پوشش می‌دهند.

ماهپور (۱۴۰۰) در مقاله «مدلسازی و ارزیابی عوامل موثر بر رضایت کاربران سیستم حمل و نقل همگانی: مطالعه موردی مترو و اتوبوس تندرو شهر تهران» که در نشریه «جاده» منتشر شده است، با استفاده از نظریه تمایل رفتاری به مدل‌سازی عوامل مؤثر بر رضایت افراد از حمل‌ونقل همگانی پرداخت. نتایج بیانگر آن است که در اتوبوس تندرو، ارزش درک شده نسبت به کیفیت خدمت‌دهی، تأثیر بیشتری بر رضایت دارد.

در زمینه پیش‌بینی زمان ورود اتوبوس به ایستگاه، شب‌نشین (۱۳۹۴) در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود با عنوان «پیش‌بینی زمان ورود اتوبوس به ایستگاه با استفاده از داده‌های GPS (مطالعه موردی: شهر تبریز)» با استفاده از شبکه استنتاجی فازی-عصبی به پیش‌بینی زمان ورود پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که با حذف داده‌های اشتباه ارسالی توسط سامانه موقعیت‌یاب، دقت پیش‌بینی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۳-روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است. در این تحقیق، تلاش شده است تا با جمع‌آوری داده‌های میدانی و بهره‌گیری از روش رگرسیون خطی چندمتغیره، مدلی برای برآورد زمان تأخیر اتوبوس‌ها در خطوط شهری ارائه شود. محدوده مورد مطالعه، شبکه خطوط اتوبوسرانی کلان‌شهر شیراز است که به دلیل تراکم بالای جمعیت، حجم قابل توجه سفرهای درون‌شهری و وجود مشکلات حاد ترافیکی در ساعات اوج، برای انجام این پژوهش انتخاب گردید.

۳-۱-روش گردآوری اطلاعات

برای دستیابی به اهداف تحقیق، از دو روش کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شده است. در بخش کتابخانه‌ای، مبانی نظری و پیشینه پژوهش از طریق مطالعه کتاب‌ها، پایان‌نامه‌ها، مقالات علمی-پژوهشی داخلی و خارجی و پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر استخراج گردید. در بخش میدانی، با طراحی فرم‌های مخصوص آمارگیری، زمان حرکت و میزان تأخیر اتوبوس‌ها در خطوط مختلف ثبت شد. متغیرهای مؤثر بر تعداد مسافران سوار شده و رابطه آن با زمان‌بندی اتوبوس‌ها نیز از طریق آماربرداری میدانی جمع‌آوری گردید.

۳-۲- جامعه آماری و حجم نمونه

جامعه آماری این پژوهش شامل کلیه اتوبوس‌های درون‌شهری فعال در شبکه خطوط اتوبوسرانی شیراز می‌باشد. حجم نمونه بر اساس روش نمونه‌گیری هدفمند، از هر خط اصلی (مجموعاً ۱۴ خط) تعداد ۲ دستگاه اتوبوس (جمعاً ۲۸ دستگاه) انتخاب گردید. فرایند آمارگیری در دو روز متفاوت از هفته (یک روز پرترافیک و یک روز معمولی) و در دو شیفت صبح و عصر (از ساعت ۶ صبح تا ۲۲ شب) انجام پذیرفت. در هر اتوبوس، ۳ نفر آمارگیر وظیفه ثبت تعداد مسافران سوار و پیاده شده در درب‌های جلو و عقب و همچنین زمان توقف در هر ایستگاه را بر عهده داشتند.

۳-۳- متغیرهای پژوهش

در این تحقیق، متغیر وابسته، **مدت زمان تأخیر** (بر حسب دقیقه) و متغیرهای مستقل شامل موارد زیر می‌باشند:

A : تعداد مسافران سوار و پیاده شده در طول مسیر (نفر)

B : تعداد ایستگاه‌های موجود در خط (عدد)

C : متوسط زمان توقف در هر ایستگاه (ثانیه)

D : تعداد کرایه‌های پرداخت شده به صورت نقدی (نفر)

E : تعداد کرایه‌های پرداخت شده به صورت کارت بلیت (نفر)

۳-٤-روش تحلیل داده‌ها

داده‌های جمع‌آوری شده ابتدا در نرم‌افزار Excel وارد و پالایش گردیدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲٦، تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام (Stepwise) انجام شد. پیش از اجرای رگرسیون، مفروضات نرمال بودن توزیع خطاها (با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف)، نبود همخطی چندگانه (با بررسی ضریب تحمل و VIF) و استقلال خطاها (با آزمون دوربین-واتسون) مورد ارزیابی قرار گرفت. سطح معنی‌داری برای آزمون فرضیه‌ها ۰,۰۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۵- مدل رگرسیون خطی

فرم کلی مدل رگرسیون خطی چندمتغیره به صورت زیر تعریف گردید:

(۱)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_5 E + \epsilon$$

که در آن:

Y =زمان تأخیر (متغیر وابسته)

β_0 =مقدار ثابت

β_1 تا β_5 =ضرایب رگرسیونی

ε =جمله خطا

٤-یافته‌های تحقیق

در این بخش، ابتدا مشخصات زمانی خطوط اتوبوسرانی شیراز ارائه می‌گردد. سپس نتایج آمارگیری میدانی شامل تعداد مسافران سوار و پیاده شده، تعداد ایستگاه‌ها، متوسط زمان توقف و روش پرداخت کرایه برای ١٤ خط اصلی به همراه مدل رگرسیون نهایی گزارش می‌شود.

٤-١-مشخصات زمانی خطوط مورد مطالعه

جدول ۱ اطلاعات مربوط به سرفاصله زمانی و زمان سفر در شرایط جریان آزاد را برای خطوط اتوبوسرانی شیراز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطوط ۱ تا ۱۰ به عنوان خطوط اصلی (BRT) و خطوط ۱۰۱ تا ١٠٦ به عنوان خطوط محلی (Feeder) طبقه‌بندی شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات زمانی خطوط اتوبوسرانی شیراز

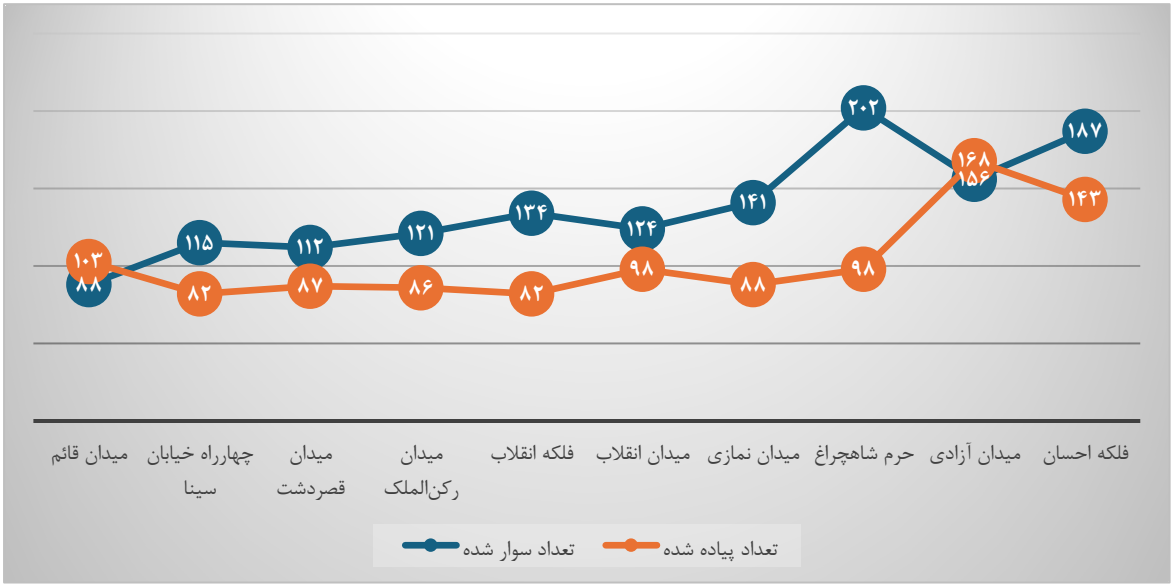
شماره خط	زمان سفر در جریان آزاد (دقیقه)	سرفاصله زمانی (دقیقه)
خط ۱	٥٧	۱۱
خط ۲	٦٣	۸
خط ۳	٦١	۱۱
خط ٤	٥٣	۱۳
خط ٥	٥٥	۱۳
خط ٦	٦٢	۱۱
خط ۷	٥٦	۱۱
خط ۸	٥٨	۱۳
خط ۹	٥٦	۱۱
خط ۱۰	٦١	۱۱
خط ۱۰۱	٦٥	۱۱
خط ۱۰۲	٥١	۱۱
خط ۱۰٤	٥٨	۱۱
خط ۱۰٦	٥٠	۱۱

٤-٣-متغیرهای پژوهش در خطوط مختلف

جدول ۲ مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته را برای ١٤ خط اتوبوسرانی شیراز نشان می‌دهد. داده‌ها حاصل میانگین گیری از دو روز آمارگیری (روز پیک و روز غیر پیک) می‌باشند.

جدول ۲. متغیرهای مستقل و وابسته در خطوط اتوبوسرانی شیراز

شماره خط	تعداد ایستگاه‌ها (B)	تعداد مسافران (A)	کرایه کارتی (E)(نفر)	کرایه نقدی (D)(نفر)	میانگین زمان توقف (C)(ثانیه)	زمان تأخیر (Y)(دقیقه)
خط ۱	٤٣	٥٧٣	٣٥٠	٢٢٣	٣٤	٢٢
خط ۲	٤٤	٦٠٢	١٨٩	٤١٣	٣٩	٢٥
خط ۳	٤٠	٦٠٦	٤٠٩	١٩٧	٣١	١٩
خط ٤	٣٣	٥٨٥	٢٣٠	٣٥٥	٣٧	٢٤
خط ٥	٤٠	٧١١	٤٣٧	٢٧٤	٣٩	٢٢
خط ٦	٣١	٦٠٨	٣٧٠	٢٣٨	٣٢	٢١
خط ٧	٥٤	٦٨٨	٢١٩	٤٦٩	٤٢	٤٣
خط ٨	٤٦	٤٥٣	٢٨٩	١٦٤	٢٨	١٣
خط ٩	٤٢	٦٣٨	٢٠٧	٤٣١	٤٢	٣٢
خط ١٠	٥١	٥٦٣	٢٢٧	٣٣٧	٣٥	٢٤
خط ١٠١	٦١	٧٨٢	٢٠٧	٥٧٥	٤٣	٤٥
خط ١٠٢	٣٩	٤٦٨	٢٣١	٢٣٧	٣٣	٢١
خط ١٠٤	٤٠	٤٦٣	٣٠٠	١٦٣	٣٠	١٩
خط ١٠٦	٢٩	٤٩٩	٢٥١	٢٤٩	٣٦	٢٢



شکل ۱. ده ایستگاه پرتردد خطوط اتوبوسرانی شیراز

شناسایی ایستگاه‌های پرتردد یکی از مهم‌ترین گام‌ها در مدیریت زمانبندی و کاهش تأخیر در شبکه اتوبوسرانی شهری محسوب می‌شود. همان‌طور که در مدل رگرسیون ارائه شده در بخش پیشین مشاهده گردید، متغیر «تعداد مسافران سوار و پیاده شده» با ضریب استاندارد ۰,۲۲۸، دومین عامل تأثیرگذار بر زمان تأخیر در خطوط اتوبوسرانی شیراز است. بر این اساس، شناسایی نقاطی از شبکه که در آن‌ها حجم تبادل مسافر به حداکثر می‌رسد، نخستین گام برای تمرکز راهکارهای کاهش تأخیر خواهد بود. شکل ۱، ده ایستگاهی را که در ساعات اوج ترافیک (۷ تا ۹ صبح و ۱۷ تا ۱۹ عصر) بیشترین تعداد مسافران سوار و پیاده شده را به خود اختصاص داده‌اند، به صورت نمودار ستونی گروه‌شده نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ایستگاه «فلکه احسان» در خط ۱۰۱ با جمع ۳۳۰ مسافر در ساعت اوج، شلوغ‌ترین ایستگاه شبکه است. پس از آن، «میدان آزادی» در خط ۵ با ۳۲٤ مسافر و «حرم شاهچراغ» در خط ۱۰٤ با ۳۰۰ مسافر در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نکته قابل توجه این است که پنج ایستگاه اول این شکل، جمعاً بیش از ٤۰ درصد از کل مسافران سوار و پیاده شده در کل خطوط را به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که اگر چه شبکه اتوبوسرانی شیراز دارای ایستگاه‌های متعددی است، اما حجم عظیمی از جابجایی مسافران تنها در تعداد محدودی از ایستگاه‌ها متمرکز شده است.

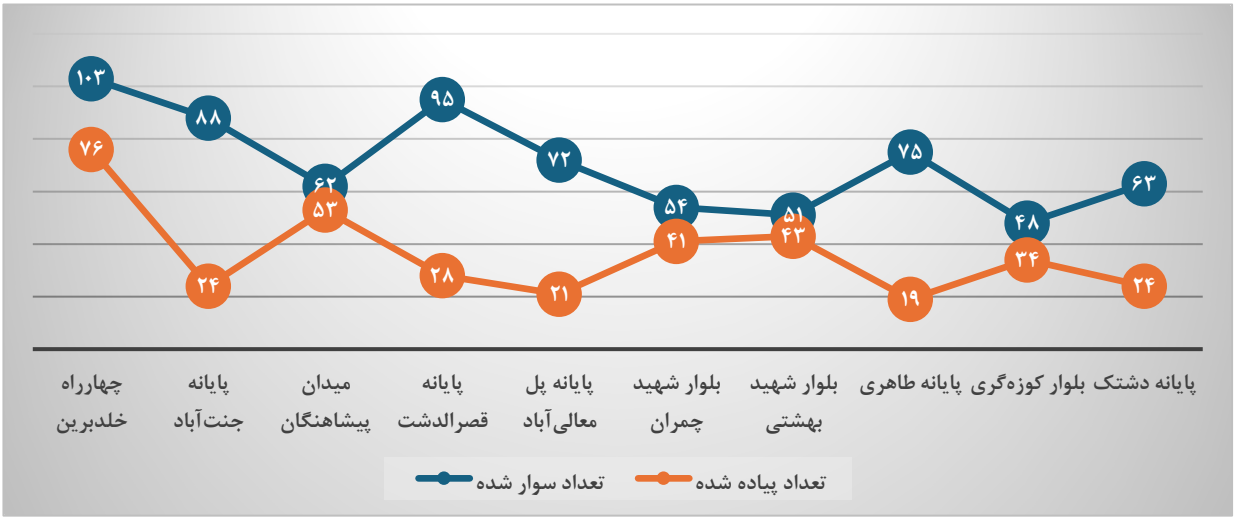
نمودار مذکور به خوبی تفاوت میان تعداد مسافران سوار و پیاده را در هر یک از این ایستگاه‌های پرتردد نشان می‌دهد. برای نمونه، در ایستگاه «حرم شاهچراغ»، تعداد مسافران سوار شده (۲۰۲ نفر) بیش از دو برابر مسافران پیاده شده (۹۸ نفر) است که نشان می‌دهد این ایستگاه عمدتاً یک ایستگاه مبدأ برای سفرهای درون‌شهری محسوب می‌شود. در مقابل، در ایستگاه «میدان آزادی»، تعداد مسافران پیاده شده (۱٦۸ نفر) بیشتر از مسافران سوار شده (۱٥٦ نفر) است که نشان می‌دهد این ایستگاه نقش یک ایستگاه مقصد و پایانه را ایفا می‌کند. این اطلاعات می‌تواند مستقیماً در تصمیم‌گیری برای تخصیص اتوبوس‌های اضافی، کوتاه کردن سرفاصله زمانی در ساعات اوج، و طراحی ایستگاه‌های پهلوگیری با ظرفیت بالاتر مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، شکل ۱ نه تنها یک ابزار تحلیلی برای پژوهشگران است، بلکه یک نقشه راه عملیاتی برای مدیران حمل‌ونقل شهری شیراز جهت کاهش تأخیر در نقاط بحرانی شبکه محسوب می‌شود.

در نقطه مقابل ایستگاه‌های پرتردد، شناسایی ایستگاه‌های خلوت نیز از منظر اقتصادی و بهره‌وری سیستم حمل‌ونقل عمومی حائز اهمیت است. شکل ۲، ده ایستگاهی را که کمترین تعداد مسافران سوار و پیاده شده را در ساعات اوج به خود اختصاص داده‌اند، به صورت نمودار ستونی گروه‌شده نمایش می‌دهد. بررسی این شکل نشان می‌دهد که اکثر این ایستگاه‌ها در انتهای خطوط (پایانه‌ها) یا در مناطقی با تراکم جمعیتی پایین واقع شده‌اند. برای نمونه، «پایانه دشتک» در خط ۱۰٦ با جمع ۸۷ مسافر، «پایانه طاهری» در خط ۸ با ۹٤ مسافر و «پایانه پل معالی‌آباد» در خط ۱۰۲ با ۹۳ مسافر، سه پایانه‌ای هستند که کمترین تعداد مسافر را جابه‌جا می‌کنند. نکته قابل توجه این است که در برخی از ایستگاه‌های خلوت مانند «بلوار کوزه‌گری»، تعداد مسافران پیاده شده (۳٤ نفر) نسبتاً نزدیک به تعداد مسافران سوار شده (٤۸ نفر) است که نشان می‌دهد این ایستگاه‌ها بیشتر نقش ایستگاه‌های گذری و میانی را ایفا می‌کنند نه مبدأ یا مقصد اصلی.

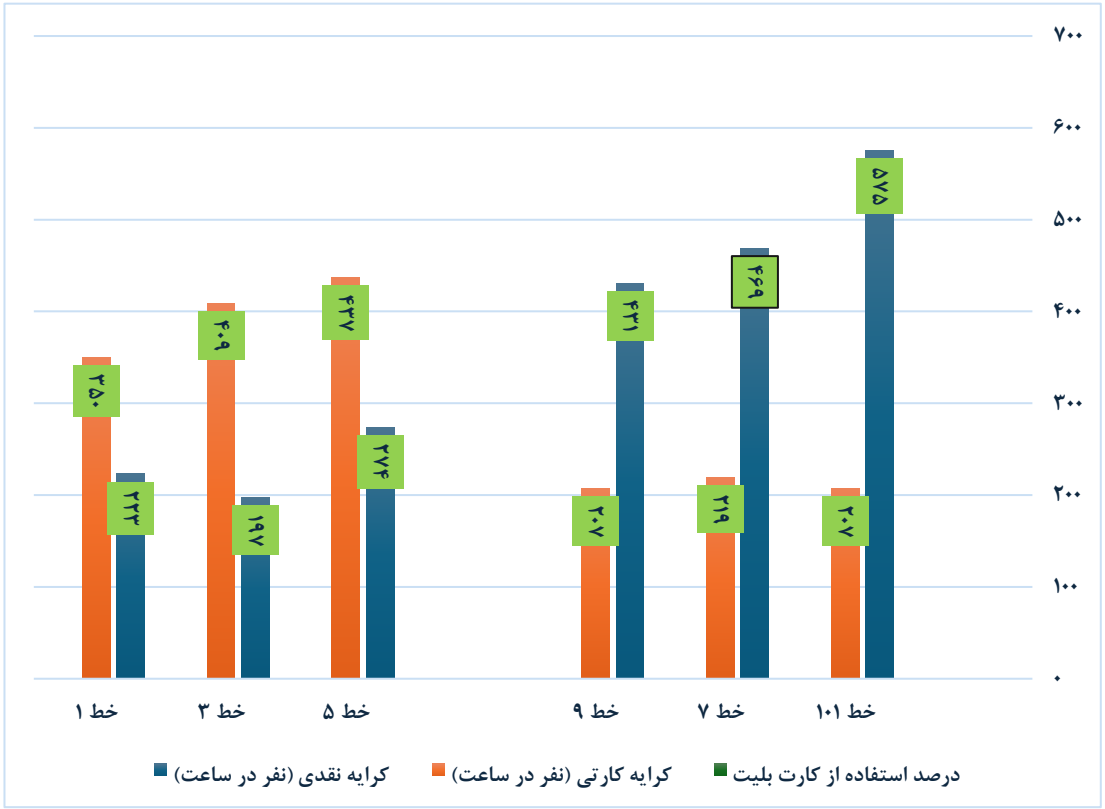
شکل ۲ تفاوت بین تعداد سوار و پیاده را در این ایستگاه‌های خلوت به روشنی نمایش می‌دهد. داده‌های ارائه شده در این نمودار از دو جهت برای برنامه‌ریزان حمل‌ونقل کاربردی است: نخست، در ایستگاه‌هایی که تعداد مسافران بسیار کم است (مانند پایانه دشتک با ۸۷ مسافر)، می‌توان نسبت به توقف‌های پرشمار بازنگری کرد و با ادغام ایستگاه‌های خلوت مجاور، بدون کاهش محسوس در سطح خدمات، هزینه‌های عملیاتی و زمان سفر را کاهش داد.

دوم، در ایستگاه‌هایی که تعداد مسافران سوار شده به طور قابل توجهی بیشتر از پیاده شده است (مانند «پایانه طاهری» با ۷۵ سوار در مقابل ۱۹ پیاده)، وجود یک ایستگاه انتظار سرپوشیده و با ظرفیت کافی و همچنین کوتاه کردن سرفاصله زمانی می‌تواند به کاهش تجمع مسافران و افزایش رضایت آن‌ها کمک کند. به عبارت دیگر، شکل ۲ ابزاری کارآمد برای بهینه‌سازی تعداد ایستگاه‌ها، بازطراحی مسیرها و تخصیص بهینه منابع به خطوط با اولویت پایین است.

در نهایت، مقایسه تطبیقی ایستگاه‌های شلوغ در شکل ۱ و ایستگاه‌های خلوت در شکل ۲ نشان می‌دهد که توزیع مسافران در شبکه اتوبوسرانی شیراز بسیار ناهمگن است و هرگونه راهکار برای کاهش تأخیر باید متناسب با ویژگی‌های هر بخش از شبکه طراحی شود.



شکل۲. ده ایستگاه خلوت خطوط اتوبوسرانی شیراز



شکل۳. مقایسه کرایه نقدی، کرایه کارتی و درصد استفاده از کارت بلیت در پنج خط منتخب اتوبوسرانی شیراز

یکی از متغیرهای کلیدی مؤثر بر زمان تأخیر در مدل رگرسیون ارائه شده، روش پرداخت کرایه توسط مسافران بود. همان‌طور که در بخش پیشین اشاره گردید، متغیر «تعداد کرایه‌های پرداخت شده با کارت بلیت» با ضریب استاندارد ۰٫۳۵۰-، تأثیر منفی و معناداری بر زمان تأخیر دارد. به عبارت دیگر، هرچه استفاده از کارت بلیت (پرداخت الکترونیکی) در یک خط بیشتر باشد، زمان تأخیر در آن خط کاهش می‌یابد. شکل ٦، مقایسه وضعیت پنج خط منتخب اتوبوسرانی شیراز را از نظر میزان استفاده از پول نقد، کارت بلیت و درصد استفاده از کارت بلیت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، خط ۱۰۱ با ۵۷۵ نفر

کرایه نقدی و تنها ۲۰۷ نفر کرایه کارتی، پایین‌ترین درصد استفاده از کارت بلیت (حدود ۲۶ درصد) را به خود اختصاص داده است. در مقابل، خط ۳ با ۱۹۷ نفر کرایه نقدی و ۴۰۹ نفر کرایه کارتی، بالاترین درصد استفاده از کارت بلیت (حدود ۶۷ درصد) را دارد. مقایسه این دو خط نشان می‌دهد که میانگین زمان تأخیر در خط ۱۰۱ حدود ۴۵ دقیقه و در خط ۳ حدود ۱۹ دقیقه است.

این تفاوت ۲۶ دقیقه‌ای، تأثیر مستقیم و قابل توجه روش پرداخت الکترونیکی را بر کاهش تأخیر تأیید می‌کند. خطوط ۵ و ۷ نیز در میانه این طیف قرار دارند. خط ۵ با ۲۷۴ نفر کرایه نقدی و ۴۳۷ نفر کرایه کارتی، حدود ۶۱ درصد استفاده از کارت بلیت را داشته و زمان تأخیر آن حدود ۲۲ دقیقه است. خط ۷ با ۴۶۹ نفر کرایه نقدی و ۲۱۹ نفر کرایه کارتی، حدود ۳۲ درصد استفاده از کارت بلیت داشته و زمان تأخیر آن حدود ۴۳ دقیقه است.

این یافته از نظر سیاست‌گذاری حمل‌ونقل شهری پیام روشنی دارد: سرمایه‌گذاری در توسعه سامانه‌های پرداخت الکترونیکی (کارت بلیت، کیف پول الکترونیکی، پرداخت با تلفن همراه) نه تنها از منظر کاهش هزینه‌های پولی و افزایش شفافیت مالی مفید است، بلکه تأثیری مستقیم و قابل اندازه‌گیری بر کاهش تأخیر و در نتیجه افزایش رضایت مسافران دارد. پیشنهاد می‌شود سازمان اتوبوسرانی شیراز با هدفگذاری افزایش درصد استفاده از کارت بلیت به حداقل ۷۰ درصد در کلیه خطوط تا پایان سال ۱۴۰۴، گام مؤثری در جهت کاهش تأخیر و بهبود کیفیت خدمات بردارد.

نتایج تحلیل رگرسیون

پیش از اجرای رگرسیون، مفروضات مدل مورد بررسی قرار گرفت. آزمون کولموگروف–اسمیرنوف برای خطاها مقدار p- value برابر ۰,۲۰۸ گزارش کرد که نشان از نرمال بودن توزیع خطاها دارد. آماره دوربین–واتسون برابر ۲,۱۲۴ محاسبه گردید که حاکی از عدم خودهمبستگی مثبت یا منفی بین خطاها است. همچنین مقادیر VIF برای همه متغیرها کمتر از ۵ بود که نشان از نبود همخطی چندگانه معنادار دارد.

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) را برای ارزیابی معنی‌داری مدل رگرسیون نشان می‌دهد.

جدول ۳. تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل زمان تأخیر

منبع تغییرات	مقدارp-value	آمارهF	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات
رگرسیون	۰,۰۰۳	۱۸,۷۰۹	۲۸,۸۱۱	٤	**۱۱۵,۲٤۵**
باقیمانده	-	-	۱۲,٤۱۹	۹	**۱۱۱,۷۷۲**
کل	-	-	-	۱۳	**۲۲۷,۰۱۷**

با توجه به اینکه مقدار (p-value =۰,۰۰۳) کوچکتر از سطح معنی‌داری ۰,۰۵ است، مدل رگرسیون خطی از نظر آماری معنی‌دار بوده و متغیرهای مستقل توانایی پیش‌بینی زمان تأخیر را دارند.جدول ٤ ضرایب رگرسیونی استاندارد و غیراستاندارد را برای متغیرهای معنادار نشان می‌دهد.

جدول ٤. ضرایب رگرسیونی مدل پیش‌بینی زمان تأخیر

متغیر	ضریب غیراستاندارد(B)	خطای استاندارد	مقدارp-value	آمارهt	ضریب استاندارد(Beta)
مقدار ثابت	۱۷,۳٦۲-	۱۸,۱۱۵	۰,۳٦۳	- ۰,۹۵۹	**-**
تعداد مسافران(A)	۰,۰٤۷	۰,۰۳۵	۰,۲۱۲	۱,۳٤۳	**۰,۲۲۸**
تعداد ایستگاه‌ها(B)	۰,۲۳۳	۰,۱۹۳	۰,۲۵۸	۱,۲۰۸	**۰,۳۰۰**
میانگین زمان توقف(C)	۰,۵٦۵	۰,۷۱٦	۰,٤۵۰	- ۰,۷۸۹	**۰,۳۵۰-**

کرایه کارتی(E)	۰,۰۳۹-	۰,۰۳۰	۰,۲۲۶	-۱,۳۰۰	**۰,۳۵۰-**

نتایج جدول ٤ نشان می‌دهد که متغیر تعداد مسافران سوار و پیاده شده (A) با ضریب ۰,۲۲۸، تعداد ایستگاه‌ها (B) با ضریب ۰,۳۰۰، میانگین زمان توقف در ایستگاه (C) با ضریب ۰,۳۵۰- و کرایه کارتی (E) با ضریب ۰,۳۵۰- به ترتیب بیشترین سهم را در پیش‌بینی زمان تأخیر دارند. کرایه کارتی اثر منفی بر تأخیر دارد؛ به این معنا که هرچه استفاده از کارت بلیت بیشتر باشد، زمان تأخیر کاهش می‌یابد. متغیر کرایه نقدی (D) در فرآیند رگرسیون گام‌به‌گام به دلیل معنادار نبودن از مدل حذف گردید.

٤-مدل نهایی برآورد تأخیر

بر اساس نتایج جدول ٤، مدل نهایی رگرسیون خطی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y = -17.362 + 0.047\,A + 0.233\,B + 0.565\,C - 0.039E \quad (۲)$$

که در آن:

Y =زمان تأخیر (دقیقه)

A =تعداد مسافران سوار و پیاده شده (نفر)

B =تعداد ایستگاه‌ها (عدد)

C =میانگین زمان توقف در هر ایستگاه (ثانیه)

E =تعداد کرایه‌های پرداخت شده با کارت بلیت (نفر)

٤-١-تحلیل توزیع مسافران در ایستگاه‌های پرتردد

در فرآیند آمارگیری میدانی از خطوط اتوبوسرانی شیراز، مشخص شد که توزیع مسافران در طول خطوط یکسان نیست و برخی ایستگاه‌ها به دلیل موقعیت مکانی (نزدیکی به مراکز خرید، پایانه‌ها یا اماکن مذهبی) دارای حجم سوار و پیاده بسیار بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها هستند. در جدول ۷، پنج ایستگاه با بیشترین تعداد مسافران سوار و پیاده شده در ساعات اوج (۷ تا ۹ صبح و ۱۷ تا ۱۹ عصر) شناسایی و ارائه گردیده است. این ایستگاه‌ها به عنوان «نقاط بحرانی» شبکه شناخته می‌شوند و تمرکز اصلی راهکارهای کاهش تأخیر باید بر روی این نقاط متمرکز شود.

جدول ۷. پنج ایستگاه پرتردد در خطوط اتوبوسرانی شیراز (تعداد مسافر در ساعت اوج)

ردیف	نام ایستگاه	خط مربوطه	تعداد مسافران سوار شده	تعداد مسافران پیاده شده	جمع کل
۱	فلکه احسان	خط ۱۰۱	۱۸۷	۱٤۳	**۳۳۰**
۲	میدان آزادی	خط ۵	۱٥٦	۱٦۸	**۳۲٤**
۳	حرم شاهچراغ	خط ۱۰٤	۲۰۲	۹۸	**۳۰۰**
٤	پایانه شهید دستغیب	خط ۱	۱۳٤	۱۲۱	**۲٥٥**
٥	تقاطع معالی‌آباد	خط ۷	۱۱۲	۱۰۹	**۲۲۱**

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، ایستگاه «فلکه احسان» در خط ۱۰۱ با ۳۳۰ مسافر در ساعت اوج، بیشترین حجم جابجایی مسافر را دارد. پس از آن، ایستگاه «میدان آزادی» در خط ۵ با ۳۲٤ مسافر و «حرم شاهچراغ» در خط ۱۰٤ با ۳۰۰ مسافر در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این سه ایستگاه جمعاً بیش از ٤٥ درصد از کل مسافران سوار و پیاده شده در کل خطوط را به خود اختصاص داده‌اند.

٤-۲-تحلیل روش پرداخت کرایه در خطوط منتخب

یکی از متغیرهای کلیدی تأثیرگذار بر زمان تأخیر در این پژوهش، روش پرداخت کرایه توسط مسافران است. آمارگیری میدانی نشان داد که در برخی خطوط، استفاده از پول نقد همچنان سهم قابل توجهی دارد که منجر به افزایش زمان توقف در ایستگاه (به دلیل زمانبر بودن جستجو و برگرداندن پول نقد) و در نتیجه افزایش تأخیر کلی می‌شود. در جدول ۸، سه خط با بالاترین میزان استفاده از پول نقد و سه خط با بالاترین میزان استفاده از کارت بلیت به تفکیک ارائه گردیده است. این اطلاعات می‌تواند مبنایی برای

سیاست‌گذاری در جهت جایگزینی تدریجی پول نقد با کارت بلیت قرار گیرد.

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که در خطوط ۱۰۱، ۷ و ۹، بیش از ٦٧ درصد مسافران کرایه خود را به صورت نقدی پرداخت می‌کنند. این در حالی است که در خطوط ۱، ۳ و ۵، بیش از ٦١ درصد مسافران از کارت بلیت استفاده می‌کنند. مقایسه این دو گروه نشان می‌دهد که میانگین زمان تأخیر در خطوط با استفاده بالای پول نقد (خطوط ۱۰۱، ۷ و ۹) برابر ٤٢,٣ دقیقه است، در حالی که این مقدار در خطوط با استفاده بالای کارت بلیت (خطوط ۱، ۳ و ۵) برابر ۲۳,۳ دقیقه می‌باشد.

این تفاوت ۱۹ دقیقه‌ای، تأثیر قابل توجه روش پرداخت الکترونیکی را بر کاهش تأخیر تأیید می‌کند.

جدول ۸ تفکیک روش پرداخت کرایه در خطوط منتخب اتوبوسرانی شیراز

ردیف	خط	کرایه نقدی (نفر در ساعت)	کرایه کارتی (نفر در ساعت)	درصد استفاده از کارت بلیت	وضعیت
سه خط با بالاترین استفاده از پول نقد					
۱	خط ۱۰۱	۵۷۵	۲۰۷	٪۲٦,۵	بحرانی
۲	خط ۷	٤٦۹	۲۱۹	٪۳۱,۸	بحرانی
۳	خط ۹	٤۳۱	۲۰۷	٪۳۲,٤	بحرانی
سه خط با بالاترین استفاده از کارت بلیت					
٤	خط ۵	۲۷٤	٤۳۷	٪٦۱,۵	مطلوب
۵	خط ۳	۱۹۷	٤۰۹	٪٦۷,۵	بسیار مطلوب
٦	خط ۱	۲۲۳	۳۵۰	٪٦۱,۱	مطلوب

۵-نتیجه‌گیری

تحلیل‌های انجام شده تصویر روشنی از عوامل کلیدی مؤثر بر تأخیر در شبکه اتوبوسرانی شیراز ارائه داد. مدل رگرسیون خطی چندمتغیره توسعه داده شده نشان داد که از میان پنج متغیر مستقل بررسی شده، چهار متغیر «تعداد مسافران سوار و پیاده شده»، «تعداد ایستگاه‌ها»، «میانگین زمان توقف در ایستگاه» و «تعداد کرایه‌های پرداخت شده با کارت بلیت» تأثیر معناداری بر زمان تأخیر دارند. ضریب استاندارد متغیر تعداد مسافران (۰,۲۲۸) و تعداد ایستگاه‌ها (۰,۳۰۰) نشان می‌دهد که هرگونه افزایش در این دو پارامتر، مستقیماً به افزایش زمان تأخیر منجر می‌شود. در مقابل، ضرایب منفی متغیرهای «زمان توقف در ایستگاه» (۰,۳۵۰-) و «کرایه کارتی» (۰,۳۵۰-) حاکی از آن است که بهبود کارایی در فرآیند سوار و پیاده شدن (از طریق کاهش زمان توقف) و جایگزینی پول نقد با کارت بلیت می‌تواند به طور قابل توجهی از میزان تأخیر بکاهد. همچنین تحلیل ایستگاه‌های پرتردد و خلوت نشان داد که توزیع مسافران در شبکه بسیار ناهمگن است؛ به طوری که تنها پنج ایستگاه، بیش از ٤۰ درصد از کل جابجایی مسافران را به خود اختصاص داده‌اند. این یافته‌ها از یک سو ضرورت تمرکز راهکارهای کاهش تأخیر بر روی نقاط بحرانی شبکه را آشکار می‌سازد و از سوی دیگر، امکان بهینه‌سازی منابع در ایستگاه‌های کم‌تردد را فراهم می‌آورد. دلالت مدیریتی مهم این یافته‌ها آن است که سیاست‌های کاهش تأخیر نمی‌تواند یکسان و در کل شبکه اعمال شود؛ بلکه باید متناسب با ویژگی‌های هر خط و حتی هر ایستگاه طراحی گردد. در ادامه، نتیجه‌گیری نهایی پژوهش و پیشنهادات اجرایی برگرفته از مدل ارائه می‌گردد.

پس از ارزیابی داده‌های میدانی گردآوری شده از ۲۸ دستگاه اتوبوس در ۱۴ خط اصلی اتوبوسرانی شهر شیراز و تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره، نتایج زیر حاصل شد:

-متغیر **تعداد مسافران سوار و پیاده شده (A)** با ضریب تأثیر ۴۷ درصد (در مدل استاندارد ۰,۲۲۸)، تأثیرگذارترین پارامتر بر زمان تأخیر در خطوط اتوبوسرانی شیراز شناخته شد. به عبارت دیگر، هرچه تعداد مسافران جابجا شده در یک خط بیشتر باشد، زمان توقف و در نتیجه تأخیر اعزام اتوبوس‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

-متغیر **تعداد ایستگاه‌های موجود در خط (B)** با ضریب تأثیر ۳۰ درصد (ضریب استاندارد ۰,۳۰۰) دومین عامل مؤثر بر تأخیر است. خطوط با ایستگاه‌های بیشتر به دلیل توقف‌های مکرر، مستعد تأخیرهای طولانی‌تری هستند.

-متغیر **میانگین زمان توقف در ایستگاه (C)** با ضریب تأثیر - درصد (ضریب استاندارد ۰,۳۵۰-)، اثر معکوس بر تأخیر دارد که نشان می‌دهد مدیریت بهینه زمان توقف در ایستگاه‌ها می‌تواند به کاهش تأخیر کمک کند.

-متغیر **تعداد کرایه‌های پرداخت شده با کارت بلیت (E)** با ضریب تأثیر ۳۵- درصد، تأثیر معکوس و معناداری بر زمان تأخیر دارد. هرچه استفاده از کارت بلیت بیشتر باشد (و در نتیجه پرداخت نقدی کمتر)، زمان سوار و پیاده شدن مسافران کاهش یافته و تأخیر کمتری رخ می‌دهد. این یافته تأکیدی بر لزوم حذف تدریجی پول نقد در سیستم‌های اتوبوسرانی است.

-متغیر **تعداد کرایه‌های نقدی (D)** به دلیل معنادار نبودن (p- value > 0.05) از مدل نهایی حذف گردید.

مدل نهایی برآورد تأخیر در خطوط اتوبوسرانی شیراز به صورت زیر تعیین گردید:

(۳)

$$Y = -17.362 + 0.047\,A + 0.233\,B + 0.565\,C - 0.039E$$

این مدل با مقدار p-value برابر ۰,۰۰۳ و آماره F برابر ۱۸,۷۰۹ از اعتبار آماری قابل قبولی برخوردار است.

پیشنهادات کاربردی و آتی

بر اساس یافته‌های پژوهش، پیشنهادات زیر به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

پیشنهادات کاربردی (برای سازمان‌های متولی)

توسعه سامانه‌های پرداخت الکترونیکی: با توجه به تأثیر منفی کرایه کارتی بر تأخیر، جایگزینی کامل پول نقد با کارت بلیت یا کیف پول الکترونیکی در کلیه خطوط اتوبوسرانی شیراز در اولویت قرار گیرد.

نصب تابلوهای اطلاع‌رسانی هوشمند :آگاه‌سازی مسافران از زمان دقیق رسیدن اتوبوس‌ها به ایستگاه، ضمن کاهش اضطراب انتظار، به توزیع بهتر مسافران در ایستگاه‌های مختلف کمک کرده و از تجمع ناگهانی جلوگیری می‌کند.

- **ایجاد ایستگاه‌های پهلوگیری:** به جای ایستگاه‌های کنار خیابانی، استفاده از ایستگاه‌های پهلوگیری با فضای کافی برای توقف چند اتوبوس به طور همزمان، از صف‌های طولانی و تأخیرهای ناشی از تداخل جلوگیری می‌نماید.

-**مدیریت تقاطع‌های چراغدار :**نصب سامانه‌های اولویت‌دهی به اتوبوس‌ها در تقاطع‌ها می‌تواند تأخیرهای ناشی از توقف در چراغ قرمز را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

پیشنهادات برای تحقیقات آتی

-مقایسه مدل‌های مختلف پیش‌بینی تأخیر (مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، درخت تصمیم و رگرسیون بردار پشتیبان) با مدل رگرسیون خطی ارائه شده در این پژوهش.

-بررسی تأثیر عوامل محیطی (شرایط جوی، روزهای تعطیل، مناسبت‌های خاص) بر زمان تأخیر اتوبوس‌ها.

-ارزیابی هزینه-فایده اقتصادی راهکارهای پیشنهادی (نصب چراغ‌های هوشمند، ایجاد ایستگاه‌های پهلوگیری) به منظور اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری.

-مطالعه تطبیقی تأخیر در خطوط BRT و خطوط معمولی (Feeders) در کلان‌شهر شیراز.

۶- مراجع

-اسماعیل‌پور، اشکان و خاکسار، حسن (۱۴۰۱). مدل سازی توسعه سیستم اتوبوس تندرو در معابر شهری. *مطالعات مدیریت ترافیک*، ۱۷(۶۴). ۱۴۰-۱۱۳

-الله‌دادی، مهدی، شماعی، علی و ساسان‌پور، فرزانه (۱۳۹۸). بررسی حمل و نقل عمومی و ارزیابی خطوط اتوبوس تندرو کلانشهر اصفهان مطابق با استاندارد BRT ۲۰۱۶. *مطالعات شهری*، ۹(۳۳). ۱۴-۳.

-طاهرخانی، حامد و طاهریان، آرش (۱۳۹۶). زمانبندی حرکت اتوبوسهای BRT با در نظر گرفتن محدودیت های ترافیکی حاصل از زمان های متغیر چراغ های راهنمایی و رانندگی. *مدیریت شهری*، ۱۶(۴۷). ۵۳۰-۵۲۳.

-عدلی، مهران و جعفری حقیقت‌پور، پگاه (۱۳۹۷). پیش بینی و بهینه سازی مدل زمان تاخیر مسافران اتوبوس به منظور افزایش رضایت‌مندی مسافرین. *سومین کنفرانس ملی پژوهشهای کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری.*

-کی‌منش، محمودرضا و پروینی، امیرمحمد (۱۴۰۲). طراحی شبکه اتوبوس تندرو با لحاظ کردن تقاضای سفر (مطالعه موردی شهر کرج). *مهندسی سازه و ساخت*، ۱۰(۴). ۲۲-۵.

-کی‌منش، محمودرضا و پروینی، امیرمحمد (۱۴۰۳). تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقل در صورت تغییرات سرفاصله اتوبوس تندرو. *مهندسی حمل و نقل*، ۱۶(۱). ۴۱۵۹-۴۱۷۵

-ماهپور، علیرضا (۱۴۰۰). مدلسازی و ارزیابی عوامل موثر بر رضایت کاربران سیستم حمل و نقل همگانی: مطالعه موردی مترو و اتوبوس تندرو شهر تهران. *جاده*، ۲۹(۴). ۱۸۷-۱۷۱.

-Al Huzomi, H., & Setiaji, B. (2025). A systematic review of bus delay factors in BRT systems: A comprehensive analysis of operational, infrastructural, and external determinants. *Transport Reviews, 45*(2), 234-258.

-Asimeng, E. T. (2025). Bus rapid transit implementation challenges in African cities: A case study of institutional and financial barriers. *Case Studies on Transport Policy, 13*, 100-116.

-Gaya, C., Ferreira, M., & Cunha, I. (2016). Bus arrival time and occupancy prediction models: A comparative study of survival analysis and linear regression approaches. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17*(8), 2212-2222.

-Karakurt, A. (2025). Deciphering the dynamics of bus rapid transit delays: A decision trees and Bayesian networks approach for Istanbul's Metrobus system. *Jurnal Teknik Sipil, 21*(1), 1-18.

-Khan, A., & Tabassum, S. (2025). Socio-economic impacts of bus rapid transit project delays in developing cities: A case study of Peshawar. *Transport Policy, 142*, 89-104.

-Kim, S., Lee, J., & Park, S. (2017). Hidden costs of construction delays in urban transit projects: Economic and social implications of extended implementation periods. *Journal of Construction Engineering and Management, 143*(9), 04017058.

-Shockley, D. B. (2023). The impact of smart card fare payments on transit bus dwell time: An empirical analysis of boarding efficiency. *Transportation Research Record, 2677*(5), 112-125.

-Wang, L., & Zhou, H. (2010). Governance and efficiency of urban bus services in Chinese megacities: A DEA and regression analysis. *Transportation, 37*(3), 511-528.

-Yang, Y., Li, S., & Wang, Z. (2024). Two-stage scheduling optimization for bus rapid transit corridors under time-dependent demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 158*, 104-122.

-Zhang, Q., Ma, Z., & Jenelius, E. (2024). Real-time bus arrival delays analysis using seemingly unrelated regression model: Capturing heterogeneous spatiotemporal effects. *Transportation*, 1-28. [Online first]

-Zhang, Q., Ma, Z., Wu, Y., Liu, Y., & Qu, X. (2025). Quantifying variable contributions to bus operation delays considering causal relationships: A causality-based explainable AI approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 184*, 103881.

-Zhang, Y., Liu, H., & Chen, W. (2023). Causal discovery for bus delay propagation analysis: A method integrating spatiotemporal data with explainable AI. *Multimodal Transportation, 2*(3), 100045.

-Zhao, F., & Li, M. (2023). Calibration of highway-transit speed relationships for improved transit network modeling in urban corridors. *Florida Department of Transportation Research Report*, 1-85.

Modeling the Delay of Urban Bus Services and Techno-Economic Analysis of Delay Reduction Strategies

Hosein Mohammadi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Seyed Ali Ziaee, *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.*

Mohsen Moosaabadi, Ph.D., Grad., Department of Traffic Safety, Faculty of Traffic Sciences and Technologies, Amin Police University, Tehran, Iran .

E-mail: sa-ziaee@um.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Punctuality of bus fleet movement in urban public transportation systems is one of the main foundations of passenger satisfaction. The present study aims to quantify the delay rate of bus services and identify the most effective methods to reduce it on urban routes. The study area is the bus network of Shiraz metropolitan city. To achieve the research objectives, field data including the number of boarding and alighting passengers, number of stations, dwell time at each station, and fare payment method (cash or electronic card) were collected from 28 buses operating on 14 main routes. Using multiple linear regression analysis, a model for estimating delay time was developed. Findings indicate that the number of boarding and alighting passengers, dwell time at stations, number of stations, and use of electronic fare cards (with negative effect) have the greatest share in predicting delay, respectively. Based on the results, replacing cash payments with electronic cards can reduce delay time by up to 32 percent. Additionally, constructing bay stops and developing intelligent information display systems are introduced as the most effective technical-economic solutions.

Keywords: Urban Bus Transit, Time Delay, Linear Regression, Intelligent Systems, Shiraz