

مطالعه و بررسی سیستم اتوبوس‌های تندرو با استفاده از شبیه‌سازی ترافیکی و اقتصادسنجی

محمدحسین عباسی^۱، سید مصطفی جعفرزاده فدکی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران.

نام نویسنده مسئول:

محمدحسین عباسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹

چکیده

امروزه سیستم‌های حمل و نقلی کارا هستند که دسترسی راحت، زمان سفر مطلوب، از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر، از نظر آلودگی، راحتی و ایمنی مسافران در سطح قابل قبولی قرار داشته باشند. در این پژوهش، خط یک اتوبوس‌های تندرو تهران (آزادی به تهرانپارس) مورد بررسی قرار گرفته است. در این خط وضعیت سرعت، جریان اتوبوس‌ها، هوشمندسازی چراغ‌های راهنمایی تقاطع‌ها و اصلاح برخی از ایستگاه‌ها تحت ۱۰ سناریوی مختلف در نرم افزار Aimsun شبیه‌سازی شده و در نهایت از نقطه نظر اقتصادی و محیط‌زیستی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که با جایگزینی چراغ‌های زمان ثابت با چراغ‌های هوشمند، زمان سفر به میزان ۶.۳۱٪، کربن دی اکسید ۲۵.۹٪، نیتروژن اکسید ۶.۲٪ و مصرف سوخت ۵.۲۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین میزان کاهش زمان سفر با توجه به ارتقای سرعت اتوبوس‌های تندرو از ۱۳ به ۱۸ کیلومتر بر ساعت، در سناریوی دوم به عدد ۵۱۲ ثانیه خواهد رسید، در حالی که اگر بخواهیم این کاهش زمان سفر به ۹۳۲ ثانیه برسد، باید سرعت اتوبوس‌ها را به ۲۳ کیلومتر بر ساعت ارتقا دهیم. همچنین میزان هزینه صرفه‌جویی شده در وقت مسافری به صورت سالانه در سرعت ۲۸ کیلومتر بر ساعت، معادل ۳۴۶ میلیارد تومان خواهد بود در حالی که این رقم برای سرعت‌های ۱۸ و ۲۳ کیلومتر بر ساعت برابر با ۱۳۷ و ۲۴۹ میلیارد تومان تخمین زده شده است. همچنین طبق برآوردهای انجام شده، میزان هزینه صرفه‌جویی شده در اثر کاهش مصرف سوخت در سناریوی هفتم و هشتم (با حذف ایستگاه‌ها) به ترتیب برابر ۱۴۲ و ۱۲۴ تومان-لیتر در هر صد کیلومتر خواهد بود.

واژگان کلیدی: اتوبوس‌های تندرو، شبیه سازی ترافیک، Aimsun، آنالیز اقتصادی، آلودگی هوا.

مقدمه

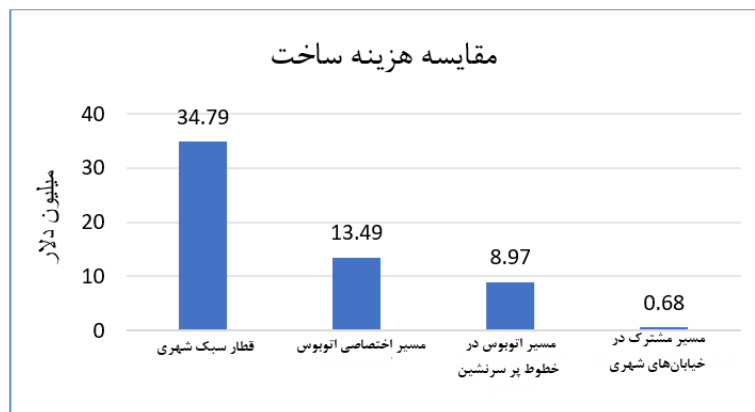
امروزه با توجه افزایش تراکم جمعیت شهرنشینی به خصوص در مراکز تجاری و اداری شهرها، نیاز به استفاده از سیستم‌های حمل و نقل پویا بیش از پیش توجیه پیدا می‌کند. سیستم‌های حمل و نقل سنتی غالباً باعث ایجاد آلودگی بیشتر در محیط‌زیست، هدر رفتن وقت مسافری، عدم رضایت و راحتی مسافری، ایجاد گره‌های ترافیکی در نقاط پر ازدحام، عدم همسانی با سایر مدهای حمل و نقلی و غیره هستند که نیازمند ارائه یک طرح نو بر اساس وضعیت پیش رو می‌باشند. خطوط اتوبوس‌های تندرو که از چند سال پیش در تهران راه اندازی شدند یکی از راهکارهای اولیه و مناسب برای کنترل ترافیک در نقاط پر ازدحام شهر هستند. اولین خط در سال ۱۳۸۶ ما بین پارک سوار آزادی تا چهار راه تهرانپارس ایجاد شد که نقش مهمی را در تسهیل رفت و آمد مسافران از غرب تهران به شرق تهران ایفا کرد. پس از این خط، خطوط دیگری نیز ایجاد شدند اما نتوانستند همانند خط یک تأثیر قابل توجهی بر جای بگذارند. با توجه به وضعیت موجود، نیاز است که مدیریتی علمی بر روی خطوط اتوبوس‌های تندرو صورت بپذیرد تا بتوان این خطوط را بر مبنای معیارهای کمی و کیفی در سطح قابل قبولی نگاه داشت. یکی از این راهکارها شبیه‌سازی وضعیت موجود این خطوط در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیک است که می‌توان خطوط مختلف را برای حالات و سناریوهای مختلف بررسی کرده و به آنالیز اقتصادی آنها پرداخت. زمانیان و همکاران در مطالعات خود به ارزیابی فنی اقتصادی و زیست محیطی خط دوم اتوبوس‌های تندرو تهران پرداختند و به نتیجه رسیدند که یکی از منافع ایجاد سامانه‌های حمل و نقل عمومی، بهینه‌سازی مصرف سوخت در کشور می‌باشد، اتوبوس‌های تندرو در صورت احداث باعث جذب مسافر و در نهایت صرفه‌جویی در مصرف سوخت خواهد گردید [۱]. عبدالرضا کرباسی و همکاران در مطالعات خود نقش اتوبوس‌های تندرو را در کاهش هزینه‌های اجتماعی، آلودگی هوا و مصرف سوخت در مسیر پارک وی تا تجریش مورد بررسی قرار دادند که نتایج آلودگی هوا قبل و پس از راه‌اندازی اتوبوس‌های تندرو نشان داد که در صورت توسعه خط جدید در مسیر پارک وی تا میدان تجریش، ضمن کاهش بار ترافیک شاهد پایین آمدن هزینه‌های اجتماعی و انتشار آلودگی و نیز صرفه‌جویی در مصرف سوخت خواهیم بود [۲]. امیر روحی و همکاران در مورد ارزیابی استراتژی استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت اتوبوس‌های تندرو به این نتیجه دست یافتند که این سیستم نسبت به سایر مدهای حمل و نقل، کمترین میزان سرمایه‌گذاری را نیازمند است [۳]. زرآبادی و همکاران در مورد ارائه راهکارهای افزایش مطلوبیت سیستم اتوبوسرانی به این نتیجه دست یافتند که اتوبوس‌های تندرو نسبت به اتوبوس معمولی از نظر شاخص‌های محیط زیستی و ترافیکی ارجحیت دارد [۴]. صدیق باور و همکاران به ارزیابی و تحلیل عملکرد سیستم حمل و نقل اتوبوس‌های تندرو در کلانشهرها پرداختند و چهار سناریو مختلف را در نرم‌افزار aimsun مدل نموده و به تحلیل نتایجی همچون زمان سفر و سرعت پرداختند که به ارجحیت و مطلوبیت اتوبوس‌های تندرو با استفاده از چراغ‌های هوشمند دست یافتند [۵]. امیرفرجی ملائی و همکاران در مطالعات خود ابعاد پایداری در بهره‌برداری از سیستم اتوبوس‌های تندرو در قالب تجارب جهانی و به صورت موردی در شهر تهران ارائه کردند و نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از آن بود که اتوبوس‌های تندرو در ابعاد مختلف از جمله بهداشتی و پزشکی منجر به صرفه جویی اقتصادی می‌گردد [۶]. بر طبق گزارش نهایی آنالیز سود به هزینه در شهر مکزیکوسیستی هریک از هزینه‌ها و فواید مربوط به سیستم اتوبوس‌های تندرو اعم از صرفه جویی در زمان سفر، فواید سلامتی، کاهش گازهای گلخانه‌ای، هزینه‌های ساخت و راه اندازی و غیره به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷]. همچنین طی مطالعات حاجیان و همکاران بر خط ۵ اتوبوس تندرو شهر تهران میزان اثربخشی آن را اندازه‌گیری نموده و دریافتند که با احداث این خط میزان حجم و چگالی به میزان ۳۰۱۷ و ۷۸ درصد به ترتیب کاهش و میزان سرعت وسایل در مسیر ۹۱۰۰۸ درصد افزایش یافته است [۸]. وارن اشمیل و همکاران شاخص‌های آلودگی هوا همچون کربن مونواکسید، بنزن و ریزگردها را قبل و بعد از احداث اتوبوس تندرو در مکزیکوسیستی سنجیده و دریافتند که آلاینده‌های مذکور بین ۲۰-۷۰٪ کاهش یافته و از نظر سلامتی و محیط زیستی اتوبوس‌های تندرو ارزشمند می‌باشند [۹]. لیائو و همکاران به شبیه‌سازی خطوط غربی و شرقی اتوبوس‌های تندرو در نرم افزار aimsun پرداخته و مقایسه‌ای بین اتوبوس تندرو با قابلیت اولویت دهی و بدون اولویت دهی به سیستم حمل و نقل عمومی انجام دادند و دریافتند ۱۵-۱۲ درصد کاهش زمان سفر و ۲۰-۱۶ درصد میزان تاخیر اتوبوس‌ها با قابلیت اولویت‌دهی کمتر می‌باشد [۱۰]. آنوگرا ایلاهی و ایراوان به شبیه‌سازی خطوط اتوبوس تندرو در اندوزی با استفاده از نرم افزار aimsun پرداخته و مدل مذکور را تحت سناریوهای مختلف آنالیز نموده و در انتها از میان سناریوهای مختلف، سناریو اولویت‌دهی به اتوبوس‌های تندرو را به عنوان سناریو برتر انتخاب نمودند که موجب کاهش ۴۱ درصدی زمان سفر و ۵۷ درصدی تاخیر در شبکه می‌گردد [۱۱]. با توجه به هزینه ساخت کم خطوط اتوبوس‌های تندرو نسبت به سایر مدهای حمل و نقلی، این خطوط غالباً بیشتر از سایر مدها دست‌خوش تغییر و اصلاح می‌شوند. با نگاهی به آمار و ارقام ارائه شده از سوی سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران و مقایسه آن با تجربه موفق سایر

کشورها به این موضوع پی می‌بریم که این خطوط در برخی از شاخص‌ها دچار عدم مطلوبیت هستند که با صرف هزینه‌های کمی می‌توان شاخص‌ها را به سطح قابل قبولی ارتقا داد. با انجام برخی اصلاحات نظیر حذف برخی از ایستگاه‌ها، افزایش تعداد اتوبوس‌ها، هوشمند سازی چراغ‌های راهنمایی تقاطع‌های مسیر، افزایش سرعت و ... می‌توان به وضعیت مطلوبی رسید که این خود در طی یک دوره چند ساله باعث برگشت هزینه‌های سرمایه‌گذاری خواهد شد و از جهات دیگر باعث کاهش هزینه‌های مربوط به اتلاف وقت مسافران، کاهش آلودگی هوا، استقبال بیشتر مردم و غیره خواهد شد. در این مقاله، معیارهای کمی خطوط تندرو تحت سناریوهای مختلف در نرم‌افزار Aimsun شبیه‌سازی شده و نتایج آنها مورد تجزیه و تحلیل اقتصادی قرار گرفته است. روش‌های گردآوری اطلاعات در این مقاله بر اساس آمار و اطلاعات سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران، سازمان اتوبوس‌رانی و همچنین برداشت‌های میدانی می‌باشد. هدف این مقاله بهبود شاخص‌های کمی موجود در خط یک اتوبوس‌های تندرو تهران می‌باشد. بدین منظور ۱۰ سناریوی مختلف در نرم‌افزار Aimsun شبیه‌سازی شده‌اند که از این ده سناریو، سه سناریو مربوط به اصلاح سرعت، سه سناریو مربوط به تغییر تعداد اتوبوس‌ها، دو سناریو مربوط به حذف ایستگاه‌ها و یک سناریو نیز مربوط به هوشمند سازی چراغ‌های راهنمایی مسیر می‌باشد که تمامی این سناریوها با سناریوی اول که همان وضع موجود است به صورت نسبی مقایسه شده‌اند. بر اساس داده‌های خروجی این نرم‌افزار، آنالیز اقتصادی برای اصلاح وضعیت موجود ارائه شده است که این سناریوها توجیه اقتصادی نیز داشته باشند.

سیستم اتوبوس‌های تندرو

طبق تعریف انجمن فدرال حمل و نقل سیستم اتوبوس تندرو یک مد سریع حمل و نقل است که علاوه بر تأمین کیفیت حمل و نقل ریلی، انعطاف پذیری حمل و نقل اتوبوسی را نیز به همراه دارد [۱۲].

اجزا سیستم اتوبوس تندرو با نوع عملکرد و محیط بکارگیری این سیستم قابل تطبیق می‌باشند و این سیستم می‌تواند در مناطق گوناگون به صورت مناسب اجرا گردد. عملکرد سیستم اتوبوس‌های تندرو توسط پنج مشخصه شامل: زمان سفر، قابلیت اطمینان، هویت و چشم انداز، ایمنی و امنیت و ظرفیت سنجیده می‌شود. پارامترهایی که بایستی در مطالعات اولیه احداث خطوط اتوبوس‌های تندرو در نظر گرفته شوند عبارتند از پیدا کردن کریدور مناسب برای احداث، در نظر گرفتن فضای کافی خیابان‌ها برای عبور و مرور اتوبوس‌ها و فضای مناسب ایستگاه‌ها، تقاضای ترافیک، هزینه‌ها، فواید و سایر اثرات احداث خطوط اتوبوس‌های تندرو بر جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاسی است. سیستم اتوبوس تندرو با تسهیلات و مشخصه‌هایی که برای مسافران فراهم می‌کند باعث افزایش جذابیت سفر نسبت به سایر مدهای حمل و نقلی می‌گردد. اهم دلایل استفاده از این مد عبارتند از: سرعت اجرای بالا برخلاف اجرای خطوط ریلی، کمتر بودن هزینه‌های ساخت و نگهداری خطوط اتوبوس تندرو نسبت به خطوط ریلی می‌باشد. در شکل ۱ طبق آمار انجمن فدرال آمریکا هزینه‌های ساخت اتوبوس تندرو و قطار سبک شهری با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل (۱): هزینه ساخت اتوبوس تندرو و قطار سبک شهری [۱۲]

مشخصات سیستم اتوبوس تندرو

وسایل نقلیه اثر مستقیمی در سرعت، ظرفیت، راحتی و سایر اثرات محیط زیستی دارند. این وسایل نقلیه همچنین به عنوان نماد و المانی از اتوبوس‌های تندرو شناخته می‌شوند. بر اساس نظر برخی از کارشناسان، وسایل نقلیه مهم‌ترین جزء از نگاه کاربران و غیر کاربران در کیفیت سیستم اتوبوس تندرو می‌باشند. همچنین وسایل نقلیه نقش مهمی را در تعیین نحوه اجرای واقعی سیستم اتوبوس تندرو در موارد سرعت، قابلیت اطمینان و هزینه بر عهده دارند برخی از ویژگی‌های وسیله نقلیه سیستم اتوبوس تندرو عبارتند از: ابعاد خارجی، ظرفیت،

درها، ارتفاع کف، نمای داخلی و خارجی، سیستم پیشران. در ادامه به توضیح مختصری از عوامل کلیدی در سامانه اتوبوس تندرو پرداخته شده است.

ایستگاه‌ها

ایستگاه‌ها پل ارتباطی بین مسافران و سیستم اتوبوس تندرو می‌باشند. تسهیلات ایستگاه‌ها باید مناسب، راحت، ایمن و قابل دسترس برای عابران پیاده و افراد ناتوان طراحی شوند در عین حال با محیط و کاربری‌های اطراف هماهنگ باشند. طراحی تسهیلات سیستم اتوبوس تندرو بسیار شبیه به سیستم قطار سبک می‌باشد بطوریکه دو مد فوق می‌توانند به صورت گسترده از تسهیلات یکدیگر که اغلب در یک سطح می‌باشند استفاده کنند.

قابلیت عبور

هنگامی که سطح سرویس‌دهی در یک مسیر مشخص به خوبی تأمین گردد، اتوبوس‌ها به راحتی می‌توانند از ایستگاه‌ها عبور کنند و این خود باعث بالا رفتن سرعت و کاهش تأخیر خواهد شد. قابلیت عبور وابسته به پارامترهای مختلفی از جمله خطوط چندگانه، خطوط عبور اختصاصی در ایستگاه‌ها و تقاطع‌ها، توانایی استفاده از لاین‌های مجاور در ترکیب جریان ترافیک و ... است. به طور مثال اگر چندین نوع اتوبوس صرفاً از لاین اختصاصی قابلیت عبور داشته باشند و هیچ مکانی برای پهلوگیری اتوبوس‌ها در ایستگاه وجود نداشته باشد، اتوبوس توقف کرده در ایستگاه باعث ایجاد تأخیر در حرکت سایر اتوبوس‌ها خواهد شد [۱۳].

دسترسی به ایستگاه

میزان دسترسی به ایستگاه، نحوه ارتباط سیستم اتوبوس تندرو به محیط اطراف را بیان می‌دارد. دسترسی ایستگاه می‌تواند دسترسی عابران پیاده به کاربری‌های اطراف را تأمین نماید و همچنین از طریق فراهم نمودن پارکینگ‌های وسیع می‌تواند ارتباط مناسبی با مناطق محلی برقرار شود. فراهم نمودن پارکینگ در ایستگاه‌های مناسب سیستم اتوبوس تندرو می‌تواند در زمان کل سفر مسافرانی که با اتومبیل شخصی از خارج محدوده ایستگاه وارد محوطه ایستگاه می‌شوند صرفه‌جویی کند و همچنین میزان دسترسی به ایستگاه را بهبود بخشد. راه‌های دسترسی ایستگاه موارد گوناگونی می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به تسهیلات پارک سوار و مسیر ارتباطی عابران پیاده اشاره کرد.

مسیرهای حرکت

مسیرهای حرکت جزء المان‌های اصلی سیستم اتوبوس‌های تندرو می‌باشند مسیرهای حرکت باید اجازه حرکت سریع و ایمن اتوبوس‌ها را با حداقل ترافیک فراهم کنند. مسیر حرکت سیستم اتوبوس تندرو دارای ۳ خصوصیت بارز می‌باشد که این ۳ خصوصیت عبارتند از: میزان و چگونگی تفکیک مسیر حرکت، نحوه علامت‌گذاری مسیر حرکت، راهنماهای جانبی و مغناطیسی و میزان و چگونگی تفکیک مسیر حرکت. در جدول ۱ طبقه‌بندی مسیرهای حرکت سیستم اتوبوس تندرو از نظر میزان دسترسی ارائه شده است. در این طبقه‌بندی مسیرهای حرکت به ۵ گروه طبقه‌بندی شده‌اند که پیشرفته‌ترین حالت آن خطوط ویژه کاملاً مجزای غیرهمسطح (رده ۱) و ابتدایی‌ترین حالت آن خطوط حرکتی موجود در خیابان‌های شریانی با ترافیک مختلط می‌باشد (رده ۵).

جدول (۱): طبقه‌بندی مسیرهای حرکت بر اساس نحوه و میزان تفکیک [۱۴]

رده دسترسی	کنترل دسترسی	نوع تسهیلات
۱	جریان غیر منقطع - کنترل کامل دسترسی	تونل‌های ویژه اتوبوس مسیر ویژه غیرهمسطح خطوط ویژه در آزادراه‌ها
۲	کنترل مقطع دسترسی	مسیر ویژه همسطح
۳	خطوط جدا شده فیزیکی در حریم خیابان	مسیر ویژه میانی در شریانی‌ها
۴	خطوط انحصاری و نیمه انحصاری	خطوط ویژه همسویا خلاف جهت جریان ترافیک
۵	ترافیک مختلط	

نقش سیستم‌های هوشمند حمل و نقل در اتوبوس‌های تندرو

سیستم‌های حمل و نقل باعث افزایش ایمنی، کارایی و کیفیت خدمات‌دهی در سیستم اتوبوس‌های تندرو خواهند شد. سیستم‌های هوشمند حمل و نقل مشتمل بر طیف وسیعی از تکنولوژی‌های پیشرفته است که اطلاعات خود را از وسیله نقلیه و سنسورهای تعبیه شده در مسیرها جمع‌آوری و دریافت می‌کند. اطلاعات با استفاده از یک شبکه ارتباطی اختصاصی به مرکز داده‌ها منتقل و پس از یک پردازش هوشمند بر روی آن‌ها، این اطلاعات مفید برای آژانس‌های حمل و نقل، راننده‌ها و مسافری فرستاده می‌شود. تکنولوژی‌های سیستم‌های هوشمند حمل و نقل در بسیاری از جهات باعث بهبود عملکرد سیستم و افزایش قابلیت‌های آن خواهند شد. به طور مثال مانیتورینگ و کنترل از راه دور محل اتوبوس‌ها و وضعیت مسافرین می‌تواند باعث افزایش تسهیلات ایمنی و امنیتی گردد. سیستم‌های هوشمند حمل و نقل همچنین می‌تواند به عنوان یک کمک اپراتور در نگهداری ناوگان وسایل نقلیه به کار برده شود و در مواقع اضطراری و بروز مشکلات مکانیکی برای وسایل نقلیه کمک شایانی نماید [۱۳]. سیستم‌های هوشمند حمل و نقلی که به صورت ترکیبی در اتوبوس‌های تندرو بکار برده شوند، در ۷ بخش شامل اولویت‌دهی وسیله نقلیه، تجهیزات خودکار و کمک راننده، تجهیزات الکترونیکی جمع‌آوری کرایه، مدیریت خدمات‌دهی، اطلاعات مسافرین، تجهیزات ایمنی و امنیتی و تکنولوژی‌های حمایت‌کننده طبقه‌بندی می‌شوند.

شبیه سازی خط یک اتوبوس‌های تندرو تهران

خط یک اتوبوس‌های تندرو تهران که از میدان آزادی شروع شده و به چهار راه تهرانپارس ختم می‌گردد، اولین خط اتوبوس‌های تندرو است که در سال ۱۳۸۶ در تهران به اجرا درآمد. این مسیر تقریباً ۱۹ کیلومتری دارای ۲۷ ایستگاه می‌باشد که در طول خود ۱۴ چراغ راهنمایی و تعداد زیادی چراغ چشمک‌زن را جای داده است. برخی از داده‌هایی لازم برای فرآیند شبیه‌سازی مسیر از آمارهای سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران اخذ گردیده و برخی دیگر از آمار به صورت میدانی جمع‌آوری شده است. مراحل شبیه‌سازی ما بدین ترتیب است که ابتدا بر اساس اطلاعات ورودی اعم از هندسه مسیر، تعداد ایستگاه‌ها، طول ایستگاه‌ها، فواصل ایستگاه‌ها، تعداد اتوبوس‌ها، سر فاصله زمانی در ساعت اوج به عملیات شبیه‌سازی پرداخته، سپس خروجی‌های حائز اهمیت را نظیر زمان سفر، سرعت، تأخیرهای ایجاد شده و غیره را بررسی نموده و عملیات ارزش‌گذاری را در حالات مختلف انجام می‌دهیم. ایستگاه‌های مختلف خط شامل پارک سوار آزادی، آزادی، استاد معین، شریف، بهبودی، نواب، دکتر قریب، انقلاب، دانشگاه تهران، ولیعصر، فردوسی، دروازه دولت، شریعتی، پل چوبی، میدان امام حسین، منتظری، بوعلی، فتحنایی، فرودگاه، سبلان، وحیدیه، پل، آیت، ابرویحان، خاقانی، داریوش و ترمینال شرق می‌باشد. در این مسیر در تقاطع‌های بهبودی، رودکی، توحید، اسکندری، قریب، قدس، وصال، فلسطین، ولیعصر، نامجو، سبلان جنوبی، گلشن دوست، دکتر آیت و مسیل جاجرود چراغ‌های راهنمایی هوشمند با سیستم تخصیص اولویت حرکت به اتوبوس‌های تندرو وجود دارد که باعث به وجود آمدن زمان تأخیر کمتری برای اتوبوس‌ها می‌شود. برخی دیگر از اطلاعات خط یک اتوبوس‌های تندرو که از سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران اخذ گردیده، که مهم‌ترین موضوع سرعت اتوبوس‌های تندرو که برابر با ۱۳ کیلومتر بر ساعت می‌باشد بوده و مشخصات عملکردی خط یک در جدول ۲ بیان گردیده است.

جدول (۲): عملکرد خط یک [۱۵]

شماره خط	نوع سرویس دهی	مبدأ	مقصد	طول مسیر (کیلومتر)	تعداد اتوبوس‌های شاغل	جابجایی مسافر
۲۵۰۱	روزانه	تهران پارس	آزادی	۱۹	۲۶۱	۱۳۳۶۵۱۰۶
۲۵۰۱	شبانه	تهران پارس	آزادی	۱۹	۲۶	۱۱۷۳
مجموع				۳۸	۲۸۷	۱۳۳۶۶۲۷۹

مراحل شبیه‌سازی خط یک اتوبوس‌های تندرو تهران

برای ترسیم هندسه مسیر (خطوط میانی) که مخصوص اتوبوس‌های تندرو می‌باشد از نقشه‌های هوایی استفاده شده است همچنین با توجه به این که خطوط اتوبوس‌های تندرو صرفاً مخصوص خودروهای ویژه است، نیاز است که برای این خودروهای ویژه مسیر ویژه‌ای نیز تعریف گردد که در Aimsun تحت عنوان reserved line می‌باشد. لازم به ذکر است که ایستگاه‌های خط یک اتوبوس‌های تندرو تهران بر اساس اطلاعات مذکور در نرم‌افزار ثبت شده که در نرم‌افزار Aimsun سه نوع ایستگاه مختلف را می‌توان مدل نمود که این سه ایستگاه عبارتند از: ایستگاه‌های معمولی، ایستگاه‌هایی با محل توقف مجزا، پایانه‌ها یا ایستگاه‌های بزرگ. در این مقاله، ایستگاه‌های اول و آخر از نوع پایانه و ایستگاه‌های میانی از نوع معمولی تعریف شده‌اند. همچنین به منظور شبیه‌سازی خطوط، نیاز است که علاوه بر تعریف خطوط ویژه، خطوط حمل و نقل همگانی نیز تعریف گردد تا بتوان زمانبندی ایستگاه‌ها را به صورت یک جدول زمانی به نرم‌افزار معرفی نمود [۱۶].

مهم‌ترین پارامتر این جدول زمانی، زمان توقف اتوبوس در ایستگاه است که بر اساس آمار موجود، به طور میانگین ۲۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به سر فاصله زمانی هر یک از اتوبوس‌ها که به طور متوسط ۲/۵ دقیقه می باشد، تعداد ۲۴ اتوبوس در ساعت در هر یک از خطوط قادر به خدمات‌رسانی می‌باشند. همچنین در این پروژه شناسایی زمان ورود اتوبوس‌ها از شناساگرهایی استفاده شده است که قادر به شناسایی اتوبوس‌ها هستند و می‌توان توسط آنها چراغ‌های هوشمندی را در اختیار داشت و برای اولویت‌دهی به حرکت اتوبوس‌ها از تنظیم Premption در تقاطعات استفاده شده است [۱۶].

پس از شبیه‌سازی خط یک اتوبوس‌های تندرو تهران و انجام تنظیمات اولیه مربوطه در نرم‌افزار مدل را تحت سناریوهای مختلف بررسی کرده و به مقایسه نسبی هر یک از سناریوها با وضعیت موجود می‌پردازیم. که در جدول زیر مشخصات سناریوهای مختلف از نقطه نظرهای مختلفی همچون، زمان که مربوط به وضعیت موجود و آتی، سرعت اتوبوس‌ها در مسیر، جریان اتوبوس‌ها، تغییر در وضعیت ایستگاه‌ها که در سناریو ۸ و ۹ دو ایستگاه مختلف حذف گردیدند و در انتها وضعیت چراغ‌های راهنمایی مسیر می‌باشد که در سناریو ۱۰ تمامی تقاطعات چراغ‌ها هوشمند و همچنین قابلیت تقدم به اتوبوس اختصاص داده شده است همچنین در جدول ۳ به ویژگی‌های سناریوهای مختلف پرداخته شده است.

جدول (۳): مشخصات سناریوهای مختلف

سناریو	وضعیت	سرعت (کیلومتر/ساعت)	جریان (وسیله/ساعت)	ایستگاه	چراغ راهنمایی
۱	حال	۱۳	۲۴	بدون تغییر	بدون تغییر
۲	آینده	۱۸	۲۴	بدون تغییر	بدون تغییر
۳	آینده	۲۳	۲۴	بدون تغییر	بدون تغییر
۴	آینده	۲۸	۲۴	بدون تغییر	بدون تغییر
۵	آینده	۱۳	۳۰	بدون تغییر	بدون تغییر
۶	آینده	۱۳	۳۶	بدون تغییر	بدون تغییر
۷	آینده	۱۳	۴۲	بدون تغییر	بدون تغییر
۸	آینده	۱۳	۲۴	حذف ایستگاه فرودگاه	بدون تغییر
۹	آینده	۱۳	۲۴	حذف ایستگاه سبلان	بدون تغییر
۱۰	آینده	۱۳	۲۴	بدون تغییر	هوشمندسازی تقاطعات

تجزیه و تحلیل نتایج

بعد از اتمام عملیات شبیه سازی و مشاهده خروجی‌ها مقایسه نسبی بین وضع موجود و سناریوهای مذکور در جدول ۴ آورده شده است که به مقایسه میزان کاهش زمان سفر، میزان کاهش کربن دی اکسید و نیتروژن اکسید و میزان کاهش مصرف سوخت پرداخته شده است. سناریو یک بیانگر وضعیت موجود است و مابقی سناریوها بیانگر وضعیت آتی خواهد بود که تغییرات این سناریوها در جدول ۳ به طور کامل بیان گردید. در ارتباط با جدول ۴ تفاسیر و نتایج فراوانی را می‌توان برداشت نمود که می‌توان گفت در سناریو چهارم بیشترین میزان کاهش زمان سفر و در سناریو هفتم نیز بیشترین میزان کاهش در انتشار آلاینده‌هایی همچون کربن دی اکسید و نیتروژن اکسید صورت گرفته و از نظر میزان کاهش مصرف سوخت سناریو هشتم بهترین وضعیت را دارا می‌باشد که میتوان با وزن‌دهی و اقتصاد سنجی هر یک از این سناریوها نسبت به انتخاب بهترین سناریو جهت اجرا اقدام نمود.

جدول (۴): مقایسه نسبی بین وضع موجود و سناریوهای مذکور

سناریو	کاهش زمان سفر (ثانیه)	کاهش مصرف سوخت $\frac{lit}{100 km}$	میزان کاهش نیتروژن اکسید $\left(\frac{gr}{km}\right)$	میزان کاهش کربن دی اکسید $\left(\frac{gr}{km}\right)$
۲	۵۱۲.۶۴	۰.۵۳	۱.۹۳	۱.۸۶
۳	۹۳۲.۲۵	۰.۶۲	۱.۵۲	۱.۳۲
۴	۱۲۹۲.۴۷	۰.۴۹	۱.۳۶	۱.۵۴
۵	۱۶۷.۷۹	-۰.۳۵	-۳.۹۸	-۴.۱۱

۶	۲۱۲.۳۲	-۰.۴۸	-۴.۳۶	-۴.۹۸
۷	۲۳۱.۵۶	-۰.۸۶	-۴.۸۶	-۵.۲۳
۸	۹۸.۱۳	۰.۹۵	۱.۱۳	۱.۹۶
۹	۷۷.۶۹	۰.۸۳	۰.۹۸	۱.۳۴
۱۰	۳۳۴.۲۶	۰.۵۴	۰.۶۲	۰.۹۷

تحلیل ارزش نسبی سناریوهای مختلف

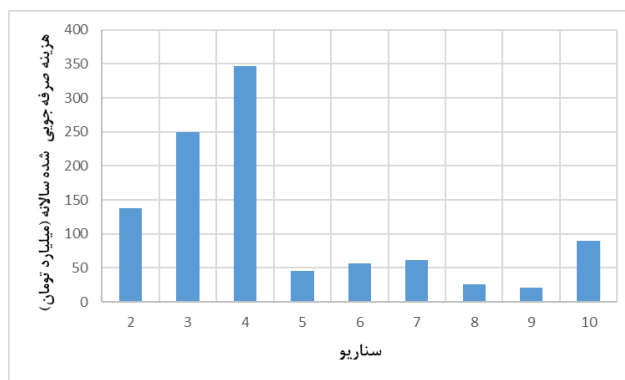
همان گونه که از جدول ۴ مشخص است با حرکت به سمت سناریوهای انتهایی برخی از شاخص‌ها به صورت مثبت (کاهش مقدار شاخص) و برخی دیگر به صورت منفی (افزایش مقدار شاخص) تغییر می‌کنند، اکنون شاخص‌های این سناریوها را بر اساس هزینه‌های مربوطه بررسی نماییم و مقدار صرفه‌جویی و یا افزایش در هزینه‌ها را برآورد می‌نماییم.

هزینه مربوط به کاهش زمان سفر

یکی از پارامترهای مهم، محاسبه هزینه‌های هر سناریوی حمل و نقلی می‌باشد. به طرق مختلف می‌توان ارزش زمان سفر را محاسبه نمود که در این مقاله از روش زیر استفاده شده که اطلاعات آن از آمار منتشر شده توسط مرکز آمار ایران برداشت شده است.

$$\text{ارزش یک ساعت کاری} = \frac{\text{میانگین درآمد ماهانه مسافران}}{\text{میانگین تعداد ساعت کاری در ماه}} = \frac{88300}{180} = 4905$$

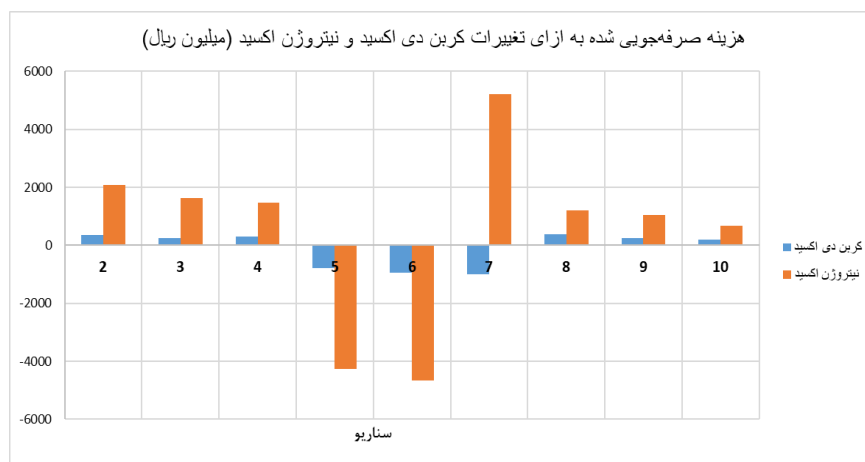
با در نظر گرفتن ارزش یک ساعت کاری به میزان ۴۹۰۵ تومان و جابجایی روزانه حدود ۵۳۹ هزار نفر در این خط، مقدار هزینه صرفه‌جویی شده در وقت مسافری در سناریوهای مختلف به صورت نسبی محاسبه می‌گردد. در شکل ۲ این مقادیر نشان داده شده است.



شکل (۲): میزان هزینه صرفه‌جویی سالانه مرتبط با زمان سفر

هزینه مربوط به کاهش آلودگی هوا

در مطالعاتی که عبدالرضا کرباسی و همکاران انجام دادند هزینه کاهش آلودگی آلاینده کربن دی اکسید به ازای نسبت ۲/۳۸۳، برابر با ۴۵۴ میلیون ریال برآورد شد. همچنین هزینه کاهش آلودگی آلاینده نیتروژن اکسید نیز به ازای نسبت ۱۰/۱۶، برابر با ۱۲۴۳ میلیون ریال برآورد شد [۲]. با توجه به این مقادیر، میزان هزینه کاهش آلودگی هوا به ازای سناریوهای مختلف در شکل ۳ ارائه گردیده است.



شکل (۳): هزینه صرفه جویی شده به ازای کاهش آلاینده نیتروژن اکسید و کربن دی اکسید در سناریوها

هزینه مربوط به کاهش مصرف سوخت

هزینه مربوط به کاهش و یا افزایش مصرف سوخت تحت سناریوهای مختلف در جدول ۵ بیان شده است. لازم به ذکر است که در محاسبه این هزینه‌ها، قیمت گازوئیل بر مبنای لیتری ۱۵۰ تومان در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): هزینه مربوط به کاهش مصرف سوخت در سناریوها

سناریو	هزینه مربوط به کاهش مصرف سوخت (تومان لیتر-درهرصدکیلومتر)
۲	۷۹.۵
۳	۹۳
۴	۷۳.۵
۵	-۱۸۰
۶	-۳۱۸.۵
۷	-۴۷۴.۵
۸	۱۴۲.۵
۹	۱۲۴.۵
۱۰	۸۱

هزینه مربوط به افزایش تعداد اتوبوس‌ها

همان‌گونه که در سناریوهای ۵، ۶ و ۷ مشخص است تعداد اتوبوس‌های این سناریوها بیش از تعداد اتوبوس‌های وضع موجود می‌باشد و همین موضوع بر روی هزینه کلی تأثیرگذار خواهد بود. اگر به طور متوسط قیمت هر دستگاه اتوبوس تندرو را برابر ۲۵۰ میلیون تومان در نظر بگیریم، میزان هزینه خریداری این اتوبوس‌ها در سناریوهای مختلف مشخص می‌گردد. همچنین به هزینه‌های مذکور بایستی حقوق راننده‌ها (به طور متوسط ماهیانه ۸۰۰ هزار تومان) را نیز افزود که این مقادیر در جدول ۶ ذکر شده است.

جدول (۶): هزینه خرید اتوبوس و حقوق راننده‌ها در سناریوهای ۵، ۶ و ۷

سناریو	حقوق راننده‌ها (هزار تومان)	هزینه خرید اتوبوس (میلیون تومان)
۵	۴۸۰۰	۱۵۰۰
۶	۹۶۰۰	۳۰۰۰
۷	۱۴۴۰۰	۴۵۰۰

ارزیابی هزینه سناریوهای مختلف

پس از اینکه هزینه‌های اصلی هر یک از سناریوها مشخص شد، می‌توان به ارزیابی کلی آنها پرداخت. در سناریوهای دوم تا چهارم، در اثر افزایش سرعت اتوبوس‌ها میزان هزینه زمان سفر به نسبت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد اما تغییر خیلی چشمگیری در میزان هزینه مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌ها اتفاق نمی‌افتد. در سناریوهای پنجم تا هفتم تعداد اتوبوس‌ها افزایش می‌یابد و همین موضوع باعث بالا رفتن هزینه‌های مربوط به مصرف سوخت اتوبوس‌ها خواهد شد. در این سناریوها کاهش زمان سفر به نسبت سناریوهای دوم تا چهارم کمتر است و همچنین هزینه مازاد تعداد اتوبوس‌ها و حقوق راننده‌های آن‌ها نیز به حمل و نقل عمومی تحمیل خواهد شد. در سناریوهای هشتم و نهم تاثیر حذف ایستگاه‌های سبلان و فرودگاه باعث کاهش هزینه زمان سفر خواهند شد و اثر ملایمی را نیز بر روی هزینه کاهش آلودگی هوا و میزان مصرف سوخت خواهند گذاشت. در سناریوی دهم با هوشمند کردن چراغ‌های موجود در تقاطع، میزان هزینه مربوط به کاهش زمان سفر، کاهش سوخت و آلودگی هوا با شیب ملایمی کاسته می‌شود که این شیب کاهش هزینه‌ها نسبت به سناریوهای اولیه کمتر است.

نتیجه گیری

با شبیه سازی خط یک اتوبوس های تندرو تهران در نرم افزار Aimsun تحت سناریوهای مختلف، نتایج گسترده ای تحت عنوان خروجی به صورت اعداد و نمودار حاصل شد که بر اساس این مقادیر مشخص شد که هر سناریو نسبت به وضع موجود چه ارتقایی پیدا خواهد کرد و هزینه این بهبود عملکرد به چه میزانی خواهد بود. برخی از مهم ترین نتایج این پژوهش در ادامه آورده شده است:

۱- میزان کاهش زمان سفر با توجه به ارتقای سرعت اتوبوس های تندرو به ۱۸ کیلومتر بر ساعت، در سناریوی دوم به عدد ۵۱۲ ثانیه خواهد رسید، در حالی که اگر بخواهیم این کاهش زمان سفر به ۹۳۲ ثانیه برسد، باید سرعت اتوبوس ها را به ۲۳ کیلومتر بر ساعت ارتقا دهیم.

۲- با حذف ایستگاه هایی که فاصله نزدیکی از یکدیگر دارند (ایستگاه سبلان و فرودگاه) میزان هزینه صرفه جویی شده در اثر کاهش زمان سفر، به عدد ۲۶ میلیارد تومان به صورت سالانه در سناریوی هشتم و ۲۰ میلیارد تومان در سناریوی نهم خواهد رسید.

۳- میزان هزینه صرفه جویی شده به ازای کاهش آلایندگی نیتروژن اکسید و کربن دی اکسید در سناریو دهم (هوشمندسازی چراغ های راهنمایی مسیر) به ترتیب برابر ۶۶۴ و ۱۸۴ میلیون ریال خواهد بود.

۴- میزان هزینه صرفه جویی شده در اثر کاهش مصرف سوخت در سناریوی هفتم و هشتم (با حذف ایستگاه ها به ترتیب برابر ۱۴۲ و ۱۲۴ تومان لیتر در هر صد کیلومتر خواهد بود در حالی که با افزایش تعداد اتوبوس ها این هزینه کاهش نیافته بلکه افزایش نیز پیدا می کند.

۵- با افزایش تعداد اتوبوس ها به میزان ۶ دستگاه (سناریوی پنجم)، میزان حقوق راننده ها برابر ۴۸۰۰ هزار تومان و هزینه خرید اتوبوس ها، ۱۵۰۰ میلیون ریال خواهد بود. در حالی که این مقادیر برای افزایش تعداد اتوبوس ها به میزان ۱۲ دستگاه (سناریوی ششم) به ترتیب برابر ۶۰۰ هزار تومان و ۲۰۰۰ میلیون تومان و برای سناریوی هفتم (افزایش تعداد اتوبوس ها به میزان ۱۸ دستگاه) به میزان ۱۴۴۰۰ هزار تومان و ۴۵۰۰ میلیون تومان خواهد بود.

منابع و مراجع

- [۱] زمانیان، علی رضا، قفقازی، ایمان، اقبالیان، علی. ۱۳۸۷. ارزیابی فنی- اقتصادی و زیست محیطی خط دوم سامانه اتوبوس‌های تندرو تهران، نهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.
- [۲] کرباسی، علیرضا، خشایی پور، مرتضی. ۱۳۹۰. نقش اتوبوس‌های تندرو بر کیفیت هوا و صدا در مسیر خیابان ولی‌عصر، یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.
- [۳] روحی، امیر، پور رضا، محمد. ۱۳۸۷. ارزیابی استراتژی استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت ناوگان حمل و نقل عمومی، هشتمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.
- [۴] زرآبادی، شیما، محمدی‌پور، امیرحسین. ۱۳۸۷. ارائه راهکارهای مدیریتی در راستای افزایش مطلوبیت سیستم اتوبوسرانی، هشتمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.
- [۵] صدیق باور، محمد. ۱۳۸۹. لزوم بررسی و تحلیل ایجاد سیستم حمل و نقل سریع اتوبوسرانی در کلانشهر شیراز، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مقاومت سازه‌ها و حمل و نقل، تبریز.
- [۶] ملائی، امین فرجی، عظیمی، آزاده، پوراحمد، احمد. ۱۳۹۰. ابعاد پایداری حمل و نقل عمومی شهری با تاکید بر اتوبوس تندرو، یازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.
- [7] Instituto Nacional de Ecologia. 2008. The Benefits and costs of a Bus Rapid Transit System in Mexico city. Final Report.
- [۸] حاجیان، حوریا، برادران، وحید، ابوالقاسمی، نرگس. ۱۳۹۳. بررسی تاثیر خطوط تندرو بر حمل و نقل شهری با رویکرد شبیه‌سازی، چهاردهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.
- [9] Wöhrnschimmel, H., Zuk, M., Martínez-Villa, G., Cerón, J., Cárdenas, B., Rojas-Bracho, L., & Fernández-Bremauntz, A. 2008. The impact of a Bus Rapid Transit system on commuters' exposure to Benzene, CO, PM2. 5 and PM10 in Mexico City. Atmospheric Environment, 42(35), 8194-8203.
- [10] Liao, C., Davis, G. A., & Atherley, R. 2007. Simulation study of a bus signal priority strategy based on GPS/AVL and wireless communications. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2034, 82-91.
- [11] Ilahi, A., & Irawan, M. Z. 2013. A microsimulation model of median busway and ATCS (case study: Transjogja Bus, Yogyakarta, Indonesia). In Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (Vol. 9, p. 350).
- [12] TCRP Report 90. 2003. Bus Rapid Transit, Volume 2, Implementation Guidelines Sponsored, The Federal Transit Administration.
- [۱۳] راهنمای شناسایی خصوصیت سیستم اتوبوس تندرو. ۱۳۸۶. دفتر حمل و نقل و دبیرخانه شورای عالی هماهنگی ترافیک شهرهای کشور.
- [14] Recommended Practice for Bus Rapid Transit Running Ways. 2009. American Public Transportation Association (APTA).
- [۱۵] مروری بر آمار و اطلاعات جامع شهر تهران. ۱۳۹۰. معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران.
- [16] Aimsun User's Manual version 6. 2008. TSS-Transport Simulation Systems.