ارزیابی عملکرد سامانه اتوبوس های تندروی خط شماره یک تهران با استفاده از مدل لوجیت دوگانه

مهرداد تجلی[۱]، مسعود خدادادیان[۲]، محمدرضا نقدی زاده[۳]، کامران اخباری[۴]
کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل ونقل، دانشگاه صنعتی شریف
۲- کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳- کارشناس ارشد برنامه ریزی حمل ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران
۴- کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

حمل و نقل همگانی یکی از اساسی ترین روش های مدیریت حمل و قل شهری است که موجب مدیریت تقاضای استفاده از وسایل نقلیه شخصی می گردد. یکی از مشکلات جذب مسافر در یک سیستم اتوبوس رانی، تغییرات زیاد در زمان سفر و قابلیت اطمینان نامناسب آن است. سیستم اتوبوس های تندرو با بهبود ویژگی های مختلف و افزایش قابلیت اطمینان در زمان سفر، یکی از کارآمدترین روش های حمل و نقل عمومی می باشد. عوامل بسیار زیادی بر روی عملکرد مناسب یک سیستم اتوبوس تندرو اثرگذار هستند که بررسی سهم هریک از آن ها جهت مدیریت سامانه ضروری می باشد. بنابراین، ارزیابی عملکرد سیستم حمل و نقل تندرو بر اساس عوامل موثر بر آن، جهت بهره-برداری هرچه بهتر، ضروری است. در این مطالعه، از طریق ساخت یک مدل لوجیت دوگانه، عملکرد ناوگان سرویس دهنده درخط شماره یک، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به کمک این مدل، سهم و نقش عوامل مختلف نظیر متوسط سرعت حرکت اتوبوس و متوسط زمان توقف در هر ایستگاه در بهبود عملکرد سیستم روشن گردیده است. بنابراین، مدل پیشنهادی، ابزار توانمندی برای مدیران و متخصصان در زمینه ارتقا مطلوبیت خطوط تندروی اتوبوس و در نتیجه افزایش رضایت مندی کاربران، به شمار می آید.

کلید واژه: حمل و نقل همگانی، سامانه اتوبوس های تندرو، ارزیابی عملکرد، مدل لوجیت دوگانه

۱- مقدمه

افزایش سریع و روزافزون تعداد وسایل حمل و نقل موتوری به ویژه اتومبیل و استفاده ی گسترده از آن ها در شهرهای بزرگ و کوچک باعث بروز مشکلاتی نظیر آلودگی های شدید زیست محیطی، مشکلات ترافیکی، اتلاف وقت شهروندان، مصرف بیش از حد انرژی، و افزایش تصادفات گردیده است. در چنین شرایطی، سیستم حمل و نقل عمومی به عنوان ابزاری در راستای بهبود تردد در سطح شهر مورد استفاده قرار می گیرد که می توان در این رابطه از اتوبوس های تندرو به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم های حمل و نقل عمومی یاد کرد. این سیستم با کاهش تقاضای اتومبیل شخصی و حتی تاکسی ها، زمینه ی صرفه جویی های اقتصادی را فراهم آورده است.

یکی از مشکلات جذب مسافر در یک سیستم اتوبوس رانی، تغییرات زیاد در زمان سفر آن می باشد. سیستم حمل و نقل اتوبوس های تندرو (BRT) کمک کرده اند تا این مشکل با بهبود برخی ویژگی های حمل و نقل عمومی تا حدود زیادی برطرف شود. سیستم اتوبوس های تندرو، یک سیستم بهبود یافته است که در خطوط ویژه به منظور ترکیب و انعطاف حرکت اتوبوس ها به همراه سیستم قطار شهری در کلان شهرهایی از جمله شهر بزرگ تهران مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین، اتوبوس های موجود در این مسیر ویژه دارای سرعت، سطح سرویس، و قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به اتوبوس های سرویس دهنده در یک مسیر عادی می باشند و در نتیجه راحتی مسافران را فراهم می آورند[۱].

ویژگی های معمول یک اتوبوس تندرو مانند زمان حرکت، قابلیت حرکت، نحوه ی جمع آوری کرایه، و حق تقدم در تقاطعات را می توان به عنوان فاکتورهای بهبود قابلیت آن در مقایسه با سایر وسایل نقلیه در نظر گرفت. با این حال، تاکنون تحلیل های محدودی جهت تایید اثر هریک از این عوامل در بهبود سیستم صورت گرفته است.

شناخت عوامل موثر بر عملکرد و مطلوبیت سیستم اتوبوس های تندرو، نه تنها در مرحله ی طراحی مهم است بلکه در طول عملیات نیز حائز اهمیت می باشد. این عوامل می تواند بر روی درک و نظر مسافران و استفاده کنندگان سیستم از نظر قابلیت اطمینان اثر منفی بگذارد. زمانی که یک خط اتوبوس تندرو طراحی می شود، افزایش نوسان در زمان سفر اتوبوس ها می تواند منجر به افزایش نیاز به ناوگان بیشتر شود تا از عملکرد و کیفیت سیستم کاسته نگردد، در حالی که کاهش زمان سفر این امکان را ایجاد می نماید که سفرهای بیش تری توسط یک اتوبوس شهری صورت بگیرد. این مطالعه به بحث در مورد نقش عوامل مختلف در عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو در خط یک تهران می پردازد و روشن می نماید که میزان اثر هریک از عوامل مورد بررسی تا چه حد باعث عملکرد مطلوب یا نامطلوب سیستم می گردد. خط شماره یک سامانه تندرو شهر تهران به طول ۱۸ کیلومتر دارای ۲۶ ایستگاه است که غرب تهران را به شمال شرق آن متصل می نماید. بطور کلی، ناوگان در این خط از ۱۷ تقاطع عبور می کنند و حدود ۱۶ درصد مسیر را بصورت مختلط با جریان ترافیک عادی طی می نمایند. این خط همچنین به تقاضایی حدود چهارصد هزار نفر در کل طول شبانه روز سرویس می دهد. بنابراین، اهمیت بسیار بالای این خط موجب گردیده است تا بطور مجزا عملکرد آن مورد بررسی قرار گیرد. در شکل (۱) موقعیت مکانی ایستگاه های خط شماره ۱ سامانه تندرو شهر تهران نمایش داده شده است.

شکل۱: موقعیت مکانی ایستگاه های خط شماره ۱ سامانه تندرو شهر تهران

۲- تعریف مسأله و اهداف تحقیق

عملکرد یک سیستم اتوبوس تندرو وابسته به عوامل بسیاری است که همگی در رابطه با مسیر حرکت آن می باشد. از آنجایی که در مطالعات اندکی به بررسی این عوامل پرداخته شده است، در این مطالعه عملکرد اتوبوس های تندرو خط شماره یک تهران که در مسیر آزادی تا تهران پارس در حرکت هستند مورد بررسی قرار گرفته است. مهمترین عواملی که می توان به آن ها اشاره نمود عبارتند از: متوسط سرعت حرکت اتوبوس در خط ویژه، متوسط سرعت حرکت اتوبوس در ترافیک عادی، متوسط زمان توقف در هر ایستگاه، متوسط زمان توقف در هر تقاطع، سرفاصله زمانی اعزام، و دوره اوج ترافیک می باشند. فرض اساسی مورد استفاده در مطالعه این است که با افزایش زمان سفر بین مبدا و مقصد میزان مطلوبیت سیستم برای مسافران پایین آمده و اتوبوس تندرو از عملکرد مطلوب خود دور می گردد. بنابراین، سعی گردیده است تا سهم هریک از موارد دکر شده در عملکرد مناسب اتوبوس های تندرو تعیین گردد.

۳- مروری بر مطالعات پیشین

مطالعاتی که بصورت مجزا بر روی تغییرات زمان سفر و مطلوبیت سیستم های حمل و نقل با استفاده از اتوبوس های تندرو صورت گرفته باشند، بسیار محدود می¬باشند. یک مشکل متداول در اکثر سیستم های اتوبوس تندرو که در مطالعات گذشته بر روی آن تاکید گردیده است کمبود بودجه برای بهبود تمام عوامل موثر بر عملکرد آن می باشد[۲]. مطالعاتی نیز به بررسی قابلیت اطمینان بجای تغییرات زمان سفر پرداخته اند که می تواند توصیف مناسبی از عملکرد سیستم حمل و نقل عمومی ارائه نماید[۳]. از آنجایی که با کاهش عدم قطعیت در سفرهای با اتوبوس شهری ارزش زمان مسافران افزایش می یابد، می توان قابلیت اطمینان زمان سفر را معیار مناسبی در برآورد عملکرد اتوبوس های تندرو در نظر گرفت[۴]. مسیر حرکت یک اتوبوس تندرو اساسی ترین ویژگی آن است که سایر ویژگی های این سیستم در ارتباط با آن تعریف می گردد[۵]. با توجه به این موضوع، واضح است که ایجاد یک مسیر ویژه بیش ترین اثر را در ارائه یک سیستم با قابلیت اطمینان بالا خواهد داشت[۳].

بطور مشخص، تفکیک کامل مسیر اتوبوس های تندرو باعث کاهش تاخیرات غیر قابل پیش بینی و ناخواسته در تقاطعات و در طول مسیر می گردد. زمانی که تفکیک کامل مسیر امکان پذیر نباشد و یا در بین گزینه های گردانندگان سیستم نباشد، توصیه می گردد تا جایی که امکان دارد حداکثر طول مسیر از اختلاط با جریان ترافیک عادی به دور باشد[۶]. همچنین، واضح است که هرچه طول مسافت طی شده توسط اتوبوس در جریان ترافیک عادی بیش تر شود، احتمال تاخیر در زمان سفر اتوبوس افزایش یابد[۶]. از طرف دیگر، در زمان ایجاد مسیر ویژه باید توجه نمود که در محل تقاطع چند خط مختلف، از نظر ایمنی و پیوستگی حرکت مشکلی بوجود نیاید[۷].

ایجاد یک مسیر ویژه باعث کاهش توقف های ناخواسته می گردد که در نهایت از نوسان و تغییرات زمان سفر اتوبوس های تندرو در ساعات اوج و غیر اوج خواهد کاست. تاخیر در تقاطعات چراغ دار حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد زمان کل سفر را شامل می گردد[۲] و در مناطق مرکزی شهر (DBC) این مقدار به حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد نیز می رسد[۶]. کاهش تا حدود ۱۰ درصد کل زمان سفر در نتیجه ی ایجاد حق تقدم در تقاطعات چراغ دار قابل انتظار می باشد که می تواند در کاهش نوسان و تغییرات در زمان سفر بسیار موثر باشد. در شهر پرتلند واقع در ایالت اورگن آمریکا، مقدار زمان سفر اتوبوس ها با ایجاد حق تقدم برای اتوبوس های تندرو حدود ۱۹ درصد کاهش یافته است و این موجب جلوگیری از خریداری اتوبوسهای اضافی برای ارائه خدمات بهتر گردیده است[۳]. برای استفاده کامل از مزایا و منافع حق تقدم در چراغ های راهنمایی، ایستگاه های اتوبوس های تندرو باید تا حد امکان از محل تقاطعات به دور باشند[۲]. برای خدمت رسانی بهینه به مسافران حاضر در ایستگاه ها، توصیه گردیده است که سرفاصله ی زمانی اتوبوس ها در ساعات اوج نباید بیش از ۳ تا ۱۰ دقیقه شود[۶]. این عمل همچنین باعث می گردد تا از تجمع مسافران در ایستگاه ها جلوگیری شود، که در نتیجه موجب کاهش زمان توقف اتوبوس در ایستگاه ها می گردد[۳]. علاوه بر این، ایجاد ایستگاه هایی هم تراز با سطح اتوبوس ها و دارای محل های ورود و خروج که با درهای اتوبوس منطبق هستند، می تواند اثر زیادی در کاهش زمان توقف در ایستگاه ها داشته باشد[۸]. جمع آوری کرایه در خارج از وسیله نقلیه و همچنین ایجاد چند درب در اتوبوس برای مسافرگیری نیز در کاهش زمان توقف اتوبوس موثر هستند[۳].

۴- جمع آوری اطلاعات

برای بررسی عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو، خط شماره یک مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از دلایل انتخاب این خط وجود انواع مختلف عوامل ایجاد تاخیر در عملکرد اتوبوس می باشد. از جمله ی این عوامل، تداخل مسیر حرکت اتوبوس با ترافیک عادی در بخش هایی از مسیر می باشد. علاوه بر آن، وجود تعداد نسبتاً بالای تقاطع های چراغ دار و بدون چراغ در مسیر حرکت اتوبوس اثر قابل توجهی بر روی عملکرد اتوبوس می گذارند. همچنین، استقرار این خط در محدوده ی مرکزی شهر تهران و تحت تاثیر قرار گرفتن آن توسط حجم بالای مسافرین و وسایل نقلیه شخصی درساعات اوج و غیر اوج ، می تواند بر روی عملکرد آن اثرگذار باشند.

از آنجایی که توزیع زمان سفر اتوبوس های تندرو بصورت لگاریتم نرمال در نظر گرفته می شود[۹] بررسی حداقل نمونه ی ۳۰ زمان سفر کامل عبور اتوبوس در یک خط مورد نیاز است. در این مطالعه، نمونه ی مورد بررسی، شامل ۱۰۰ اتوبوس تندرو در مسیر خط شماره یک است که بطور تصادفی در طول یک هفته ی کاری و در ساعات مختلف شبانه روز جمع آوری گردیده است. نحوه ی آماربرداری بدین شکل بوده است که پس از انتخاب تصادفی اتوبوس، آمارگیر در نقطه ی مبدا سفر، سوار بر اتوبوس شده و به ثبت زمان های مورد نیاز پرداخته است. زمان های برداشته شده عبارتند از: زمان حرکت اتوبوس در مسیر ویژه، زمان حرکت اتوبوس در مسیر مختلط با جریان ترافیک وسایل نقلیه شخصی، زمان توقف در ایستگاه ها، و زمان توقف در تقاطعات چراغ دار و بدون چراغ. علاوه بر این، سرفاصله ی زمانی اولیه هر اتوبوس در ایستگاه مبدا نسبت به وسیله ی جلویی و همچنین زمان اوج یا غیر اوج بودن سرویس دهی اتوبوس نیز برداشت گردیده است.

عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو بطور قابل ملاحظه ای وابسته به سرعت حرکت اتوبوس ها و زمان سفر آن ها می باشد[۱۰]. در این مطالعه فرض گردیده است که اتوبوس هایی که با زمان سفر مناسبی سرویس می دهند، دارای عملکردی مطلوب هستند و هنگامی که زمان سفر اتوبوس از حد معینی تجاوز نماید عملکرد آن نامطلوب خواهد بود. بر اساس اطلاعات بدست آمده توسط سازمان اتوبوس رانی شهرداری تهران، اتوبوس های تندرو در خط شماره یک از مبدا پایانه آزادی به مقصد پایانه ترمینال شرق و بالعکس، باید کل مسیر را در زمانی بین ۵۰ تا ۵۵ دقیقه طی نمایند[۱۱]. بنابراین، می توان فرض نمود اتوبوسی که دارای زمان سفری بیش از ۵۵ دقیقه است دارای عملکرد نامناسبی است. بطور کلی، جدول (۱) به معرفی متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه به همراه میانگین و انحراف معیار آن ها پرداخته است.

متغیر	نوع متغیر	تعریف	میانگین	انحراف معیار
عملکرد مطلوب اتوبوس تندرو	وابسته	1= اگر زمان سفر کمتر از 55 دقیقه باشد 0= اگر زمان سفر بالای 55 دقیقه باشد	۰/۳۴	۰/۴۸
متوسط سرعت حرکت اتوبوس در خط ویژه	مستقل	مسافت طی شده در مسیر ویژه تقسیم بر زمان طی شده در مسیر ویژه (متر بر ثانیه)	۹/۶۰	۱/۵۶
متوسط سرعت حرکت اتوبوس در ترافیک عادی	مستقل	مسافت طی شده در ترافیک عادی تقسیم بر زمان طی شده در ترافیک عادی (متر بر ثانیه)	۶/۸۶	۳/۵۴
متوسط زمان توقف در هر ایستگاه	مستقل	کل زمان توقف در ایستگاه ها تقسیم بر تعداد ایستگاه ها (ثانیه)	۳۰/۵۶	۱۱/۶۷
متوسط زمان توقف در هر تقاطع	مستقل	کل زمان توقف در تقاطعات تقسیم بر تعداد تقاطعات (ثانیه)	۲۲/۷۲	۱۱/۶۵
سرفاصله زمانی اعزام	مستقل	اختلاف زمان شروع حرکت در مبدا نسبت به اتوبوس جلویی (ثانیه)	۶۸/۱۹	۵۱/۶۸
دوره اوج	مستقل	1= اگر زمان سرویس در ساعات اوج باشد 0= اگر زمان سرویس در ساعات غیر اوج باشد	۰/۴۸	۰/۵۱

جدول ۱: معرفی متغیرهای مورد بررسی

۵- پرداخت مدل

برای بررسی عملکرد مناسب یک اتوبوس تندرو و عوامل موثر بر آن ، مدلی نیاز است تا بتواند نتایج را به صورت گسسته برآورد نماید. از آنجایی که عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو به دو دسته ی مطلوب و نامطلوب دسته بندی گردیده است، مدل لوجیت دوگانه امکان بررسی مسئله مورد نظر را خواهد داشت. برای استفاده از مدل دوگانه، متغیر وابسته «عملکرد مطلوب اتوبوس تندرو» هنگامی که زمان سفر یک اتوبوس کمتر از حد مجاز گردد مقدار ۱ به خود می گیرد که به معنی آن خواهد بود که عملکرد مناسب بوده است. در عین حال، اگر زمان سفر اتوبوس بیش از مقدار معین باشد، این متغیر مقدار صفر را به خود می گیرد که به معنی عملکرد نامطلوب آن خواهد بود. نمایش عمومی مدل لوجیت دوگانه که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است در رابطه (۱) آورده شده است.

۶- پرداخت مدل

$$P(Y=1)=\frac{e^{U}}{1+e^{U}}$$

$$U=\beta_0+\beta_1 X_1+....+\beta_j X_j$$

(رابطه ۱)

P – احتمال اینکه متغیر وابسته برابر ۱ گردد

U = تابع مطلوبیت

X_j = متغیر مستقل

β_j = ضریب متغیر X_j

در رابطه (۱)، هرچه تابع مطلوبیت به سمت مثبت افزایش پیدا کند، احتمال وقوع اتفاق مورد نظر به سمت ۱ بیش تر تمایل پیدا می کند، که نشان می دهد احتمال موفقیت (در اینجا عملکرد مناسب اتوبوس تندرو) افزایش می یابد. برای تولید مدل معرفی شده از بسته نرم افزار آماری Limdep با رویکرد مدل لوجیت استفاده گردیده است تا تابع حداکثر درست نمایی[1] برآورد و بیشینه گردد.

1. Maximum Likelihood

برای تولید مدل از روش عقب گرد[1] استفاده شده است. در ابتدا هر شش متغیر معرفی شده در جدول (۱) در مدل لوجیت دوگانه قرار داده شده است و پس از آن متغیرهایی که معنادار نبودند به ترتیب درجه ی اهمیتشان حذف گردیده اند. اثر یک متغیر، زمانی معنادار در نظر گرفته می شود که ضریب آن از نظر آماری با صفر متفاوت باشد، که این مهم با تست فرضیه ی $H_0 = \beta_j = 0$، سنجیده می شود. نتیجه ی مدل شامل مقادیر سطح معنی داری و P-Value ، برای ضریب هر متغیر می باشد. سطح معنی داری معیاری برای احتمال درست بودن فرض صفر می باشد. فرض صفر در نظر گرفته شده این است که ضریب هر متغیر با صفر تفاوتی ندارد، که بعنوان یک معیار برای تصمیم گیری در مورد حضور یا عدم حضورِ یک متغیر در مدل در نظر گرفته شده است. این معیار معمولاً به اندازه ی ۵ درصد در نظر گرفته می شود. بنابراین، هر متغیر با سطح معنی داری کمتر از ۵ درصد این اطمینان را حاصل می کند که به احتمال ۹۵ درصد با صفر متفاوت است. متغیرهای با سطح معنی داری بالای ۵ درصد از مدل حذف گردیده است به شکلی که متغیری که بالاترین مقدار P-Value را دارد زودتر حذف می شود تا در نهایت مدلی بدست آید که همه ی ضرایب آن از لحاظ آماری معنادار باشد.

پس از پرداخت مدل لوجیت باید توجه گردد زمانی که ضریب β_j مثبت باشد، افزایش متغیر متناظر X_j موجب افزایش احتمال وقوع عملکرد مناسب سیستم می گردد. بطور عکس، زمانی که β_j منفی باشد، افزایش متغیر X_j موجب کاهش احتمال وقوع عملکرد مناسب سیستم می گردد. در تفسیر ضرایب موجود در مدل، مهم است که بیاد داشته باشیم که ضریب β_j نمایانگر تغییر در لگاریتم احتمال در رابطه با یک واحد افزایش متغیر در زمانی می باشد که تمام متغیرهای دیگر ثابت در نظر گرفته شوند و نه اینکه یک واحد تغییر در X_j بطور مستقیم بر روی احتمال وقوع اثر گذارد.

پس از اعمال همه ی متغیرها در مدل، دو متغیر «سرفاصله ی زمانی اعزام» و «دوره اوج» به ترتیب از مدل اولیه حذف گردیدند زیرا مقدار P-Value برای هرکدام از آن ها بالای ۵ درصد بوده است. در نهایت مدلی با ۴ متغیر که همگی از لحاظ آماری معنادار هستند، تشکیل شده است. جدول (۲) مقدار ضرایب و سطح معنی داری را برای هر دو مدل اولیه و نهایی نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، چهار متغیر سرعت متوسط حرکت اتوبوس در خط ویژه، سرعت متوسط حرکت اتوبوس در ترافیک مختلط، متوسط زمان توقف در هر ایستگاه ، و متوسط زمان توقف در تقاطعات بر روی عملکرد مطلوب اتوبوس های تندرو اثرگذار می باشند.

متغیر	مدل اولیه		مدل نهایی	
	ضرایب	P-Value	ضرایب	P-Value
ثابت	-۲۱/۱۶۳	۰/۰۱۷	-۲۰/۴۰۲	۰/۰۰۶
متوسط سرعت حرکت اتوبوس در خط ویژه	۳/۰۰۲	۰/۰۰۳	۲۰/۹۵۰	۰/۰۰۲
متوسط سرعت حرکت اتوبوس در ترافیک عادی	۱/۲۸۱	۰/۰۰۷	۱/۲۴۱	۰/۰۰۳
متوسط زمان توقف در هر ایستگاه	-۰/۴۵۵	۰/۰۰۲	-۰/۴۴۴	۰/۰۰۲
متوسط زمان توقف در هر تقاطع	-۰/۲۹۵	۰/۰۰۴	-۰/۲۷۸	۰/۰۰۲
سرفاصله زمانی اعزام	۰/۰۱۰	۰/۵۰۳	-	-
دوره اوج	-۰/۷۸۶	۰/۱۲۷	-	-
	$\rho^2 = ۰/۲۸$		$\rho^2 = ۰/۲۶$	

جدول ۲: نتایج اولیه و نهایی مدل لوجیت دوگانه

1- Backward

یکی از اصول اولیه ساخت مدل، عدم وجود همبستگی بین متغیرهای مستقل می باشد. با استفاده از آزمون وایف[1] مشخص گردید که هیچ گونه همبستگی بین متغیرهای مستقل وجود ندارد. تست وایف یک ضریبی را ارائه می دهد که نشان می دهد واریانس ضریب یک متغیر تا چه حد بخاطر وجود همبستگی با سایر متغیرها افزایش یافته است. نتایج این آزمون در جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد تمام ضرایب مقداری کمتر از ۵ دارند که مرز وجود همبستگی بین متغیرهاست[۱۲]. در نتیجه، هیچ گونه همبستگی بین متغیرهای مستقل ملاحظه نمی شود.

متغیر	ضریب VIF
متوسط سرعت حرکت اتوبوس در خط ویژه	۱/۲۶۳
متوسط سرعت حرکت اتوبوس در ترافیک عادی	۱/۲۳۳
متوسط زمان توقف در ایستگاه ها	۱/۱۸۹
متوسط زمان توقف در تقاطعات	۱/۲۳۸
سرفاصله زمانی	۱/۳۰۳
ساعت اوج	۱/۲۰۵

جدول ۳: نتایج تست وایف

۷- تحلیل نتایج مدل

متغیر «ساعت اوج» اگرچه در تئوری می تواند بر روی عملکرد اتوبوس اثر منفی بگذارد، ولی از آنجایی که اتوبوس در خط ویژه عبور می کند و تداخل کمی با مسیر ترافیک عادی دارد، این متغیر در مدل معنادار نگردیده است. همانگونه که در مدل اولیه دیده می شود، علامت ضریب متغیر «ساعت اوج» منفی می باشد و مقدار P-Value آن تا حدود زیادی نزدیک به مرز معناداری بوده است و توجه به این نکته مهم خواهد بود که در مسیرهایی که تداخل اتوبوس با ترافیک عادی به میزان قابل توجهی وجود داشته باشد و مسیر ویژه بخش نسبتاً اندکی از مسیر را تشکیل دهد، به احتمال بسیار زیاد این متغیر معنادار خواهد شد.

متغیر « متوسط سرعت حرکت اتوبوس در خط ویژه» همانطور که انتظار می رفت دارای اثر مثبتی بر روی مطلوبیت سیستم می باشد. این بدان معناست که هرچه سرعت اتوبوس در خط ویژه افزایش یابد، احتمال عملکرد مطلوب و در نتیجه سریع تر رسیدن اتوبوس به مقصد افزایش خواهد یافت. نکته ی حائز اهمیت در این پژوهش این است که متوسط سرعت اتوبوس در خط ویژه بالاترین اثر را بر روی مطلوبیت دارد و هیچ متغیر دیگری به اندازه ی آن نمی تواند در سیستم تغییر ایجاد نماید.

می توان گفت با بهبود وسیله ی نقلیه و ارتقای آن ها از نظر مکانیکی تا حد زیادی می توان عملکرد سیستم را بهبود بخشید. علاوه بر این کاهش تعداد ایستگاه ها و افزایش فاصله بین ایستگاه ها می تواند نقش بسیار زیادی در افزایش متوسط سرعت اتوبوس در خط ویژه داشته باشد زیرا امکان شتاب گرفتن بیش تر را به وسیله نقلیه خواهد داد. البته قابل ذکر است که سرعت اتوبوس بطور نامحدود نمی تواند افزایش یابد و باید استانداردهای راحتی مسافران نیز در نظر گرفته شود. بنابراین، یافتن یک سرعت بهینه که هم موجب آسایش مسافران گردد و هم عملکرد سیستم را بهبود ببخشد ضروری می باشد.

متغیر «متوسط سرعت حرکت در ترافیک عادی» دومین عامل اثرگذار از لحاظ اهمیت بر روی عملکرد اتوبوس تندرو می باشد. با ملاحظه ی مدل نهایی می توان فهمید که هرچه متوسط سرعت در ترافیک مختلط افزایش یابد احتمال عملکرد مناسب سیستم بیش تر می شود. به عبارت دیگر، با تبدیل قسمت هایی از مسیر اتوبوس تندرو که در اختلاط با جریان ترافیک عادی هستند به مسیرهای ویژه، عملکرد سیستم تا حد قابل قبولی بهبود پیدا می کند. سومین متغیر اثرگذار بر روی عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو «متوسط زمان توقف اتوبوس در ایستگاه ها» می باشد که بطور منفی در عملکرد آن اثر می گذارد. این بدان معناست که هرچه زمان توقف کاهش یابد احتمال عملکرد مطلوب افزایش

1- Variance Inflation Factor

می یابد. مهمترین عاملی که باعث توقف کمتر در ایستگاه ها می گردد ساماندهی رفتار مسافران مراجعه کننده به ایستگاه می باشد. جمع آوری کرایه خارج از وسیله و کاهش سرفاصله ی زمانی بین اتوبوس های متوالی می تواند بطور کاملاً محسوسی زمان توقف در ایستگاه ها را کاهش دهد و در نتیجه عملکرد سیستم را بهبود بخشد.

آخرین عامل مهم اثرگذار بر روی عملکرد اتوبوس های تندرو، حضور تقاطعات و ایجاد تاخیر در زمان سفر می باشد. هرچه زمان توقف در تقاطعات کاهش یابد، احتمال عملکرد مناسب سیستم افزایش می یابد، که این یک رابطه ی کاملاً منطقی می باشد. با ایجاد تقاطعات غیرهمسطح یا ایجاد اولویت در حرکت اتوبوس در تقاطعات می توان به راحتی به این مهم دست یافت.

به منظور بررسی کمی اثر هریک از متغیرهای مورد بررسی را بر روی عملکرد مطلوب سیستم اتوبوس های تندرو را، می توان از اثر حاشیه ای و الاستیسیته هریک از متغیرها در مدل نهایی بهره گرفت. رابطه ی (۲) نحوه ی محاسبه ی اثر حاشیه ای را نشان می دهد. قابل ذکر است، متوسط اثر حاشیه ای را با میانگین گیری از تابع بدست آمده در مشاهدات، می توان محاسبه نمود. در این رابطه $f(\beta' X)$ تابع چگالی و X_j بردار متغیرها و β' بردار ضرایب می باشد. با داشتن اثر حاشیه ای مقدار الاستیسیته نیز قابل محاسبه می باشد که در رابطه (۳) نحوه ی محاسبه ی الاستیسیته برای متغیر X_j نشان می دهد. جدول (۴) مقادیر اثر حاشیه ای و الاستیسیته را برای هر متغیر نشان می دهد.

(رابطه ۲)

$$\frac{\partial E[Y|X]}{\partial X}=\frac{\partial F(\beta' X)}{\partial X}=\frac{dF(\beta' X)}{d(\beta' X)}\beta=F(\beta' X)\beta=f(\beta' X)\beta$$

(رابطه ۳)

$$\text{اثر حاشیه ای}\times\frac{\partial \log E[Y|X]}{\partial \log X_j}=\frac{X_j}{E[Y|X]}\frac{\partial E[Y|X]}{\partial X_j}=\frac{X_j}{E[Y|X]}$$

متغیر	اثر حاشیه ای	الاستیسیته	P-Value
متوسط سرعت حرکت در خط ویژه	۰/۱۳۱	۰/۲۰۱	۰/۰۰۲
متوسط سرعت حرکت در ترافیک عادی	۰/۰۵۵	۰/۰۴۷	۰/۰۰۳
متوسط زمان توقف در هر ایستگاه	۰/۰۲۰	۰/۰۹۳	۰/۰۰۲
متوسط زمان توقف در هر تقاطع	۰/۰۱۲	۰/۰۴۳	۰/۰۰۳

جدول ۴: مقادیر اثر حاشیه ای و الاستیسیته هر متغیر

با ملاحظه ی نتایج الاستیسیته می توان دید که با افزایش ۱٪ متوسط سرعت اتوبوس در خط ویژه، احتمال بهبود عملکرد سیستم به اندازه ی ۰/۲۰٪ افزایش می دهد که مقدار قابل توجهی خواهد بود. همین طور می توان دید که با افزایش ۱٪ سرعت متوسط اتوبوس در ترافیک عادی، احتمال بهبود عملکرد سیستم ۰/۰۵ ٪ افزایش می¬یابد که نسبت به متغیر قبلی اثر کمتری دارد. همچنین، افزایش یک درصدی متغیرهای متوسط زمان توقف در ایستگاه ها و تقاطعات به ترتیب احتمال عملکرد مناسب سیستم را به اندازه ی ۰/۰۹ ٪ و ۰/۰۴٪ کاهش می دهند. در مجموع می توان دید که تغییر در دو متغیر متوسط سرعت اتوبوس در خط ویژه و متوسط زمان توقف در ایستگاه ها بیش ترین اثر را بر روی عملکرد مطلوب سیستم اتوبوس های تندرو خواهند گذاشت. بنابراین، با برنامه ریزی درست در ایستگاه ها و بهبود سخت افزاری سیستم بهترین نتیجه را می توان از سیستم گرفت و سرویس مناسبی ارائه داد.

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه، به منظور بهبود عملکرد سیستم اتوبوسهای تندرو، سعی گردید تا با بررسی عوامل مختلف موثر بر آن، مهمترین فاکتورهای اثرگذار شناسایی شوند و سهم هریک بطور جداگانه مشخص گردد. برای این منظور، متغیرهای متوسط سرعت حرکت اتوبوس در مسیر ویژه، متوسط سرعت حرکت اتوبوس در ترافیک عادی، متوسط زمان توقف در هر ایستگاه، متوسط زمان توقف در هر تقاطع، سرفاصلهی زمانی اعزام، و ساعت اوج مورد مطالعه قرار گرفتند تا سهم هریک در مطلوبیت سیستم معین گردد. در نهایت مشخص گردید بهبود در متغیر متوسط سرعت حرکت در خط ویژه و متوسط زمان توقف در ایستگاه ها می تواند بیشترین اثر را در بهبود عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو بگذارد و زمان سفر آن را کاهش دهد. با توجه به مدل ساخته شده، ملاحظه می گردد که هر ۱٪ افزایش سرعت متوسط در خط ویژه باعث افزایش احتمال عملکرد مناسب اتوبوس به اندازه ی ۰/۲٪ خواهد شد و همچنین کاهش ۱٪ زمان توقف در ایستگاه ها منجر به افزایش احتمال عملکرد مطلوب به مقدار ۰/۹۰٪ خواهد گردید. این مقادیر بسیار قابل توجه هستند و تغییرات اندک در سیستم مانند ارتقای سخت افزاری ناوگان اتوبوس رانی، تخلیه و بارگیری سریع تر مسافر، و کاهش تعداد تقاطعات موجب بهبود قابل ملاحظه ی عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو می گردد. متغیرهای متوسط سرعت حرکت در ترافیک عادی و متوسط زمان توقف در تقاطعات نیز اثر معناداری بر روی عملکرد اتوبوس ها دارند و افزایش مقدار هریک از آن ها به ترتیب موجب افزایش و کاهش احتمال بهبود عملکرد می گردد. البته قابل ذکر است که دو متغیر سرفاصله زمانی اعزام و دوره اوج، اگرچه در موضوع حمل و نقل همگانی بسیار اثرگذار هستند، ولی بدلیل حرکت اتوبوس در مسیر ویژه در این مطالعه معنادار نگردیده اند.

در این مطالعه، بخش کوچکی از سیستم اتوبوس های تندرو در شهر تهران مورد تحلیل قرار گرفته است و پیشنهاد می گردد تا برای تمام خطوط موجود، تحلیل های آماری مناسب صورت بگیرد. همچنین، از آنجایی که تعداد نمونه های مورد مطالعه خیلی بالا نبوده است، عملکرد سیستم فقط به دو دسته ی مطلوب و نامطلوب تقسیم گردیده است. بنابراین، توصیه می گردد با جمع آوری حداکثر نمونه، عملکرد را به دسته های ریزتری تقسیم نمود تا تحلیل دقیق تری حاصل گردد. در نتیجه، مسئولان با اطمینان بالاتری می توانند تصمیم مورد نیاز را اتخاذ نمایند.

۷- مراجع

1- FTA, U.S., 2009, Department of Transportation. http://www.fta.dot.gov/ assistance/technology/research_4240.html.

2- Levinson, H. S., 2003, Bus Rapid Transit on City Streets, How Does It Work. Presented at 2nd Urban Street Symposium, Anaheim, Calif.

3- Tann, H. M., and D. Hinebaugh. 2009, Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making. Publication No. FTA-FL-26-7109.2009.1. FTA, U.S. Department of Transportation.

4- Uno, N., F. Kurauchi, H. Tamura, and Y. Iida., 2009, Using Bus Probe Data for Analysis of Travel Time Variability. Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 2–15.

5- Miller, M. A., 2009, Bus Lanes/Bus Rapid Transit Systems on Highways: Review of the Literature. Publication UCB-TSP-PWP-2009-1. California Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation.

6- Levinson, H. S., S. Zimmerman, J. Clinger, J. Gast, S., 2003, Rutherford, and E. Bruhn. TCRP Report 90: Bus Rapid Transit Volume 2: Implementation Guide. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

7- Vincent, W., L., 2007, Callaghan. A Preliminary Evaluation of the Metro Orange Line Bus Rapid Transit Project. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

8- Kantor, D., G. Moscoe, and C. Henke., 2006, BRT Issues and Technologies in Level Boarding Strategies for BRT. Journal of Public Transportation, Special Edition: Bus Rapid Transit, Vol. 9, No. 3, pp. 89–101.

9- Zhang, R., Wang, T., Wan, H., Lei, L., & She, B. 2011. Analysis of Jinan BRT Speed Characteristics Based on Vehicle Traveling Data Recorder. In 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP).

10- Schramm, L., Watkins, K., & Rutherford, S. 2010. Features that affect variability of travel time on bus rapid transit systems. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2143(1), 77-84.

11- http://www.mehrnews.com/news/2350438

12- Kutner, M.H., C.J. Nachtsheim, J. Neter., 2004, Applied Linear Regression Models, fourthed. Mc-Graw-Hill, Irwin, New York.