

ارزیابی عملکرد استراتژیهای هوشمند اولویت‌دهی زمانی و مکانی سیستم حمل‌ونقل همگانی (مطالعه موردی: شهر اصفهان)

مقاله علمی - پژوهشی

مریم دهقانی‌زاده، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*مهدی فلاح تفتی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مهدی رفعتی فرد، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Fallah.Tafti@Yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۳۲۹-۳۵۲

چکیده

این پژوهش، به مقایسه دو استراتژی پیشنهادی برای اولویت‌دهی به اتوبوس‌های حمل و نقل همگانی درون‌شهری در راستای بهبود کیفیت سیستم حمل‌ونقل همگانی و در عین حال به حداقل رساندن مجموع تأخیرات وارده بر کل کاربران شبکه معابر شهری می‌پردازد: استراتژی اولویت‌دهی مکانی (خطوط اتوبوس با اولویت دهی متناوب) و استراتژی اولویت‌دهی ترکیبی مکانی-زمانی (خطوط اتوبوس متناوب همراه با اولویت‌دهی عبور از تقاطعهای چراغدار هوشمند). بدین منظور، یک مسیر ۵٫۵ کیلومتری متشکل از ۷ تقاطع چراغ‌دار شهر اصفهان، در نرم‌افزار ایمنان شبیه‌سازی شد. سه سناریو شامل وضعیت موجود خط اختصاصی اتوبوس، خط اتوبوس با اولویت‌دهی مکانی، خط اتوبوس با اولویت‌دهی ترکیبی مدل‌سازی شدند. شبیه‌سازی‌ها در دو دامنه از حجم ترافیک و سرفاصله‌های زمانی متفاوت اتوبوس‌ها انجام گرفت. معیار اصلی ارزیابی، مجموع تأخیر افراد در کل مسیر بود. نتایج نشان داد که عملکرد بهینه هر استراتژی به سرفاصله زمانی اتوبوس‌ها و حجم ترافیک وابسته است: در سرفاصله‌های زمانی کوتاه (۲ و ۳ دقیقه)، استراتژی اولویت‌دهی مکانی عملکرد بهتری داشت و تأخیر وارده بر افراد را به ترتیب ۳/۷٪ (در شرایط ترافیکی غیر اشباع) و ۹ تا ۱۵/۸٪ (در شرایط ترافیکی اشباع - فوق اشباع) کاهش داد. در مقابل، در سرفاصله‌های زمانی بلند (۶ و ۱۰ دقیقه)، استراتژی ترکیبی اثربخش‌تر بود و مجموع تأخیر را به ترتیب ۶/۸ تا ۷/۱٪ و ۲۰/۵ تا ۲۷/۱٪ در دامنه حجم‌های ترافیکی پیشگفته کاهش داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که هر دو استراتژی، در شرایط عملیاتی مناسب، می‌توانند تأثیر مثبت قابل توجهی بر کیفیت تردد ترافیک خودروهای شخصی و حمل و نقل همگانی داشته و مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: اولویت‌دهی زمانی حمل و نقل همگانی، اولویت‌دهی مکانی حمل و نقل همگانی، اولویت‌دهی زمانی و مکانی

حمل و نقل همگانی، تأخیر وارده بر افراد، خطوط اتوبوس با اولویت‌دهی متناوب، شبیه‌سازی ریزمقیاس ایمنان نکست

۱- مقدمه

استفاده از آنها و افزایش بهره‌وری از زیرساختهای حمل و نقل شهری شده‌است. در این راستا، اعمال اولویت‌دهی عبور به اتوبوس‌های حمل و نقل همگانی، با هدف کاهش زمان سفر، بهبود قابلیت اطمینان اتوبوس‌ها و تغییر توازن ترافیک به نفع حمل‌ونقل همگانی مورد توجه قرار گرفته‌است. از طرفی اعطای اولویت‌دهی کامل به وسایل نقلیه همگانی، در عین حال که

در طول چند دهه گذشته، افزایش استفاده از خودروهای شخصی در کشورهای مختلف منجر به ایجاد مشکلات مختلف ترافیکی از جمله ازدحام و تراکم ترافیک، آلودگی هوا، تأخیر و زمان‌های سفر بیش از حد و افزایش تصادفات شده‌است. این امر باعث توجه مدیران شهری به فراهم نمودن تسهیلات بیشتر برای سیستمهای حمل و نقل همگانی به منظور افزایش مطلوبیت

۲- پیشینه تحقیق

اولویت‌دهی عبور به وسایل نقلیه همگانی، به عنوان یک راهبرد کلیدی در مدیریت ترافیک شهری، همواره مورد توجه محققین بوده است. این مطالعات به بررسی انواع استراتژی‌های اولویت‌دهی عبور، از جمله روش‌های مبتنی بر مکان و روش‌های مبتنی بر زمان، پرداخته‌اند تا تأثیر آن‌ها بر کارایی شبکه حمل‌ونقل شهری را ارزیابی کنند. یافته‌های این تحقیقات، مبنایی برای شناخت و انتخاب مؤثرترین رویکردها در بهبود عملکرد حمل‌ونقل همگانی فراهم می‌آورد. روش‌های اولویت‌دهی به عبور ناوگان حمل و نقل همگانی را می‌توان به روش‌های اولویت‌دهی مکانی، روش‌های اولویت‌دهی زمانی و روش‌های مبتنی بر ترکیب این دو تقسیم بندی نمود.

۲-۱- سیستم‌های اولویت‌دهی مبتنی بر مکان

تاکنون روش‌های مختلفی برای جداسازی فیزیکی جریان ترافیک^۱ ارائه شده‌اند که مطرح‌ترین آنها عبارتند از: ایجاد مسیرهای اختصاصی جدا از سواره‌رو صرفاً جهت عبور وسایل نقلیه همگانی^۲، اختصاص یک خط عبور ویژه سراسری در سواره‌رو برای عبور وسایل نقلیه همگانی^۳ و اختصاص یک خط عبور با حرکت موافق^۴ یا مخالف به وسایل نقلیه همگانی^۵ در خیابان‌های یکطرفه. روش ایجاد یک خط عبور اختصاصی برای اولین بار در سال ۱۹۳۹ میلادی در شهر شیکاگو اجرا شد (APTA, 2008). این خطوط گاهی تنها در نزدیکی تقاطعات و گاهی در طول مسیر خیابان‌های شهری اجرا می‌شوند.

از روش‌های نامبرده، شناخته‌شده‌ترین گزینه، اجرای خطوط ویژه اتوبوس سراسری در سواره‌رو خیابان است. ویژگی‌های ترافیکی بسیاری از خیابان‌ها ممکن است توجیه‌کننده اجرای خطوط ویژه دائمی فعال در تمام طول روز نباشد.

در پاسخ به این چالش مهم، مفهوم خط متناوب اتوبوس در طول زمان پدیدار شده است. خط متناوب اتوبوس یک خط عبور است که می‌تواند وضعیت خود را به صورت دوره‌ای از یک خط عادی به خط ویژه اتوبوس تغییر دهد. وگاس و لو برای اولین بار مفهوم نظری خطوط متناوب را با تعیین یک فاصله آزاد در جلوی اتوبوس‌ها مطرح کردند (Viegas and Lu., 1997).

در ادامه، محققین زیادی در طی سالهای گذشته، مکانیزم‌های مختلفی را برای کارکرد این نوع خطوط پیشنهاد داده‌اند و اثرات این نوع خطوط را بر کارکرد سیستم حمل و نقل همگانی و ترافیک خطوط عادی مجاور آنها مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج

به بهبود عملکرد آن‌ها کمک می‌کند، اغلب به افزایش تأخیر وارده بر خودروهای شخصی و در نتیجه برای کل استفاده‌کنندگان منجر می‌شود. بهبود این وضعیت نیازمند بکارگیری یک تعامل منطقی در مدیریت ترافیک شهری است. دستیابی به دو هدف مطلوب متضاد به‌طور همزمان، یعنی بهبود چشمگیر اثربخشی اتوبوس‌ها و در عین حال تأمین نیازهای منطقی استفاده‌کنندگان از وسایل نقلیه شخصی، یک چالش بزرگ محسوب می‌شود. بنابراین، برنامه‌ریزان حمل‌ونقل باید با ایجاد مصالحه، به دنبال راهکاری بهینه باشند که منافع کل سیستم را به حداکثر برساند.

در این راستا، تحقیقات متعددی بر روی اولویت‌دهی عبور به سیستم اتوبوسرانی همگانی صورت گرفته است. پژوهش‌های پیشین در مقیاس‌های متفاوت از جمله یک تقاطع مجزا، یک کریدور یا کل یک شبکه شهری، و برای شرایط ترافیکی مختلف (غیر اشباع، اشباع و فوق اشباع) انجام شده‌اند. بسیاری از این مطالعات، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی و یا نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ماکروسکوپی و میکروسکوپی، به ارزیابی و مقایسه استراتژی‌های پیشنهادی پرداخته‌اند. با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های حاصله، تأثیر متغیرهای کلیدی مانند سرفاصله زمانی اتوبوس‌ها، حجم ترافیک، و استراتژی‌های اولویت‌دهی به حمل‌ونقل همگانی بر عملکرد بهینه آنها، به صورت جامع و سیستماتیک بررسی نشده است. به عنوان نمونه، هنوز مشخص نیست که تحت چه شرایط عملیاتی، کدام یک از استراتژی‌های اولویت‌دهی بیشترین کارایی را در کاهش مجموع تأخیر کاربران شبکه دارد. از سوی دیگر بخش عمده این مطالعات بر معیارهای ترافیکی همچون تأخیر یا سرعت وسایل نقلیه در جریان ترافیک متمرکز بوده و کمتر به شاخصی جامع‌تر مانند تأخیر افراد پرداخته‌اند. هدف از این پژوهش، بررسی و مقایسه عملکرد دو استراتژی اصلی در اولویت‌دهی به حمل‌ونقل همگانی، یعنی استراتژی مکانی (خطوط اتوبوس با اولویت‌دهی متناوب) و استراتژی ترکیبی مکانی-زمانی (خطوط اتوبوس با اولویت‌دهی متناوب همراه با اولویت‌دهی از طریق چراغ راهنمایی) است. در این راستا، این مقاله به بررسی شرایط بهینه برای به‌کارگیری هر یک از این استراتژی‌ها در یک شبکه ترافیکی واقعی پرداخته است. این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی میکروسکوپی، تأثیر سرفاصله‌های زمانی متفاوت و حجم ترافیک بر عملکرد هر استراتژی را تحلیل می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به مدیران شهری کمک کند تا با انتخابی آگاهانه و بر اساس شرایط عملیاتی موجود، تأخیرات کلی وارده بر افراد در سطح شبکه را به حداقل برسانند.

۲-۲-۲- روش اولویت‌دهی فعال^{۱۱}

در این روش، وسایل نقلیه همگانی به وسیله سنسورها یا سیستم‌های موقعیت‌یابی شناسایی می‌شوند و استراتژی‌های دینامیک اولویت‌دهی اعمال می‌گردد. این استراتژی‌ها شامل افزایش یا کاهش مدت زمان چراغ سبز/قرمز و درخواست فاز سبز اجباری برای عبور اتوبوس (حتی بدون درخواست سایر خودروها) می‌شود. روش‌های فعال به سه استراتژی فرعی تقسیم می‌شوند:

استراتژی بی‌قید و شرط^{۱۲}: به محض شناسایی هر وسیله نقلیه همگانی، اولویت عبور اعطا می‌شود (Varaiya and Kurzhanisky, 2010).

استراتژی شرطی^{۱۳}: اولویت بر اساس معیارهایی مانند میزان تأخیر وارده به وسیله نقلیه همگانی، تواتر آمدن یا تعداد مسافران اعمال می‌گردد (Varaiya and Kurzhanisky, 2010). اندرسون و داگانزوم، ضمن بررسی میزان قابلیت اطمینان افراد نسبت به سرویس‌دهی وسایل نقلیه همگانی نشان دادند که در تقاطع‌های با فرکانس عبور پایین اتوبوسها، اعمال استراتژی شرطی بهینه‌تر از اولویت‌دهی معمولی است، زیرا تعداد درخواست‌های اولویت‌دهی کاهش می‌یابد. در تقاطع‌های پرفرکانس نیز علاوه بر کاهش ۵۰٪ در تعداد درخواست‌ها، میانگین سرفاصله رسیدن وسایل نقلیه همگانی به ایستگاهها کاهش می‌یابد (Anderson and Daganzom, 2019). یو و همکاران با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها در کریدورهایی با ترافیک بالا، نتیجه گرفتند که استراتژی فعال به نفع اکثریت تقاطع‌ها بوده و منجر به ایجاد موج سبز در طول کریدور می‌شود (Yue et al., 2020). لیو و همکاران با مقایسه اولویت‌دهی فعال، مبتنی بر داده‌های برخط در محیط نرم‌افزار ویزیم، نشان دادند که اجرای روش فعال مصرف سوخت را ۱۳/۳۳٪ کاهش می‌دهد و روش مبتنی بر داده‌های واقعی، بهترین عملکرد زیست‌محیطی را با کاهش ۲۸/۸۶٪ در انتشار آلاینده‌ها دارد. (Liu et al., 2020). سانگ و نویسه تغییرات ماه به ماه تعداد تصادفات رخ داده در شهر پورتلند واقع در ایالت اوگن را با آنالیز سری زمانی ناپیوسته، در محیط نرم‌افزار ویزیم و با استفاده از شاخصهای ایمنی جایگزین اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار (SSAM^{۱۴}) بررسی و مشاهده کردند که پس از اجرای اولویت‌دهی عبور، تعداد کل تصادفات ۴/۵٪ و تصادفات با خسارت کم ۱۰٪ کاهش یافت، اما تصادفات فوتی ۳٪ و

کلی حاصله از این تحقیقات عموماً حاکی از بهبود شاخص‌های ترافیکی خطوط عادی مانند سرعت، زمان سفر و سطح سرویس در تراکم‌های ترافیکی متوسط تا قبل از محدوده ظرفیت (شرایط ترافیکی غیر اشباع) و تاثیر منفی ناچیز بر شاخص‌های ترافیکی حمل و نقل همگانی در خطوط متناوب در این شرایط بوده است (Eichler, 2005; Eichler and Daganzo, 2006; Viegas and Lu., 2004; Truong et al., 2017; Chang et al., 2015; Zhu., 2010; Zyryanov and Mironchuk., 2012 Qiu et al., 2015; Lin et al., 2022; Dong et al., 2023).

همچنین در سالهای اخیر، تعدادی از محققین عملکرد این نوع خطوط را در شرایط درصد‌های مختلف حضور خودروهای متصل در خطوط ترافیکی عادی مورد بررسی قرار داده‌اند (Wu et al., 2016; Wu et al., 2017; Hu et al., 2024; Yang et al., 2024). نتایج این تحقیقات نشان‌دهنده است که با وجود امکانات تبادل اطلاعات بین خودروی (V2V) و نیز تبادل اطلاعات بین این نوع خودروها با سامانه‌های هوشمند کنارجاده‌ای (V2X)، شاخص‌های عملکردی ترافیکی خطوط عادی و متناوب بهبود بیشتری یافته و دامنه کارکرد آنها تا شرایط ترافیکی اشباع نیز قابل گسترش می‌باشد.

۲-۲-۲- سیستم‌های اولویت‌دهی مبتنی بر زمان^{۱۵}

استراتژی‌های اولویت‌دهی زمانی^{۱۶} در تقاطع‌های چراغ‌دار برای بهبود عملکرد حمل و نقل همگانی اجرا می‌شوند و به طور کلی در سه رویکرد اصلی دسته‌بندی می‌گردند.

۲-۲-۱- روش اولویت‌دهی غیر فعال^{۱۷}

این روش بدون نیاز به شناسایی تک‌تک وسایل نقلیه همگانی، اولویت را به مسیرهای اصلی آنها اعمال می‌کند. این هدف با استفاده از تدابیری چون افزایش زمان سبز در فازهای عبوری وسایل نقلیه همگانی، اعمال زمان سیکل کوتاه‌تر، یا هماهنگ‌سازی زمان‌بندی چراغ راهنمایی بر مبنای معیارهایی مانند سرعت متوسط وسایل نقلیه همگانی (به جای سرعت خودروهای شخصی) دنبال می‌شود. این رویکرد در ابتدا به دلیل سادگی در اجرا و عدم نیاز به زیرساخت‌های شناسایی پیچیده، مورد توجه قرار گرفت (Lin et al., 2017).

افراد و نیز کاهش ۷۸/۵٪ در مجموع تأخیر وارده بر افراد نسبت به سناریوی فاقد اولویت دهی زمانی و مکانی شد (Islam et al., 2018). کینجال و همکاران ترکیب استراتژی‌های پرش از صف و پیش‌سیگنال را ارزیابی کردند. این سناریو در ساعات اوج ترافیک نسبت به اجرای مجزای هر استراتژی، کاهش بیشتری در مدت زمان سفر افراد و افزایش نرخ ترافیک عبوری از از تقاطع را نشان داد (Kinjal et al., 2019).

چپابوت و بارست دریافتند که اجرای خطوط متناوب اتوبوس در ابتدا تأخیر ایجاد می‌کند، اما در درازمدت جبران می‌شود و در ساعات اوج ترافیک و در ترکیب با اولویت‌دهی با چراغ راهنمایی بهترین نتایج را دارد و زمان سفر به مقدار بسزایی کاهش می‌یابد (Chiabaut and Barcet., 2019). چانگسی و دنیل ترکیب اولویت‌دهی مکانی و زمانی (با استفاده از کنترل موج سبز) برای خطوط حمل‌ونقل همگانی تندرو را در نرم افزار ویزیم شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای تعادل بین اولویت‌دهی و استفاده بهینه از فضا در بازه‌های زمانی غیراوج، از یک روش دینامیکی برای اعلام وضعیت استفاده از خطوط به رانندگان خودروهای شخصی بهره بردند (Changxi et al., 2020). ژانگ و همکاران به تازگی با استفاده از شبکه عصبی با حافظه کوتاه‌مدت - بلندمدت^{۱۶} (LSTM) و الگوریتم‌های یادگیری تقویتی عمیق^{۱۷} (DRL)، یک مکانیزم پیش‌بینی برای کنترل خطوط متناوب و چراغ‌های راهنمایی پیشنهاد کردند که زمان سفر را به طور مؤثری بهبود می‌بخشد (Zhang et al., 2025).

مرور مطالعات پیشین در حوزه مدیریت ترافیک و اولویت‌دهی به حمل‌ونقل همگانی، نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در بهبود شاخص‌های عملکردی ترافیکی نظیر کاهش تأخیر و افزایش سرعت وسایل نقلیه حاصل شده است، اما این دستاوردها عمدتاً بر معیارهای وابسته به وسیله‌نقلیه متمرکز بوده‌اند. در این میان، یک شاخص جامع‌تر و انسان‌محور، یعنی تأخیر وارد بر افراد است که با لحاظ کردن تعداد سرنشینان، کارایی واقعی و ظرفیت خدمت‌دهی کل سیستم حمل‌ونقل را بهتر بازنمایی می‌کند. در بُعد دیگر، بخش قابل توجهی از راهکارهای مدیریتی پیشرفته، به خصوص آن‌هایی که متکی بر فناوری‌های نوظهور نظیر سامانه خودروهای متصل هستند، مستلزم زیرساخت‌های پرهزینه و پیچیده می‌باشند که اجرای آن‌ها در محیط‌های شهری کشور با محدودیت‌های عملیاتی و اقتصادی مواجه است. پژوهش حاضر با هدف رفع

تصادفات مربوط به عابرین پیاده ۱/۸٪ افزایش پیدا کرد (Song and Noyce., 2019).

استراتژی سیگنال تطبیقی^{۱۵}: این روش بر پایه بهینه‌سازی تأخیرات وارده بر وسایل نقلیه همگانی یا ترکیبی از تأخیر آن‌ها و خودروهای شخصی استوار است. اولویت‌دهی در این حالت ممکن است با ثابت ماندن مدت زمان سیکل چراغ راهنمایی یا با متغیر بودن آن (به شرط ثابت ماندن مجموع زمان دو سیکل متوالی) اجرا شود (Varaiya and Kurzhanskiy., 2010).

۲-۳- روش اولویت‌دهی با پیش‌سیگنال‌ها

این استراتژی با نصب یک چراغ راهنمایی کوچک قبل از تقاطع اصلی، به مدیریت صف و هدایت وسایل نقلیه همگانی به خطوط خلوت‌تر کمک می‌کند (Wu and Hounsell., 1998; Guler and Menendez., 2015). این روش نگرانی در مورد تأخیرهای ناشی از اندرکنش وسایل نقلیه همگانی با سایر ترافیک را برطرف می‌سازد. گولر و مندز دستورالعملی برای تعیین زمان‌بندی این پیش‌سیگنال‌ها برای تقاطعات فاقد زیرساخت شناسایی وسایل نقلیه همگانی تدوین کردند (Guler and Menendez., 2014).

۲-۳- استفاده ترکیبی از سیستم‌های اولویت‌دهی مبتنی

بر زمان و مکان

در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها عمدتاً بر ترکیب استراتژی‌های اولویت‌دهی زمانی (مبتنی بر چراغ راهنمایی) و مکانی (عمدتاً مبتنی بر خطوط اختصاصی اتوبوس) متمرکز شده‌اند تا مطلوبیت استفاده از حمل‌ونقل همگانی افزایش یابد. به عنوان نمونه، ترانگ و همکاران اثرات ترکیبی اولویت‌دهی زمانی (تمدید سبز و زود سبز شونده) و مکانی (اختصاص خط اختصاصی اتوبوس و پرش از صف) را با اثرات جداگانه هریک مقایسه کردند. نتایج شبیه‌سازی برای یک تقاطع ایزوله و یک راه شریانی در شبیه‌سازی ویزیم نشان داد که اثرات ترکیبی در خیابان‌های شریانی، با تنظیم زمان آفست چراغ‌های راهنمایی متوالی راه شریانی، اثرات مضاعف مطلوبی برای کاهش تأخیرات وارده بر اتوبوس‌ها را به همراه دارد (Truong et al., 2017).

اسلام و همکاران اجرای همزمان اولویت‌دهی زمانی و اختصاص خط عبور برای اتوبوس‌های تندرو (BRT) را در سطح شبکه بررسی کردند. این سناریو، با وجود افزایش ۱۶٪ زمان سفر خودروهای شخصی در شبکه، منجر به کاهش ۲۶٪ زمان سفر

کشاورز امتداد دارد، بخشی حیاتی از خط یک اتوبوس تندر و بی‌آرتی شهر در محور شرقی-غربی محسوب می‌شود.

مشخصات کلیدی کریدور:

ساختار ترافیکی: مسیر شامل هفت تقاطع چراغ‌دار متوالی است. مشخصات فیزیکی: عرض متوسط سواره‌رو در هر سمت حدود ۱۵ متر است.

خط ویژه: خطوط بی‌آرتی در سمت چپ هر باند مسیر قرار داشته و در بخش عمده‌ای از مسیر، دارای جداسازی فیزیکی از جریان ترافیک عمومی است.

ویژگی‌های عملیاتی: در وضعیت موجود، سرویس‌دهی اتوبوس‌ها با سرفاصله زمانی ۲ دقیقه انجام می‌شود. حداقل سرعت عملیاتی اتوبوس‌ها با احتساب توقف‌ها، ۲۰/۱ کیلومتر بر ساعت و سرعت حرکت مجاز بدون احتساب توقف‌ها برابر با ۵۰ کیلومتر بر ساعت توسط شهرداری اصفهان برآورد شده است. داده‌های ورودی برای مدل شبیه‌سازی، شامل احجام ترافیکی عبوری و زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی، از طریق تحلیل تصاویر ویدئویی دوربین‌های مرکز کنترل ترافیک شهرداری اصفهان استخراج شدند. بازه مطالعاتی به دلیل پوشش ساعات اوج صبحگاهی و دارا بودن حجم ترافیک متوسط به بالا انتخاب گردید. این بازه زمانی مشخص، بین ۷:۳۰ تا ۹:۳۰ صبح در تاریخ ۲۴ آبان ۱۴۰۱ بود که به‌عنوان مبنایی برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل پایه در نظر گرفته شد.

۳-۳- ابزار شبیه‌سازی، کالیبراسیون و اعتبارسنجی

در این پژوهش، از تلفیق نرم‌افزارهای سینکرو (جهت بهینه‌سازی زمان‌بندی تقاطعات) و ایسمان نکست (به‌عنوان بستر شبیه‌سازی ریزنگر) استفاده شده است. فرآیند پیاده‌سازی مدل در سه گام عملیاتی خلاصه می‌شود:

توسعه مدل پایه و واسنجی: داده‌های ترافیکی با تفکیک بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای مطابق با مقادیر ساعتی مندرج در شکل ۱ وارد ایسمان نکست شدند. مدل پایه بر اساس شرایط موجود مسیر، کالیبره گردید تا انطباق آن با واقعیت ترافیکی تضمین شود.

بهینه‌سازی هوشمند زمان‌بندی چراغ راهنمایی: جهت ایجاد یک مبنای مقایسه عادلانه، ابتدا تمامی تقاطعات در نرم‌افزار سینکرو مدل‌سازی و زمان‌بندی آن‌ها به‌صورت هوشمندفعال بهینه شد. این زمان‌بندی‌های بهینه‌شده به‌عنوان شرایط پایه برای تمامی سناریوها در نظر گرفته شدند. در این پژوهش، با توجه به استقرار خط اتوبوس تندر در سمت چپ هر محور، استراتژی تخصیص متناوب به حرکت‌های چپ‌گرد اجرا گردید. در این راستا،

این دو کاستی، یک راهکار مدیریتی ساده ولی در عین حال هوشمند، مؤثر و با قابلیت اجرایی بالا ارائه می‌دهد.

این مطالعه همچنین با ترکیب استراتژی خطوط اتوبوس با اولویت‌دهی متناوب و استراتژی اولویت‌دهی عبور از تقاطعها از طریق چراغ راهنمایی، یک رویکرد جامع را برای بهبود هم‌زمان عملکرد حمل‌ونقل همگانی و جریان عمومی ترافیک مورد توجه قرار داده‌است. نکته متمایز و نوآورانه دیگر این تحقیق، ارزیابی ترکیب این دو استراتژی در مقیاس یک مسیر نسبتاً طولانی شریانی شهری است؛ برخلاف غالب مطالعات گذشته که عمدتاً محدود به تحلیل در سطح یک تقاطع بوده‌اند. این تحلیل گسترده‌تر، نه‌تنها امکان ارتقاء کارایی عملیاتی حمل‌ونقل همگانی و بهینه‌سازی جریان ترافیک را نوید می‌دهد، بلکه گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار شهری از طریق بهبود کیفیت خدمات سفر و ترغیب به استفاده بیشتر از وسایل نقلیه پرسرنشین محسوب می‌شود.

۳-روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

در این پژوهش، یک رویکرد نوآورانه بر پایه مقایسه عملکردی دو راهبرد پیشرفته برای اولویت‌دهی عبور به حمل و نقل همگانی ارائه شده است. این راهبردهای کلیدی عبارت‌اند از: راهبرد مکانی: استراتژی خطوط اتوبوس با اولویت‌دهی متناوب و راهبرد ترکیبی مکانی-زمانی: یکپارچه‌سازی خطوط متناوب با اولویت‌دهی از طریق چراغ‌های راهنمایی. این مطالعه با دل‌سازی وضعیت موجود، که در آن خط اتوبوس بی‌آرتی به صورت اختصاصی در کل مسیر جداسازی شده است، آغاز می‌گردد. سپس، عملکرد هر سه راهبرد (پایه، مکانی، و ترکیبی) به منظور ارزیابی کارایی شبکه و تعیین شرایط مناسب استفاده، تحت شرایط حجم ترافیک فعلی (حجم ترافیکی نسبتاً بالا و نزدیک به اشباع) و همچنین شرایط اشباع و فوق‌اشباع ترافیک، و در سرفاصله‌های زمانی اتوبوس برابر با ۲، ۳، ۶ و ۱۰ دقیقه انجام شده است.

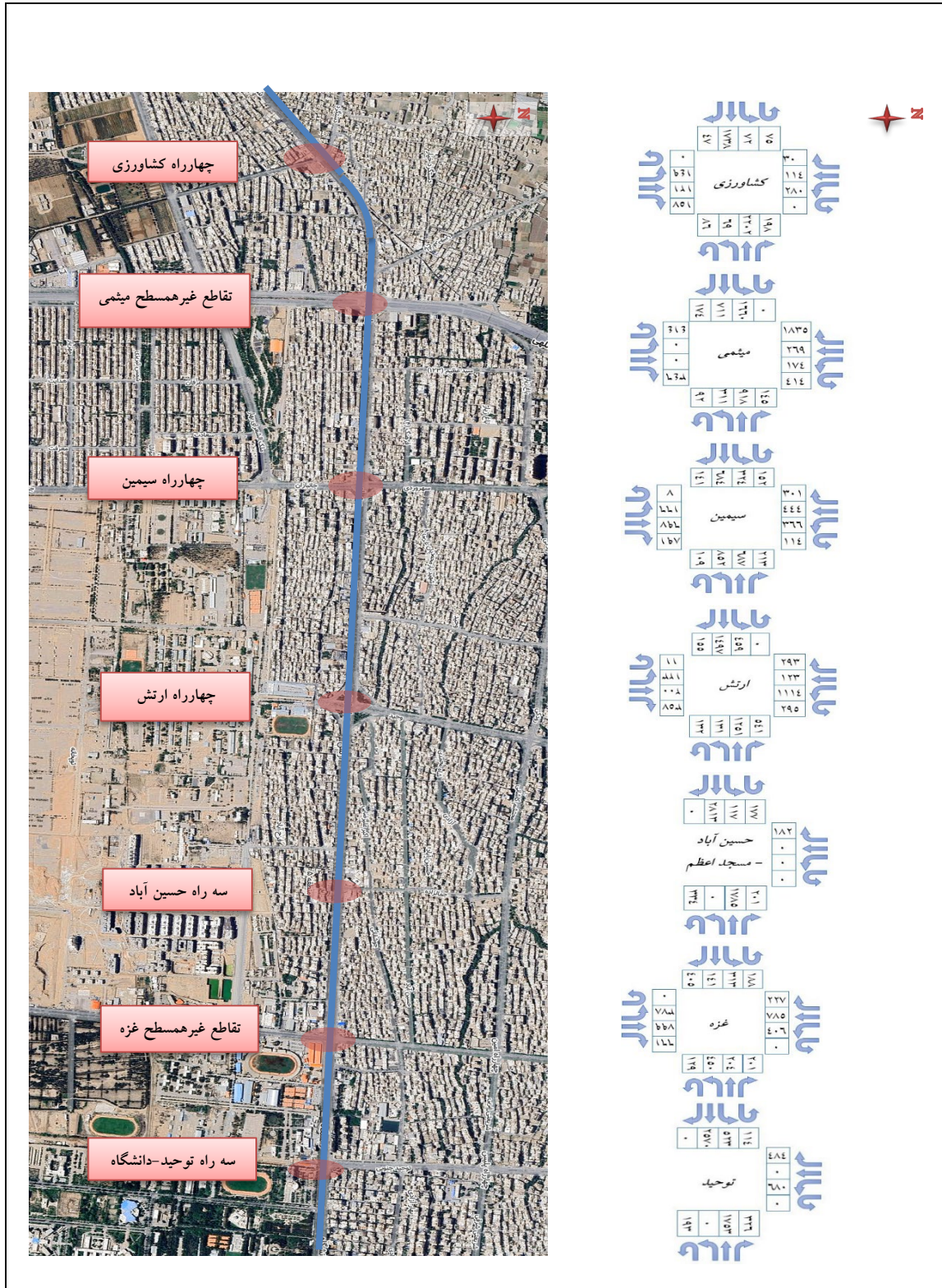
۳-۲- معرفی کریدور مورد مطالعه و نحوه جمع‌آوری

داده‌ها

برای ارزیابی عملکرد استراتژی‌های اولویت‌دهی اتوبوس، یک مسیر شریانی در شهر اصفهان به طول ۵٫۵ کیلومتر مورد مطالعه قرار گرفت. این کریدور که از تقاطع توحید-دانشگاه تا تقاطع

برسد. در نهایت، تمامی الگوهای بهینه شده مجدداً به محیط ایمنان منتقل شدند تا اثرات استراتژی‌های اولویت‌دهی بر شاخص‌های عملکردی شبکه ارزیابی گردند.

فازهای چپ‌گرد تقاطعات در حالت حداقل زمان بازخوانی تنظیم شدند. این رویکرد با هدف تخلیه سریع وسایل نقلیه چپ‌گرد و به حداقل رساندن زمان سبز در دوره‌های کم تقاضا طراحی شده است تا تداخل با حرکت مستقیم اتوبوس‌ها به کمترین میزان



شکل ۱. موقعیت مسیر و تقاطعات محدوده مورد مطالعه / میزان احجام ترافیک عبوری تقاطع‌ها (وسیله نقلیه/ساعت)

کالیبراسیون و اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل در دامنه ۰/۱۶ الی ۲/۰۳ قرار داشته‌است که نتایج این آماره در محدوده مجاز می‌باشد.

نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در مرحله کالیبراسیون مدل برای زمان سفر در حدفاصل تقاطع توحید تا تقاطع کشاورزی و بالعکس در دامنه ۲/۲۵ تا ۲/۸ قرار داشته‌است که نشان‌دهنده قرارگیری این شاخص در محدوده مجاز است.

۳-۴- استراتژی پیشنهادی برای کارکرد خطوط اتوبوس با اولویت دهی متناوب (مکانی) و ترکیب آن با اولویت دهی با چراغ راهنمایی (مکانی-زمانی)

در این بخش، ساختار مدل‌سازی و الزامات پیاده‌سازی استراتژی مکانی و مکانی-زمانی در کریدور شبیه‌سازی تبیین می‌گردد.

۳-۴-۱- استراتژی پیشنهادی برای خطوط اتوبوس با اولویت دهی متناوب (مکانی)

این بخش به تشریح پیکربندی و منطق عملکردی استراتژی پیشنهادی برای اولویت‌دهی متناوب (IBL) در کریدور مورد مطالعه می‌پردازد. مدل مفهومی و اجزای عملیاتی این راهبرد در شکل ۲ ارائه شده است.

پیاده‌سازی استراتژی اولویت‌دهی متناوب (IBL) بر پایه تعامل سنسورهای شناسایی و سیستم‌های اطلاع‌رسانی پویا استوار است.

اجزای کلیدی و فرآیند عملکردی این مدل به شرح زیر تبیین می‌گردد.

زیرساخت فنی و تجهیزات مورد نیاز^{۱۸}

-دکتور فعال‌ساز (dx): نصب شده در فاصله L_x از تقاطع جهت شناسایی ورود اتوبوس و آغاز فرآیند اولویت‌دهی (نحوه محاسبه L_x در ادامه تشریح خواهد شد).

-محدوده عملیاتی (LIBL): طول قطعه‌ای از مسیر در نزدیکی تقاطع که استراتژی تغییر وضعیت خط از عادی به ویژه اتوبوس (استراتژی IBL) در آن از طریق تابلوهای پیام متغیر (VMS^{۱۹}) یا علائم الکترونیکی مناسب اعمال می‌شود.

-دکتورهای نظارتی آزادسازی (d_1 تا d_4): نصب شده در فواصل ۵۰ متری در امتداد LIBL جهت رصد لحظه‌ای موقعیت اتوبوس و آزادسازی مرحله‌ای مسیر.

فرآیند کالیبراسیون مدل با هدف انطباق رفتار شبیه‌سازی با شرایط بومی، بر اساس دستورالعمل کالیبراسیون نرم‌افزار ایمسان و پارامترهای بومی‌سازی شده توسط حاذقی و همکاران انجام شد (سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران، ۱۳۹۲ و حاذقی و همکاران، ۱۳۹۴).

جهت کالیبراسیون و اعتبارسنجی شبکه موردبررسی در این پژوهش، از شاخص‌های حجم ترافیک عبوری از تقاطع و زمان سفر استفاده شد. میزان انطباق خروجی‌های شبیه‌سازی (x) با داده‌های میدانی (y) از طریق دو شاخص آماری درصد متوسط خطای مطلق (MAPE) و آماره جفری ای هورز (GEH) سنجیده شد (معادلات ۱ و ۲).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum 100 \times \left(\frac{|x_i - y_i|}{y_i} \right) \quad (1)$$

$$GEH = \sqrt{\frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}} \quad (2)$$

معیارهای پذیرش و نتایج

شاخص MAPE: بر اساس مطالعات پیشین، آستانه پذیرش این خطا بین ۱۵٪ تا ۱۷/۶۴٪ تعیین شده است (Mathew and Radakrishnan, 2010; دیبایی و فلاح تفتی، ۱۳۹۵؛ کردی زاده زواره و فلاح تفتی، ۱۳۹۸؛ جباری و فلاح تفتی، ۱۴۰۱). نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در مرحله کالیبراسیون مدل برای احجام عبوری از هر تقاطع در دامنه ۱/۷۹ تا ۱۵/۱۴ درصد قرار داشته‌است. این نتایج در مرحله اعتبارسنجی مدل در دامنه ۵/۸۵ الی ۱۴/۹۶ درصد قرار داشته‌است که نشان‌دهنده قرارگیری این خطا در محدوده مجاز است.

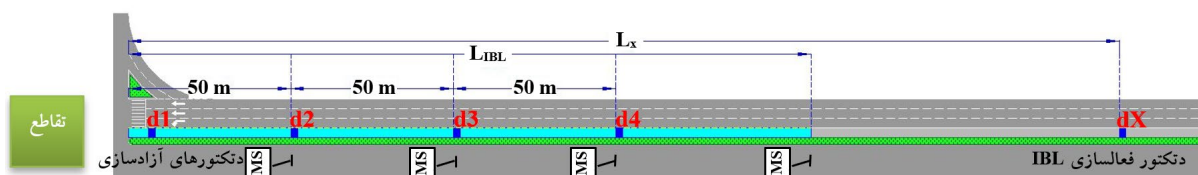
نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در مرحله کالیبراسیون مدل برای زمان سفر در حدفاصل تقاطع توحید تا تقاطع کشاورزی و بالعکس در دامنه ۷/۷۸ تا ۸/۲ درصد قرار داشته‌است که نشان‌دهنده قرارگیری این خطا در محدوده مجاز است.

آماره GEH: مطابق با مطالعات انجام شده توسط محققین، مقدار $GEH < 5$ به‌عنوان ملاک همخوانی داده‌ها در نظر گرفته شد (Ciuffo and Punzo, 2010; Dowling et al., 2004؛ کردی زاده زواره و فلاح تفتی، ۱۳۹۸). نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در مرحله کالیبراسیون مدل برای احجام عبوری از هر تقاطع در دامنه ۰/۲۲ تا ۲/۳۳ قرار داشته‌است. این نتایج در مرحله

به وسایل نقلیه شخصی در حال حرکت در طول L_{IBL} ، اعلام می‌شود.

-تخلیه ترافیک: خودروهای حاضر در محدوده L_{IBL} ، تحت هدایت علائم و زمان‌بندی چراغ راهنمایی تقاطع، ملزم به خروج سریع از خط هستند.

-آزادسازی پویا: به محض عبور اتوبوس از هر قطعه ۵۰ متری (تأیید توسط دتکتورهای d_1 تا d_4)، آن بخش بلافاصله برای تردد وسایل نقلیه شخصی آزاد می‌گردد. با عبور کامل اتوبوس از تقاطع، کل طول L_{IBL} به حالت عادی بازمی‌گردد.



شکل ۲. اجزای استراتژی خط اتوبوس با اولویت دهی متناوب مورد بررسی در این پژوهش

منطق عملکردی و تغییر وضعیت خط استراتژی پیشنهادی

فرآیند مدیریت خط بین دو وضعیت عادی (اشتراکی) و اختصاصی اتوبوس به صورت پویا تغییر می‌کند:

-وضعیت پایه: در غیاب اتوبوس، محدوده L_{IBL} برای تردد وسایل نقلیه شخصی آزاد است.

-فعال‌سازی اولویت: با عبور اتوبوس از دتکتور d_x ، وضعیت خط بلافاصله به اختصاصی تغییر یافته و از طریق تابلوهای پیام متغیر (VMS) یا علائم الکترونیکی مناسب، دستور تخلیه خط

متدولوژی طراحی خطوط اتوبوس با اولویت دهی متناوب

فرآیند پیاده‌سازی استراتژی IBL در مدل شبیه‌سازی طی سه گام کلیدی انجام می‌شود. گام نخست، تعیین طول بهینه اعمال استراتژی (L_{IBL}) است که بر مبنای ظرفیت تخلیه تقاطع در شرایط اشباع و تسهیل تغییر خط وسایل نقلیه طراحی شده است.

مبنای تعیین طول اعمال استراتژی خط ویژه اتوبوس با اولویت دهی متناوب (L_{IBL})

در این پژوهش، طول خط متناوب طولی از رویکرد ورودی مسیر منتهی به هر تقاطع است که بر اساس حداکثر طول صفی که در یک فاز سبز موثر تخلیه می‌شود، محاسبه می‌گردد. این رویکرد دو هدف اصلی را دنبال می‌کند:

تضمین کارایی در شرایط مختلف جریان ترافیک: جلوگیری از تجمع بیش از حد وسایل نقلیه در شرایط ترافیکی اشباع و حفظ قابلیت مانور اتوبوس‌ها.

تسهیل تغییر خط: ایجاد فضای کافی برای خروج خودروهای شخصی از خط متناوب به خطوط عادی پیش از رسیدن اتوبوس. این استراتژی، با هم‌سو کردن زیرساخت فیزیکی با ظرفیت دینامیک تقاطع، به افزایش بهره‌وری کلی شبکه ترافیکی کمک می‌کند. بر مبنای توضیحات فوق، برای محاسبه طول خط اعمال استراتژی اولویت دهی متناوب در نزدیکی هر تقاطع در مدل پیشنهادی، رابطه ۳ ارائه شده است:

$$L_{IBL} = \left(\frac{t_e}{h_s} \times L_s \right) \times 1.5 + (n \times L_s) \quad (3)$$

که در این رابطه:

L_{IBL} : طول خط اعمال استراتژی اولویت دهی متناوب در نزدیکی هر تقاطع (متر)

t_e (زمان سبز موثر): مدت زمان سبز موثر فاز اختصاص یافته به خط متناوب (IBL) (ثانیه)

h_s (سرفاصله اشباع وسایل نقلیه سبک): مقدار میانگین سرفاصله در شرایط اشباع که در این پژوهش با استفاده از متدولوژی هولندر و لیو، برابر با ۱/۷۵ ثانیه اندازه‌گیری شد (Hollander and Liu, 2008). این مقدار با بازه استاندارد مطالعات پیشین (۱/۵۷ تا ۲/۳ ثانیه) همخوانی دارد (Gonzalez, 2006; Al-Ghamdi, 1999; برگ گل و همکاران، ۱۳۹۰).

شایان ذکر است که سرفاصله زمانی تخلیه اشباع یک پارامتر ثابت نبوده و به شدت تحت تأثیر زمان اوج روز و موقعیت خط عبور قرار دارد و توصیه می‌گردد برای هر پروژه با توجه به شهر و محل تقاطع تعیین گردد.

L_s (طول توقف ایمن): این طول شامل طول خودرو و فاصله آزاد تا خودرو جلویی آن می‌باشد. این طول بین ۵ تا ۵٫۵ متر پیشنهاد شده است (آیین نامه طراحی معابر شهری بخش ۹،

مدل ریاضی تعیین فاصله دکتور (L_X)

در تحلیل حرکت اجسام، روابط بین سرعت، شتاب، زمان و جابه‌جایی از اصول اساسی علم دینامیک است. این روابط که تحت عنوان معادلات کینماتیک شناخته می‌شوند، برای حالتی که شتاب جسم ثابت باشد، به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$t_{dece} = \frac{-V_{BRT}}{a_{dece}} \quad (4)$$

$$t_{ac} = \frac{V_{BRT}}{a_{ac}} \quad (5)$$

$$x_{dece} = \frac{1}{2} \times a_{dece} \times \left(\frac{-V_{BRT}}{a_{dece}}\right)^2 + V_{BRT} \times \frac{-V_{BRT}}{a_{dece}} = \frac{-1}{2} \frac{V_{BRT}^2}{a_{dece}} \quad (6)$$

$$x_{ac} = \frac{1}{2} \times a_{ac} \times \left(\frac{V_{BRT}}{a_{ac}}\right)^2 + 0 = \frac{1}{2} \frac{V_{BRT}^2}{a_{ac}} \quad (7)$$

$$t_{else} = C - t_g + \frac{V_{BRT}}{a_{dece}} n - \frac{V_{BRT}}{a_{ac}} n - t_d n \quad (8)$$

$$x_{else} = t_{else} \times V_{BRT} \quad (9)$$

$$L_X = \left(\frac{-1}{2} \frac{V_{BRT}^2}{a_{dece}} n\right) + \left(\frac{1}{2} \frac{V_{BRT}^2}{a_{ac}} n\right) + \left((C - t_g)V_{BRT} + \frac{V_{BRT}}{a_{dece}} n - \frac{V_{BRT}}{a_{ac}} n - t_d V_{BRT} n\right) \quad (10)$$

$$(11)$$

$$L_X = \left(C - t_g - t_d n - \frac{1}{2} \frac{V_{BRT}}{a_{ac}} n + \frac{1}{2} \frac{V_{BRT}}{a_{dece}} n\right) V_{BRT}$$

که در این روابط:

t_{dece} : مدت زمان ترمزگیری (ثانیه) - مدت زمان کاهش سرعت اتوبوس قبل از توقف در ایستگاه
 V_{BRT} : سرعت مجاز حرکت اتوبوس (متر/ثانیه) = ۱۳/۸۹ متر بر ثانیه (معادل ۵۰ کیلومتر بر ساعت).

a_{dece} : شتاب کاهشی (متر بر مجذور ثانیه) = -۲ متر بر مجذور ثانیه، براساس داده‌های آماری دریافتی از سامانه اتوبوسرانی شهر اصفهان.

t_{ac} : زمان شتاب‌گیری (ثانیه) - مدت زمان افزایش سرعت اتوبوس پس از خروج از ایستگاه است.

a_{ac} : شتاب افزایشی (متر بر مجذور ثانیه) = +۱ متر بر مجذور ثانیه، براساس داده‌های آماری دریافتی از سامانه اتوبوسرانی شهر اصفهان.

۱۳۹۹). لکن در فرآیند کالیبراسیون مدل در این مطالعه، استفاده از طول ۶ متر مناسب‌تر تشخیص داده شد.

n (تعداد خودروهای باقی مانده): برای جلوگیری از اختلال در شبیه‌سازی، حضور ۳ وسیله نقلیه متوقف از فاز قبل در مدل در نظر گرفته شد.

ضریب ۱/۵: در این مطالعه، با توجه به وجود عمدتاً یک خط اختصاصی گردش به چپ برای خطوط عادی در محل تقاطع و عملکرد خط ویژه اتوبوس تندرو به عنوان یک خط عبور متناوب در نزدیکی تقاطع، یک مدل دو خطه برای جریانهای گردش به چپ در نظر گرفته شد. برای تعیین طول بهینه خط متناوب، ابتدا با استفاده از فرمول مربوط به سرفاصله اشباع، حداقل طول مورد نیاز در فاز سبز محاسبه گردید. با این حال، به دلیل ماهیت دینامیک این خط عبور و لزوم تسهیل تغییر خط برای وسایل نقلیه شخصی از خط متناوب به خط عادی کناری خود، یک ضریب اصلاح ۱/۵، جهت اطمینان از وجود فضای کافی برای تغییر خط خودروهای سبک و پایدار عملکرد مدل، به طول اولیه اضافه شد.

مکانیزم فعال‌سازی و غیرفعال‌سازی خط اتوبوس با اولویت دهی متناوب

گام دوم در پیاده‌سازی استراتژی پیشنهادی، تعیین فاصله بهینه نصب دکتور (L_X) جهت فعال‌سازی به موقع پروتکل اولویت‌دهی است. این فرآیند بر پایه پیش‌بینی دقیق زمان رسیدن اتوبوس به تقاطع استوار است تا فرصت کافی برای تخلیه کامل خودروهای سبک از محدوده L_{IBL} در طول یک سیکل کامل چراغ فراهم شود.

مؤلفه‌های زمانی پیش‌بینی حرکت

زمان تخمینی سفر اتوبوس از لحظه شناسایی تا تقاطع، بر اساس معادلات و ویژگی‌های عملیاتی ناوگان اتوبوسرانی اصفهان محاسبه می‌گردد. این زمان شامل چهار بخش اصلی است.

مدت زمان ترمزگیری (t_{dece}) (رابطه ۴)

مدت زمان توقف در ایستگاه (t_d)

مدت زمان شتاب‌گیری (t_{ac}) (رابطه ۵)

مدت زمان پیمایش با سرعت ثابت (t_{else}) در فواصل مابین دکتور و تقاطع با سرعت ۱۳/۸۹ متر بر ثانیه (معادل ۵۰ کیلومتر بر ساعت).

اتلاف ظرفیت معبر را در فواصل زمانی بین عبور اتوبوس‌ها به حداقل می‌رساند.

ارزیابی ایمنی و محاسبات کینماتیک فاصله توقف

تعیین طول ۵۰ متری برای هر بخش، علاوه بر ملاحظات عملیاتی، بر پایه فاصله توقف ایمن (SSD) جهت جلوگیری از تداخلات احتمالی انجام شده است. با فرض توقف ناگهانی اتوبوس، فاصله مورد نیاز برای توقف وسیله نقلیه سبک پشت‌سر با سرعت فرضی ۴۰ کیلومتر بر ساعت (در محدوده نزدیک تقاطع) در صورتیکه شتاب کاهش خودروی سبک ۳- متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شود (Bokare and Maurya, 2016)، مطابق رابطه (۱۲) حدود ۴۸ متر خواهد بود.

$$SSD = X - X_0 = \frac{V^2 - V_0^2}{2a} + V_0 t \quad (12)$$

در این رابطه، سرعت نهایی ($V=0$)، سرعت اولیه ($V_0=0$) (m/s)، شتاب ترمز ($a=-3 m/s^2$)، زمان عکس‌العمل راننده ($t=2$ second) و فاصله ایمنی توقف ($SSD=48.3 m$) می‌باشد.

این انتخاب علاوه بر ملاحظات ایمنی، از منظر کاربردپذیری استراتژی در شرایط واقعی نیز اهمیت دارد، چرا که طول ۵۰ متر نه آنقدر کوتاه است که باعث پیچیدگی در اجرای سیستم شود و نه آنقدر بلند که موجب کاهش انعطاف‌پذیری مدیریت جریان گردد.

۳-۴-۲- استراتژی اولویت‌دهی به حمل و نقل همگانی

با چراغ راهنمایی (زمانی) - سیستم فعال و بی‌قید و شرط

در این پژوهش، جهت تکمیل استراتژی اولویت‌دهی مکانی خطوط متناوب، از سیستم اولویت‌دهی فعال توسط چراغ راهنمایی استفاده شده است. منطق عملیاتی این بخش بر پایه استراتژی بی‌قید و شرط (درخواست فاز اختصاصی اتوبوس) استوار است؛ بدین معنا که به محض شناسایی اتوبوس توسط دکتورهای بالادست، فرمان تغییر فاز صادر می‌گردد.

استفاده از فاز اختصاصی اتوبوس در مدیریت چراغ‌های راهنمایی، موجب جداسازی زمانی کامل بین حرکت اتوبوس و سایر جریانات متقاطع می‌شود. این امر نقاط برخورد را به صفر

x_{dece} : مسافتی (متر) که اتوبوس در حین کاهش سرعت تا توقف کامل، قبل از ایستگاه اتوبوس طی می‌کند.

x_{ac} : مسافتی (متر) که اتوبوس در حین افزایش سرعت، بعد از ایستگاه اتوبوس طی می‌کند.

t_{else} : مدت زمان لازم (ثانیه) برای اتوبوس است تا فاصله ما بین دکتور و تقاطع جلویی را با سرعت ثابت طی کند (شامل مدت زمان ایست در ایستگاه و مدت زمان ترمزگیری و شتاب‌گیری نمی‌شود).

C : مدت زمان سیکل چراغ راهنمایی (ثانیه)

t_g : مدت زمان سبز (ثانیه)

t_d : مدت زمان توقف اتوبوس در ایستگاه (ثانیه) = ۳۰ ثانیه، براساس داده‌های آماری دریافتی از سامانه اتوبوسرانی شهر اصفهان.

n : تعداد ایستگاه از محل نصب دکتور تا تقاطع

x_{else} : مسافت طی شده (متر) مابین دکتور تا لبه تقاطع جلویی است که اتوبوس با سرعت ثابت طی می‌کند (شامل مسافت طی شده حین ترمزگیری و شتاب‌گیری نمی‌شود).

L_x : فاصله نصب دکتور برای کنترل فعالسازی و غیرفعالسازی خط متناوب از خط توقف تقاطع (متر).

نحوه آزادسازی پویای خط متناوب برای استفاده خودروهای

سبک و تحلیل فاصله ایمنی

در این مرحله، با هدف بیشینه‌سازی بهره‌وری از فضای معبر و خط متناوب، مکانیزم آزادسازی تدریجی خط متناوب پیاده‌سازی شد. این فرآیند بر مبنای تقسیم طول L_{IBL} به زیربخش‌های مجزا (لینک‌های کوتاه تر) استوار است.

منطق آزادسازی پویا

برای این منظور، محدوده عملیاتی اعمال استراتژی به قطعات ۵۰ متری تقسیم و در انتهای هر قطعه، یک دکتور نظارتی نصب گردید. به محض عبور اتوبوس از هر قطعه، وضعیت آن بخش به صورت خودکار از «اختصاصی» به «عادی» تغییر یافته و امکان ورود خودروهای سواری از عقب فراهم می‌شود. این رویکرد،

وضعیت فوق اشباع ترافیکی و شکل گیری گلوگاه است. نتایج تحلیل ظرفیت برای هر دو سناریو در جدول ۱ خلاصه شده است. این تفکیک سناریویی، امکان سنجش آستانه اثربخشی اولویت دهی را در شرایط ترافیکی روان و متراکم فراهم می‌سازد.

جدول ۱. نسبت حجم به ظرفیت ترافیک تقاطع‌ها در دو سناریوی مورد آزمون

نام تقاطع	سناریوی پایه-شرایط غیر اشباع تا نزدیک به اشباع ترافیکی	سناریوی بحرانی تر شرایط نزدیک به اشباع تا فوق اشباع ترافیکی
توحید	۰/۷۹	۰/۹۵
غزه	۰/۹۷	۱/۱۷
حسین آباد-مسجد اعظم	۰/۸۸	۱/۰۵
ارتش	۰/۵۸	۰/۸۴
سیمین	۰/۹۶	۱/۱۵
میثمی	۰/۹۸	۱/۱۸
کشاورزی	۰/۶۷	۰/۸۰

۳-۶- رویکرد ارزیابی و مقایسه گزینه‌ها

در این پژوهش، برای مقایسه گزینه‌های مختلف از دو شاخص اصلی تأخیر استفاده شد:

تأخیر وارده بر وسایل نقلیه که از خروجی نرم‌افزار شبیه‌سازی به صورت ثانیه بر کیلومتر ارائه گردید.

تأخیر وارده بر افراد (نفر- ساعت) که با در نظر گرفتن متوسط تعداد سرنشینان وسایل نقلیه محاسبه شد.

این دو شاخص امکان مقایسه کمی و کیفی گزینه‌ها را هم از منظر کارایی ناوگان و هم از منظر رفاه کاربران (مسافران) فراهم می‌سازد. تأخیر وارده بر افراد از رابطه ۱۳ محاسبه شد.

(۱۳)

$$d_{Tp} = \frac{d_{car} \times O_{car} \times Dist_{car} + d_{BRT} \times O_{BRT} \times Dist_{BRT}}{3600}$$

که در این رابطه:

d_{Tp} : کل تاخیر افراد سرنشین خودروهای سواری و اتوبوس‌ها (نفر-ساعت)

رسانده و از توقف‌های ناگهانی ناشی از تداخلات جریانی جلوگیری می‌کند. فاز اختصاصی با ایجاد یک حاشیه ایمن، ریسک برخورد‌های ناشی از خطای انسانی در محیط‌های متراکم شهری را به حداقل می‌رساند. اگرچه یکی از چالش‌های اصلی در تخصیص فاز اختصاصی به اتوبوس‌ها، افزایش بالقوه تأخیر وارده بر وسایل نقلیه شخصی به دلیل کاهش سهم زمان سبز آنهاست. با این حال، در این پژوهش، از طریق یکپارچه‌سازی با استراتژی IBL، یک مکانیزم خودجبران‌گر طراحی شده است که این تأخیر را خنثی می‌کند. این تعادل میان دو روش اولویت‌دهی عبور، منجر به وضعیتی می‌شود که در آن اتوبوس‌ها به اولویت حداکثری دست می‌یابند، در حالی که شاخص‌های عملکردی شبکه (مانند متوسط تأخیر خودروها و افراد) در محدوده پذیرش باقی مانده و یا بهبود می‌یابند.

فرآیند اولویت‌دهی از دو تکنیک اصلی برای کاهش تأخیر اتوبوس در تقاطعات استفاده می‌کند:

تمدید سبز: چنانچه در لحظه رسیدن اتوبوس به تقاطع، چراغ در وضعیت سبز باشد، مدت زمان سبز تا تخلیه کامل اتوبوس تمدید می‌گردد.

فراخوان سریع سبز: در صورتی که اتوبوس در فاز قرمز به تقاطع نزدیک شود، فازهای غیرمتقاطع به سرعت خاتمه یافته و فاز سبز جهت عبور اتوبوس زودتر از موعد آغاز می‌شود.

۳-۵- سناریوهای بارگذاری ترافیکی و تحلیل سطح اشباع کریدور

در این پژوهش، جهت ارزیابی حساسیت استراتژی‌های پیشنهادی نسبت به تغییرات حجم ترافیک، دو سناریوی بارگذاری در نرم‌افزار ایمسان نکست تعریف گردید:

- **سناریوی پایه:** این سناریو بیانگر وضعیت موجود ترافیک است. مطابق با مقادیر معیار نسبت حجم به ظرفیت (V/C) در جدول ۲، تمامی تقاطعات در این حالت دارای $V/C < 1$ می‌باشند ولی این نسبت برای حدود نیمی از تقاطعها نزدیک به ۱ می‌باشد که نشانگر وضعیت ترافیکی غیر اشباع تا نزدیک به اشباع در طول این مسیر است.

سناریوی نزدیک به اشباع-فوق اشباع: با اعمال ضریب ۱/۲ (افزایش ۲۰ درصدی حجم ترافیک)، این مسیر به وضعیت بحرانی اشباع و فوق اشباع تغییر حالت داد. در این شرایط، نسبت V/C در گره‌های کلیدی کریدور از عدد ۱ فراتر رفت که مؤید

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و تحلیل سناریوهای مختلف مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. قبل از ارزیابی عملکردی استراتژی‌ها و با استفاده از پارامترهای زمان سیکل، حداکثر مدت زمان سبز فاز اعمال استراتژی، که در جدول ۲ ارائه شده، طول اعمال خط متناوب (L_{IBL}) و فاصله نصب دتکتورهای فعال ساز (L_x) محاسبه گردید (جدول ۳). نتایج نشان می‌دهد که طول (L_{IBL}) بین ۸۵ تا ۲۵۰ متر و فاصله نصب دتکتورهای فعال‌ساز (L_x) در محدوده ۳۳۰ تا ۹۵۳ متر محاسبه گردید.

در این پژوهش، عملکرد سه سناریوی اصلی (سناریوی خطوط اختصاصی ثابت اتوبوس، سناریوی خطوط اتوبوس با اولویت دهی متناوب (IBL) و سناریوی ترکیبی خطوط اتوبوس با اولویت دهی متناوب و اولویت‌دهی با چراغ راهنمایی (TSP)^{۲۱}) بر اساس شاخص تأخیر وارده بر خودروهای سبک، تأخیر وارده بر اتوبوس‌ها و تأخیر وارده بر کل افراد شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اجرای مدل پیشنهادی در نرم افزار شبیه‌ساز ایمسان نکست در جدول ۴ ارائه شده است. جهت اطمینان از پایداری آماری، خروجی‌های نهایی از میانگین ۱۰ مرتبه اجرای مستقل شبیه‌سازی استخراج شده‌اند. جدول ۵ نیز، درصد تغییر تأخیر استراتژی‌های پیشنهادی را نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد.

d_{car} : تأخیر خودروهای سواری (ثانیه بر کیلومتر)

O_{car} : متوسط تعداد سرنشینان خودروهای سواری = ۱/۴۷

(مطالعات جامع حمل و نقل شهر اصفهان و حومه، ۱۴۰۳)

$Dist_{car}$: کل مسافت سفر خودروهای سواری در طول مسیر (کیلومتر)

d_{BRT} : تأخیر اتوبوس تندرو (ثانیه بر کیلومتر)

O_{BRT} : متوسط تعداد سرنشینان اتوبوس تندرو = ۴۰

(اندازه‌گیری شده به صورت میدانی)

$Dist_{BRT}$: کل مسافت سفر اتوبوس تندرو در طول مسیر (کیلومتر)

۳-۷- تحلیل آماری داده‌ها

جهت ارزیابی اثرات اصلی و متقابل متغیرهای مستقل بر شاخص‌های عملکردی شبکه، از آزمون تحلیل واریانس چندعاملی^{۲۲} در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. در مواردی که تفاوت گروه‌ها از نظر آماری معنادار نبود ($Sig > 0/05$)، عوامل جهت واکاوی دقیق‌تر تفکیک شده و تحلیل‌های ثانویه به صورت مجزا انجام گرفت. کلیه فرآیندهای آماری در محیط نرم‌افزار SPSS v.26 پیاده‌سازی گردید.

جدول ۲. زمان سیکل و حداکثر مدت زمان سبز فاز استراتژی

نام تقاطع	زمان سیکل (ثانیه)	حداکثر مدت زمان سبز فاز خط متناوب (ثانیه)
توحید-دانشگاه	۱۲۰	۴۸
حسین آباد-مسجد اعظم	۸۲	۲۷
غزه	۱۱۱	۲۵
ارتش	۱۱۵	۲۸
سیمین	۱۴۴	۳۵
میشمی	۸۵	۳۵
کشاورزی	۱۰۷	۱۶

جدول ۳. طول خط متناوب و فاصله نصب دکتور از تقاطع

نام تقاطع	طول IBL (متر)	فاصله دکتور فعال‌ساز از تقاطع (متر)
توحید-دانشگاه	۲۵۰	۴۳۹
حسین آباد-مسجد اعظم	۸۵	۷۶۴
غزه	۱۳۵	۶۳۰
ارتش	۱۵۰	۶۴۷
سیمین	۱۹۰	۹۵۳
میثمی	۱۸۰	۳۳۰
کشاورزی	۸۵	۷۰۳

جدول ۴. میزان تاخیرات وارده بر وسایل نقلیه و افراد در سه سناریوی اولویت‌دهی مورد بررسی برای حجم ترافیک در حالت پایه (حجم

ترافیک در حالت غیراشباع-نزدیک به اشباع) و در حالت نزدیک به اشباع-فوق اشباع

سناریو			اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه			اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه		
زمان تاخیر			سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP
تأخیر وارده بر خودروی سبک (ثانیه/کیلومتر)			۲۴/۷۹	۲۲/۹۸	۲۶/۸	۲۴/۱۰	۲۲/۵۳	۲۵/۴۰
تأخیر وارده بر اتوبوس تندرو (ثانیه/کیلومتر)			۴۱/۷	۴۳/۶۶	۲۹/۳۵	۳۸/۱۵	۴۰/۷۷	۲۶/۸۷
تأخیر وارده بر افراد در کل شبکه (نفر-ساعت)			۷۶۴/۲۸	۷۳۵/۹۹	۷۵۷/۰۹	۶۶۴/۷۴	۶۳۹/۶۳	۶۵۶/۹۲
سناریو			اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه			اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه		
زمان تاخیر			سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP
تأخیر وارده بر خودروی سبک (ثانیه/کیلومتر)			۲۳/۳۵	۲۲/۱۱	۲۲/۳۵	۲۲/۹۹	۲۱/۹۰	۲۱/۹۵
تأخیر وارده بر اتوبوس تندرو (ثانیه/کیلومتر)			۳۵/۷	۳۹/۴۹	۲۵/۲۰	۳۵/۰۸	۳۹/۱۳	۲۴/۷۰
تأخیر وارده بر افراد در کل شبکه (نفر-ساعت)			۵۸۲/۶۳	۵۶۰/۱۹	۵۴۲/۸۴	۵۵۱/۰۳	۵۲۹/۳۰	۵۱۲/۰۸
سناریو			اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه			اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه		
درصد تاخیر			سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP
تأخیر وارده بر خودروی سبک (ثانیه/کیلومتر)			۵۲/۵۴	۴۱/۶۷	۵۶/۹۲	۴۵/۳۲	۳۵/۹۸	۴۸/۲۰
تأخیر وارده بر اتوبوس تندرو (ثانیه/کیلومتر)			۸۶/۵۲	۸۹/۹۷	۶۴/۹۰	۷۸/۱	۸۳/۷	۵۹/۲۳
تأخیر وارده بر افراد در کل شبکه (نفر-ساعت)			۱۶۶۰/۴۷	۱۵۱۰/۸۱	۱۷۹۷/۴۱	۱۴۲۷/۷۴	۱۲۰۲/۸۰	۱۴۶۲/۷۵
سناریو			اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه			اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه		
درصد تاخیر			سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو پایه	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP

۳۱/۶۵	۳۱/۵۹	۴۴/۰۳	۳۴/۴۱	۳۴/۷	۴۴/۶۳	تاخیر وارده بر خودروی سبک (ثانیه/کیلومتر)
۵۳/۷۵	۸۰/۶۱	۷۰/۷۶	۵۵/۰۳	۸۳/۰۱	۷۲/۹	تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو (ثانیه/کیلومتر)
۸۹۸/۶۷	۹۳۱/۷۰	۱۲۳۲/۹۳	۱۰۱۲/۵۰	۱۰۶۵/۳۸	۱۲۷۳/۲۵	تاخیر وارده بر افراد در کل شبکه (نفر-ساعت)

جدول ۵. تغییرات نسبی تاخیر در سناریوهای مربوط به اجرای IBL و IBL+TSP نسبت به همان سناریوها برای حالت پایه و حالت نزدیک به اشباع-فوق اشباع (درصد)

حجم ترافیک در حالت پایه				
اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه		اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه		سناریو درصد تاخیر
سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	
۵/۳۹	-۶/۵۱	۸/۱۱	-۷/۳۰	درصد تاخیر وارده بر خودروی سبک
-۲۹/۵۷	۶/۸۷	-۲۹/۶۲	۴/۷۰	درصد تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو
-۱/۱۵	-۳/۷۵	-۰/۹۱	-۳/۷۰	درصد تاخیر وارده بر افراد در کل شبکه
اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه		اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه		سناریو درصد تاخیر
سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	
-۴/۵۲	-۴/۷۴	-۴/۲۸	-۵/۳۱	درصد تاخیر وارده بر خودروی سبک
-۲۹/۵۹	۱۱/۵۵	-۲۹/۴۱	۱۰/۶۲	درصد تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو
-۷/۰۷	-۳/۹۴	-۶/۸۳	-۳/۸۵	درصد تاخیر وارده بر افراد در کل شبکه
حجم ترافیک در حالت اشباع				
اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه		اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه		سناریو درصد تاخیر
سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	
۶/۳۵	-۲۰/۶۱	۸/۳۴	-۲۰/۶۹	درصد تاخیر وارده بر خودروی سبک
-۲۴/۱۶	۷/۱۷	-۲۴/۹۹	۳/۹۹	درصد تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو
۲/۴۵	-۱۵/۷۶	۸/۲۵	-۹/۰۱	درصد تاخیر وارده بر افراد در کل شبکه
اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه		اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه		سناریو درصد تاخیر
سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	سناریو IBL+TSP	سناریو IBL	
-۲۸/۱۲	-۲۸/۲۵	-۲۲/۹۰	-۲۲/۲۵	درصد تاخیر وارده بر خودروی سبک
-۲۴/۰۴	۱۳/۹۲	-۲۴/۵۱	۱۳/۸۷	درصد تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو
-۲۷/۱۱	-۲۴/۴۳	-۲۰/۴۸	-۱۶/۳۳	درصد تاخیر وارده بر افراد در کل شبکه

۴-۲- تحلیل و تفسیر آماری استراتژی های پیشنهادی

جهت ارزیابی معناداری اثرات اصلی و متقابل متغیرهای مستقل بر شاخص های عملکردی (تأخیر وارده بر خودروهای شخصی، اتوبوس ها و کل افراد شبکه) آزمون تحلیل واریانس چندعاملی به کار گرفته شد. جهت رعایت اختصار در اینجا فقط یافته های تفصیلی مربوط به استراتژی ترکیبی ارائه شده است (جدول ۶ الی ۸) که مؤید اعتبار بالای مدل های رگرسیونی توسعه یافته است. مقادیر ضریب همبستگی (R^2) برای استراتژی های مکانی و ترکیبی به ترتیب در بازه ۰/۹۸۸ الی ۰/۹۹۲ و ۰/۹۷۵ الی ۰/۹۹۴ استخراج گردید. این نتایج نشان می دهد که مدل های مذکور قادر به تبیین بیش از ۹۷/۵٪ از تغییرات متغیرهای وابسته هستند. چنین سطحی از نیکویی برازش، حاکی از دقت پارامتریک بالا و پایایی خروجی های شبیه سازی در برآورد تأخیرهاست.

۴-۲-۱- تحلیل اثر متغیرهای اصلی

۴-۲-۳- تحلیل اثربخشی استراتژی های اولویت دهی

تحلیل های آماری نشان می دهد که تمامی متغیرهای مستقل شامل حجم ترافیک، سرفاصله زمانی اتوبوس و نوع سناریو، تأثیر معناداری بر شاخص های تأخیر شبکه دارند ($p < 0/001$). بر اساس مقادیر Eta دو جزئی، حجم ترافیک با بیشترین مقدار، به عنوان غالب ترین عامل تأثیرگذار بر افزایش تأخیر در تمامی سطوح شناسایی گردید.

پیشنهادی در ارتقای کارایی شبکه

ارزیابی عملکرد هر یک از استراتژی های اولویت دهی پیشنهادی (مکانی و ترکیبی مکانی- زمانی)، بر پایه تحلیل همزمان تغییرات نسبی تأخیرات مورد بررسی نسبت به حالت پایه و شاخص های معناداری آماری انجام یافت.

استراتژی خطوط اتوبوس با اولویت دهی مکانی

الف- شرایط حجم پایه (غیر اشباع تا نزدیکی اشباع)

استراتژی پیشنهادی تحت سناریوی جریان پایه، علی رغم قطعیت کمتر نسبت به شرایط اشباع، همچنان بهبود معناداری را در شاخص ها مورد بررسی رقم زد.

کاهش تأخیر وارده بر خودروهای سبک: کاهش معنی دار ۴/۷ تا ۷/۳ درصدی در این شاخص مؤید افزایش انعطاف پذیری در تمامی سرفاصله های زمانی است.

افزایش تاخیر وارده بر اتوبوس های تندرو: افزایش معنادار

۴/۷ تا ۱۱/۶ درصدی تأخیر اتوبوس ها به عنوان یک تعامل عملکردی شناسایی شد. این افزایش معنادار، هزینه ای است که سیستم جهت دستیابی به سود کلان شبکه پذیرا شده است.

۴-۲-۲- تحلیل برهم کنش های کلیدی

یافته های حاصل از تحلیل برهم کنش ها، پیچیدگی و پویایی رفتار سیستم را به شرح ذیل تبیین می کند:

- برهم کنش حجم ترافیک × سناریو ($p < 0/001$): معناداری این برهم کنش مؤید آن است که اثربخشی استراتژی های اعمالی مستقیماً به حجم ترافیک وابسته است؛ به طوری که پتانسیل کاهش تأخیر در شرایط ترافیک اشباع به مراتب بیشتر از جریان پایه است.

- برهم کنش سرفاصله × حجم ترافیک ($p < 0/001$): معناداری این برهم کنش، نشان می دهد که حساسیت شبکه به تغییرات فرکانس حرکت اتوبوس ها در سطوح مختلف تقاضا متفاوت است.

و ضرایب Eta دو جزئی، نشان‌دهنده اثربخشی قاطع این راهبرد در شرایط بحرانی ترافیک است.

افزایش تأخیر وارده بر اتوبوس‌های تندرو: افزایش معنادار این تأخیر (۴ تا ۱۳/۹ درصد، بسته به سرفاصله زمانی اتوبوس‌ها) به‌عنوان یک هزینه جزئی تلقی می‌شود.

کاهش تأخیر وارده بر کل افراد شبکه: اعمال این راهبرد منجر به کاهش معنادار ۹ تا ۲۴/۴ درصدی تأخیر وارده بر کل افراد گردید. معناداری این شاخص در تمامی سرفاصله‌ها اثبات می‌کند که استراتژی خطوط متناوب، بهره‌وری کل سیستم حمل‌ونقل را در شرایط اشباع به‌طور مؤثری ارتقا می‌دهد.

کاهش تأخیر وارده بر کل افراد شبکه: کاهش معنادار ۳/۷ تا ۳/۹ درصدی تأخیر کل افراد اثبات می‌کند که منافع جمعی حاصل از مدیریت پویای خطوط بر تأخیرات ناوگانی غلبه کرده و منجر به ارتقای کارایی کلان شبکه شده است.

ب- شرایط نزدیک به اشباع - فوق اشباع ترافیکی

در شرایط جریان ترافیک نزدیک به اشباع - فوق اشباع، استراتژی خطوط متناوب به عنوان ابزاری کارآمد، منجر به بهبود معنادار شاخص‌های عملکردی شبکه گردید.

کاهش چشمگیر تأخیر وارده بر خودروهای سبک: جایگزینی خطوط اختصاصی با استراتژی خطوط متناوب منجر به کاهش معنادار ۲۰/۶ تا ۲۸/۲ درصدی تأخیر گردید. مقادیر بالای آماره F

جدول ۶: نتایج آزمون تی تست آنوا چندعاملی برای تأخیر وارده بر خودروی سبک بین سناریو پایه و سناریو اولویت‌دهی ترکیبی مکانی - زمانی

متغیر وابسته: تأخیر خودروی سبک						
Eta دو جزئی	معناداری (Sig) (p-value)	F	میانگین مربعات	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات نوع III	عوامل
۰/۹۷۵	۰/۰۰۰	۴۸۱/۲۲۳	۱۸۳۵/۲۲۶	۱۲	۲۲۰۲۲/۷۱۶ ^a	مدل اصلاح شده
۰/۹۹۷	۰/۰۰۰	۴۹۴۷۲/۰۰۲	۱۸۸۶۷۰/۱۴۱	۱	۱۸۸۶۷۰/۱۴۱	ثابت مدل
۰/۱۸۱	۰/۰۰۰	۳۲/۴۲۹	۱۲۳/۶۷۵	۱	۱۲۳/۶۷۵	سناریو
۰/۸۲۲	۰/۰۰۰	۲۲۵/۶۸۴	۸۶۰/۶۸۵	۳	۲۵۸۲/۰۵۵	سرفاصله زمانی اتوبوس
۰/۹۶۸	۰/۰۰۰	۴۵۱۴/۱۹۰	۱۷۲۱۵/۶۵۳	۱	۱۷۲۱۵/۶۵۳	حجم ترافیک
۰/۵۸۴	۰/۰۰۰	۶۸/۸۱۱	۲۶۲/۴۲۲	۳	۷۸۷/۲۶۵	سناریو X سرفاصله زمانی اتوبوس
۰/۶۷۱	۰/۰۰۰	۹۹/۷۸۶	۳۸۰/۵۵۲	۳	۱۱۴۱/۶۵۶	سرفاصله زمانی اتوبوس X حجم
۰/۲۳۵	۰/۰۰۰	۴۵/۲۰۹	۱۷۲/۴۱۲	۱	۱۷۲/۴۱۲	سناریو X حجم ترافیک
			۳/۸۱۴	۱۴۷	۵۶۰/۶۱۰	خطا
				۱۶۰	۲۱۱۲۵۳/۴۶۸	کل
				۱۵۹	۲۲۵۸۳/۳۲۶	کل تصحیح شده

^a. $R^2 = 0.975$ (Adjusted $R^2 = 0.973$)

جدول ۷. نتایج آزمون تی تست آنوا چندعاملی برای تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو بین سناریو پایه و سناریو اولویت‌دهی ترکیبی مکانی- زمانی

متغیر وابسته: تاخیر اتوبوس تندرو						
عوامل	مجموع مربعات نوع III	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	F	معناداری (/Sig) (p-value)	Eta دو جزئی
مدل اصلاح شده	۶۲۷۷۱/۲۷۱ ^a	۱۲	۵۲۳۰/۹۳۹	۱۹۴۴/۰۴۸	۰/۰۰۰	۰/۹۹۴
ثابت مدل	۳۹۷۹۳۸/۶۶۳	۱	۳۹۷۹۳۸/۶۶۳	۱۴۷۸۹۱/۵۸۰	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹
سناریو	۸۹۸۱/۷۰۹	۱	۸۹۸۱/۷۰۹	۳۳۳۸/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۵۸
سرفاصله زمانی اتوبوس	۲۲۰۲/۴۱۷	۳	۷۳۴/۱۳۹	۲۷۲/۸۳۸	۰/۰۰۰	۰/۸۴۸
حجم ترافیک	۵۰۵۶۷/۷۴۳	۱	۵۰۵۶۷/۷۴۳	۱۸۷۹۳/۲۰۶	۰/۰۰۰	۰/۹۹۲
سناریو×سرفاصله زمانی اتوبوس	۶۳/۱۲۰	۳	۲۱/۰۴۰	۷/۸۱۹	۰/۰۰۰	۰/۱۳۸
سرفاصله زمانی اتوبوس×حجم	۳۶۱/۴۵۵	۳	۱۲۰/۴۸۵	۴۴/۷۷۸	۰/۰۰۰	۰/۴۷۷
سناریو×حجم	۵۹۴/۸۲۷	۱	۵۹۴/۸۲۷	۲۲۱/۰۶۴	۰/۰۰۰	۰/۶۰۱
خطا	۳۹۵/۵۴۰	۱۴۷	۲/۶۹۱			
کل	۴۶۱۱۰۵/۴۷۴	۱۶۰				
کل تصحیح شده	۶۳۱۶۶/۸۱۱	۱۵۹				

^a $R^2 = ۰/۹۹۴$ (Adjusted $R^2 = ۰/۹۹۳$)

جدول ۸. نتایج آزمون تی تست آنوا چندعاملی برای تاخیر وارده بر افراد کل شبکه بین سناریو پایه و سناریو اولویت‌دهی ترکیبی مکانی- زمانی

متغیر وابسته: تاخیر وارده بر افراد کل شبکه						
عوامل	مجموع مربعات نوع III	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	F	معناداری (/Sig) (p-value)	Eta دو جزئی
مدل اصلاح شده	۲۷۳۲۵۹۵۴/۲ ^a	۱۲	۲۲۷۷۱۶۲/۸۵۳	۶۴۱/۴۸۱	۰/۰۰۰	۰/۹۸۱
ثابت مدل	۱۵۵۷۹۳۹۱۱/۹	۱	۱۵۵۷۹۳۹۱۱/۹	۴۳۸۸۷/۴۲۵	۰/۰۰۰	۰/۹۹۷
سناریو	۱۷۲۷۹۸/۲۵۵	۱	۱۷۲۷۹۸/۲۵۵	۴۸/۶۷۸	۰/۰۰۰	۰/۲۴۹
سرفاصله زمانی اتوبوس	۴۹۵۹۶۷۸/۴۸۷	۳	۱۶۵۳۲۲۶/۱۶۲	۴۶۵/۷۱۷	۰/۰۰۰	۰/۹۰۵
حجم ترافیک	۲۰۴۸۴۶۸۶/۹۱	۱	۲۰۴۸۴۶۸۶/۹۱	۵۷۷۰/۵۷۳	۰/۰۰۰	۰/۹۷۵
سناریو×سرفاصله زمانی اتوبوس	۴۴۵۵۲۹/۵۸۶	۳	۱۴۸۵۰۹/۸۶۲	۴۱/۸۳۵	۰/۰۰۰	۰/۴۶۱
سرفاصله اتوبوس×حجم	۱۱۹۲۴۱۳/۰۰۸	۳	۳۹۷۴۷۱/۰۰۳	۱۱۱/۹۶۸	۰/۰۰۰	۰/۶۹۶
سناریو×حجم	۷۰۸۴۷/۹۹۳	۱	۷۰۸۴۷/۹۹۳	۱۹/۹۵۸	۰/۰۰۰	۰/۱۲۰
خطا	۵۲۱۸۲۸/۴۰۷	۱۴۷	۳۵۴۹/۸۵۳			
کل	۱۸۳۶۴۱۶۹۴/۵	۱۶۰				
کل تصحیح شده	۲۷۸۴۷۷۸۲/۶۴	۱۵۹				

^a $R^2 = ۰/۹۸۱$ (Adjusted $R^2 = ۰/۹۸۰$)

جدول ۹. نتایج آزمون تی تست برای تاخیر وارده بر خودروهای سبک بین سناریو پایه و سناریو ترکیبی مکانی- زمانی

متغیر وابسته: تاخیر وارده بر خودروهای سبک						
Eta دو جزئی	معناداری (/Sig) (p-value)	F	میانگین مربعات	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات نوع III	عامل سرفاصله
شرایط ترافیکی پایه (شرایط غیر اشباع تا نزدیک به اشباع ترافیکی)						
۰/۶۳۰	۰/۰۰۰	۳۰/۶۱۴	۲۰/۱۸۰	۱	۲۰/۱۸۰	اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه
۰/۴۵۵	۰/۰۰۱	۱۵/۰۲۸	۸/۴۷۶	۱	۸/۴۷۶	اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه
۰/۳۶۳	۰/۰۰۵	۱۰/۲۴۹	۵/۰۱۰	۱	۵/۰۱۰	اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه
۰/۴۰۳	۰/۰۰۳	۱۲/۱۶۷	۵/۳۹۸	۱	۵/۳۹۸	اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه
شرایط غیر اشباع تا نزدیک به اشباع ترافیکی						
۰/۶۶۶	۰/۰۰۰	۳۵/۹۵۶	۹۵/۹۶۶	۱	۹۵/۹۶۶	اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه
۰/۵۱۹	۰/۰۰۰	۱۹/۳۹۳	۴۱/۵۵۸	۱	۴۱/۵۵۸	اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه
۰/۹۴۷	۰/۰۰۰	۳۲۳/۵۹۷	۵۲۲/۳۴۴	۱	۵۲۲/۳۴۴	اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه
۰/۹۷۰	۰/۰۰۰	۵۷۲/۱۶۷	۷۶۶/۴۴۶	۱	۷۶۶/۴۴۶	اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه

جدول ۱۰. نتایج آزمون تی تست برای تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو بین سناریو پایه و سناریو ترکیبی مکانی- زمانی

متغیر وابسته: تاخیر وارده بر اتوبوس تندرو						
Eta دو جزئی	معناداری (/Sig) (p-value)	F	میانگین مربعات	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات نوع III	عامل سرفاصله
شرایط ترافیکی پایه (شرایط غیر اشباع تا نزدیک به اشباع ترافیکی)						
۰/۹۷۴	۰/۰۰۰	۶۶۴/۳۲۰	۷۶۲/۸۶۰	۱	۷۶۲/۸۶۰	اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه
۰/۹۷۱	۰/۰۰۰	۵۹۸/۷۴۴	۶۳۶/۱۹۲	۱	۵۹۸/۷۴۴	اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه
۰/۹۷۰	۰/۰۰۰	۵۷۳/۶۱۵	۵۵۱/۳۵۵	۱	۵۵۱/۳۵۵	اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه
۰/۹۷۴	۰/۰۰۰	۶۸۷/۳۹۰	۵۳۸/۸۲۶	۱	۵۳۸/۸۲۶	اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه
شرایط نزدیک به اشباع تا فوق اشباع ترافیکی						
۰/۹۶۰	۰/۰۰۰	۴۲۹/۲۶۰	۲۳۳۶/۶۹۰	۱	۲۳۳۶/۶۹۰	اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه
۰/۹۵۸	۰/۰۰۰	۴۱۲/۴۵۵	۱۷۸۰/۰۰۷	۱	۱۷۸۰/۰۰۷	اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه
۰/۹۵۹	۰/۰۰۰	۴۲۲/۳۲۸	۱۵۹۶/۵۰۶	۱	۱۵۹۶/۵۰۶	اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه
۰/۹۵۳	۰/۰۰۰	۳۶۵/۱۱۲	۱۴۴۶/۵۳۰	۱	۱۴۴۶/۵۳۰	اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه

جدول ۱۱. نتایج آزمون تی تست برای تأخیر وارده بر کل افراد شبکه بین سناریو پایه و سناریو ترکیبی مکانی- زمانی

متغیر وابسته: تأخیر وارده بر افراد کل شبکه						
عوامل	مجموع مربعات نوع III	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	F	معناداری (Sig) (p-value)	Eta دو جزئی
شرایط ترافیکی پایه (شرایط غیر اشباع تا نزدیک به اشباع ترافیکی)						
اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه	۲۵۸/۲۶۵	۱	۲۵۸/۲۶۵	۰/۳۳۵	۰/۵۷۰	۰/۰۱۸
اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه	۳۲۴/۶۵۷	۱	۳۲۴/۶۵۷	۰/۶۸۳	۰/۴۱۹	۰/۰۳۷
اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه	۸۲۴۷/۴۸۵	۱	۸۲۴۷/۴۸۵	۲۴/۱۷۱	۰/۰۰۰	۰/۵۷۳
اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه	۷۴۸۹/۹۹۸	۱	۷۴۸۹/۹۹۸	۳۲/۱۴۳	۰/۰۰۰	۰/۶۴۱
شرایط نزدیک به اشباع تا فوق اشباع ترافیکی						
اتوبوس با سرفاصله ۲ دقیقه	۹۳۶۱/۳۴۹	۱	۹۳۶۱/۳۴۹	۲۹/۴۱۹	۰/۰۰۰	۰/۶۲۰
اتوبوس با سرفاصله ۳ دقیقه	۳۷۲۲/۳۵۶	۱	۳۷۲۲/۳۵۶	۱/۷۹۱	۰/۱۹۸	۰/۰۹۰
اتوبوس با سرفاصله ۶ دقیقه	۳۴۰۵۸۴/۱۲۰	۱	۳۴۰۵۸۴/۱۲۰	۱۷۰/۸۹۸	۰/۰۰۰	۰/۹۰۵
اتوبوس با سرفاصله ۱۰ دقیقه	۵۵۹۰۲۹/۸۵۹	۱	۵۵۹۰۲۹/۸۵۹	۲۹۲/۶۳۶	۰/۰۰۰	۰/۹۴۲

استراتژی ترکیبی (مکانی-زمانی)

الف- شرایط حجم پایه (شرایط غیر اشباع تا نزدیک به اشباع) استراتژی پیشنهادی در سناریوی جریان پایه، عملکرد متمایزی نسبت به استراتژی مکانی نشان داد:

تغییر تأخیر وارده بر خودروهای سبک: میزان تأخیر در سرفاصله‌های زمانی ۲ و ۳ دقیقه به‌طور معناداری (۵/۴ تا ۸/۱ درصد) افزایش یافت؛ در حالی که برای سرفاصله‌های ۶ و ۱۰ دقیقه، کاهش معنادار ۴/۳ تا ۴/۵ درصدی به ثبت رسید.

کاهش تأخیر وارده بر اتوبوس‌های تندرو: میانگین تأخیر وارده بر اتوبوس‌ها با کاهش معنادار ۲۹/۵ درصدی همراه بود.

کاهش تأخیر وارده بر کل افراد شبکه: میزان تأخیر در سرفاصله‌های زمانی ۲ و ۳ دقیقه به‌طور غیرمعناداری ۰/۹ تا ۱/۲ درصد کاهش یافت؛ در حالی که برای سرفاصله‌های ۶ و ۱۰ دقیقه، کاهش معنادار ۴/۳ تا ۴/۵ درصدی به ثبت رسید.

ب- شرایط نزدیک به اشباع- فوق اشباع ترافیکی

استراتژی پیشنهادی در سناریوی جریان نزدیک به اشباع- فوق اشباع نیز، عملکرد متمایزی نسبت به استراتژی مکانی نشان داد.

تغییر تأخیر وارده بر خودروهای سبک: میزان تأخیر در سرفاصله‌های زمانی ۲ و ۳ دقیقه به‌طور معناداری ۶/۴ تا ۸/۳ درصد افزایش یافت؛ در حالی که برای سرفاصله‌های ۶ و ۱۰ دقیقه، کاهش معنادار ۲۲/۹ تا ۲۸/۱ درصدی به ثبت رسید.

کاهش تأخیر وارده بر اتوبوس‌های تندرو: تأخیر وارده بر اتوبوس‌ها با کاهش معنادار ۲۴/۰ تا ۲۵/۰ درصدی همراه بود. کاهش تأخیر وارده بر کل افراد شبکه: میزان تأخیر در سرفاصله‌های زمانی ۲ (معنادار) و ۳ دقیقه (غیرمعنادار)، ۲/۵ تا ۸/۳ درصد افزایش یافت؛ در حالی که برای سرفاصله‌های ۶ و ۱۰ دقیقه، کاهش معنادار ۲۰/۵ تا ۲۷/۱ درصدی به ثبت رسید. این نتایج نشان می‌دهد که در دامنه شرایط ترافیکی با حجم ترافیکی نسبتاً بالا تا شرایط ترافیکی فوق اشباع بررسی شده، استراتژی ترکیبی در سناریوهای با سرفاصله کم (۲ و ۳ دقیقه) منجر به کاهش تأخیر وارده بر کل افراد نگردد ولی در سناریوهای با سرفاصله بیشتر منجر به کاهش تأخیر وارده بر کل افراد شده‌است. اما استراتژی ترکیبی، بهبود معنادار و قابل توجهی را در شاخص تأخیر وارده بر اتوبوس‌ها در همه سناریوها ایجاد کرد.

مقایسه استراتژی مکانی و استراتژی زمانی- مکانی

شرایط حجم پایه- سرفاصله زمانی اتوبوس ۲ و ۳ دقیقه

تحلیل تطبیقی تغییرات تأخیر نسبت به حالت پایه (تأخیر وارده بر خودروهای سواری، اتوبوس‌های تندرو و کل شبکه) و یافته‌های آزمون‌های آماری، نشان داد که در شرایط ترافیکی اشباع با سرفاصله زمانی اتوبوس ۲ دقیقه تنها استراتژی مکانی

با استفاده از فناوری‌های هوشمند، تخصیص ظرفیت معبر را به صورت پویا مدیریت می‌کنند.

یافته‌های کلیدی حاصل از مقایسه این دو رویکرد

کارایی استراتژی خطوط متناوب (مکانی) نوین: در سناریوهای ترافیک پایه و اشباع با سرفاصله‌های زمانی کوتاه (۲ و ۳ دقیقه)، استراتژی مکانی با کاهش ۳/۷ تا ۱۵/۸ درصدی تأخیر کل افراد شبکه، عملکرد بهتری نسبت به استراتژی ترکیبی مکانی-زمانی ارائه داد. این امر نشان می‌دهد که در تواترهای بالای اتوبوس، تخصیص مکانی خطوط به تنهایی برای مدیریت جریان ترافیک کفایت می‌کند. با توجه به اینکه از یک سو، تأخیر وارده به کل افراد در سرفاصله‌های پائین برای استراتژی ترکیبی نسبتاً ناچیز می‌باشد و در از سوی دیگر، منجر به کاهش قابل توجه تأخیر به اتوبوسها می‌شود، می‌توان اذعان نمود که حتی کاربرد استراتژی ترکیبی در این شرایط نیز قابل قبول می‌باشد. چرا که در جهت افزایش مطلوبیت حمل و نقل همگانی و کاهش مطلوبیت استفاده از خودرو شخصی عمل کرده و بنابراین از نقطه نظر توسعه حمل و نقل پایدار شهری مبتنی بر حمل و نقل همگانی، می‌تواند استراتژی مناسبی باشد.

مزیت استراتژی ترکیبی هوشمند: با افزایش سرفاصله زمانی به ۶ و ۱۰ دقیقه، استراتژی ترکیبی برتری خود را اثبات کرد. این استراتژی توانست تأخیر کل افراد شبکه را بین ۶/۸ تا ۲۷/۱ درصد به‌طور معناداری کاهش دهد که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این رویکرد در مدیریت بازه‌های زمانی طولانی‌تر بین اتوبوس‌هاست.

نوآوری در گسترش دامنه کاربرد: یکی از دستاوردهای مهم این تحقیق، اثبات کارایی این دو استراتژی جدید در شرایط ترافیکی اشباع است؛ در حالی که پژوهش‌های مشابه پیشین، کاربرد چنین راهکارهایی را به شرایط غیراشباع محدود می‌دانستند.

در نهایت، این مطالعه ثابت کرد که هر دو استراتژی پیشنهادی، ابزارهای مدیریتی قدرتمندی برای ارتقای عدالت در تخصیص فضای معابر هستند. انتخاب بین این دو استراتژی جدید باید بر مبنای سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس‌ها و از آن مهمتر اهداف مدیریت ترافیک شهری انجام شود تا بیشترین بهره‌وری در کل سیستم حمل‌ونقل حاصل گردد.

موثر می‌باشد زیرا استراتژی مکانی-زمانی منجر به افزایش معنادار تأخیر وارده بر کل افراد شبکه می‌شود اگرچه تأخیر وارده بر اتوبوس‌ها را تا ۲۵/۰ درصد کاهش می‌دهد.

در شرایط ترافیکی پایه با سرفاصله زمانی اتوبوس ۲ و ۳ دقیقه و اشباع با سرفاصله زمانی اتوبوس ۳ دقیقه به دلیل بهبود غیرمعنادار استراتژی ترکیبی، همچنان استراتژی مکانی به عنوان روش مناسب پیشنهاد می‌گردد.

شرایط پایه-سرفاصله زمانی اتوبوس ۶ و ۱۰ دقیقه

تحلیل تطبیقی تغییرات تأخیر نسبت به حالت پایه (تأخیر وارده بر خودروهای سواری، اتوبوس‌های تندرو و کل شبکه) در کنار یافته‌های آزمون‌های آماری، مؤید برتری عملیاتی استراتژی ترکیبی مکانی-زمانی نسبت به استراتژی مکانی در شرایط ترافیکی "پایه/اشباع با سرفاصله زمانی اتوبوس ۶ و ۱۰ دقیقه" است. به طور خلاصه، نتایج حاصله از مطالعات پیشین نشان دادند که استراتژی اولویت‌دهی با خطوط متناوب برای شرایط ترافیک متوسط/غیراشباع (Viegas and Lu, 2004; Viegas; Truong et al., 2017; Chang et al., 2015 and Lu, 1997) و استراتژی اولویت‌دهی ترکیبی برای شرایط ترافیک سنگین/اشباع (Kinjal et al., 2019; Chiabaut and Barcet., 2019) مناسب است. اما در این پژوهش با تعیین طول بهینه خط متناوب در حداصل تقاطع‌ها، کارایی استراتژی مکانی و ترکیبی برای هر دو شرایط ترافیکی اثبات گردید. لازم به ذکر است، همانطور که از پیشینه تحقیق ملاحظه شد اکثر تحقیقات پیشین نتایج خود را بر مبنای شاخص‌های عملکردی مربوط به وسایل نقلیه (Zhu., 2010; Zyryanov and Mironchuk., 2012; Lin et al., 2022; Dong et al., 2023; Yang et al., 2024) و تنها تعداد معدودی از آنها، نتایج خود را برحسب شاخص‌های عملکردی مربوط به افراد ارائه نموده‌اند. شاخص عملکردی وابسته به افراد می‌تواند تأثیر استراتژیهای مورد بررسی را به نحو واقع‌بینانه‌تری نشان دهد. این موضوع نیز در این پژوهش، مدنظر قرار گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به توسعه و ارزیابی دو راهبرد نوآورانه در مدیریت خطوط اتوبوس، تحت عنوان «استراتژی مکانی» و «استراتژی ترکیبی مکانی-زمانی» پرداخت که هر دو بر پایه مفهوم نوین اولویت‌دهی متناوب بنا شده‌اند. برخلاف رویکردهای سنتی که بر خطوط اختصاصی ثابت تکیه دارند، این استراتژی‌های جدید

۶- پی‌نوشت‌ها

SCATS مطالعه موردی تقاطع توس -خیام شهر مشهد. پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک.

-دیبايي، امير و فلاح تفتي، مهدي (۱۳۹۵). مدل‌سازی رفتار ترافیک ناهمگن و دارای بی‌نظمی در خطوط عبور با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی ویزیم. دانشگاه یزد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

-شهرداری اصفهان (۱۴۰۳). مطالعات جامع حمل و نقل شهر اصفهان و حومه. معاونت حمل و نقل و ترافیک.

-کردی‌زاده زواره، حمیدرضا و فلاح تفتی، مهدي (۱۳۹۸). استفاده از روش‌های طرح‌عاملی کسری و الگوریتم ژنتیک به منظور کالیبراسیون شرایط ترافیکی بی‌نظم در نرم‌افزار شبیه‌سازی ویزیم. یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

-کردی‌زاده زواره، حمیدرضا و فلاح تفتی، مهدي (۱۳۹۸). مقایسه دو روش خط‌سیر شبه‌بهینه و طرح‌عاملی کسری به منظور کالیبراسیون شرایط ترافیکی ناهمگن و بی‌نظم با استفاده از نرم‌افزار ویزیم. یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

-معاونت حمل و نقل و وزارت راه و شهرسازی (۱۳۹۹). آیین‌نامه طراحی معابر شهر. بخش ۹، حمل و نقل و کاربری زمین.

-Al-Ghamdi, A. (1999). Entering Headway for Through Movements at Urban Signalized Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1678, 42-47.

-Anderson, P., and Daganzo, C. F. (2019). Effect of Transit Signal Priority on Bus Service Reliability. *Transportation Research Procedia* 38.

-APTA, Public Transportation Fact Book. (2008). American Public Transportation Association, Washington, DC.

-Bokare, P.S., and Maurya, A.K. (2016). Acceleration-Deceleration Behaviour of Various Vehicle Types. *Transportation Research Procedia* 25, 4733-4749.

-Chang, Y. L., Dong, Y. T., and Zhang, P. (2015). Study on Optimal Control System of Intermittent Bus-Only Approach.

¹Spatial (space based) Public Transport Prioritization

² Exclusive Bus Lane (XBL), Parallel with general flow

³ Segregated Bus Lane

⁴ With-Flow Reserved Lane

⁵ Contra-flow Reserved Lane

⁶ Vehicle-to-Vehicle

⁷ Vehicle-to-Infrastructure

⁸ Time-based PTP

⁹ Signal Priority

¹⁰ Passive Priority

¹¹ Active Priority

¹² Unconditional

¹³ Conditional

¹⁴ Surrogate Safety Assessment Model

¹⁵ Adaptive Signal Strategy

¹⁶ Long Short-Term Memory

¹⁷ Deep Reinforcement Learning

¹⁸ Technical Infrastructure

¹⁹ Variable Message Signs

²⁰ Multi-way ANOVA

²¹ Transit Signal Priority

۷- مراجع

-شهرداری تهران (۱۳۹۲). رایه دستور العمل نحوه شبیه‌سازی، کالیبراسیون و اعتبارسنجی نرم‌افزار ایمسان. معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران.

-اله‌دادی، مهدي و شمعی، علی و ساسانی‌پور، فرزانه (۱۳۹۷). بررسی حمل و نقل عمومی و ارزیابی خطوط اتوبوس تندرو کلانشهر اصفهان مطابق با استاندارد BRT۲۰۱۶. *فصلنامه علمی پژوهشی مطالعات شهری* ۹(۳۳): ۱۴-۳.

-برگ‌گل، ایرج، قاصری، فرهاد و پورنصیر، محراب (۱۳۹۰). بررسی و مقایسه میزان سرفاصله زمانی تخلیه برحسب شماره باند برای سه زمان اوج صبح، ظهر و عصر در تقاطع‌های چراغ‌دار (مطالعه موردی: شهر رشت). یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک.

-جباری، فریبا و فلاح تفتی، مهدي (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترل چراغ راهنمایی زمان ثابت و تطبیقی مبتنی بر الگوریتم کرم شب تاب در تقاطع‌های منفرد. دومین کنفرانس ملی آخرین دستاوردهای مهندسی داده و دانش و محاسبات نرم.

-حاذقی، مانی و یزدی، مسعود و قجرزاده، سودابه (۱۳۹۴). ارائه مدلی جهت بومی‌سازی نرم‌افزار AIMSUN با توجه به شاخص‌های ترافیکی سیستم کنترل هوشمند

- Guidelines for Implementation. *Public Transp.*
- Hollander, Y., and Liu, R. (2008). The Principles of Calibrating Traffic Microsimulation Models. *Transportation*, 35, 347-362.
- Hu, J., Lian, Z., Sun, X., Eichberger, A., Zhang, Zh., and Lai, J. (2024). Dynamic Right-of-Way Allocation on Bus Priority Lanes Considering Traffic System Resilience. *Sustainability*, MDPI.
- Islam, T., Vu, H. L., Hoang, N., H. and Cricenti, A. (2018). A Linear Bus Rapid Transit with Transit Signal Priority Formulation. *Transportation Research Part E*.
- Kinjal, B., Maitra, B., and Boltze, M. (2019). Implementation of Bus Priority with Queue Jump Lane and Pre-Signal at Urban Intersections with Mixed Traffic Operations: Lessons Learned?. *Transportation Research Records*.
- Lin, Y., Yang, X. and Zou, N. (2017). Passive Transit Signal Priority for High Transit Demand: Model Formulation and Strategy Selection. *Transportation Letters*.
- Lin, Y., Zhang, N., and Dong, H. (2022). Capability of Intermittent Bus Lane Utilization for Regular Vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, Article ID 4799497.
- Liu, H., Zhang, Y., and Zhang, K. (2020). Evaluating Impacts of Intelligent Transit Priority on Intersection Energy and Emissions. *Transportation Research Part D*.
- Mathew, T., and Radhakrishnan, P. (2010). Calibration of Microsimulation Models for Nonlane-Based Heterogeneous Traffic at Signalized Intersections. *J. Urban Plan. Dev.*, Vol. 136, No. 1, 59–66.
- Model Formulation and Strategy Selection. *Transp Letters*.
- Qiu, F., Li, W., Zhang, J., Zhang, X., and Xie, Q. (2015). Exploring Suitable Traffic Conditions for Intermittent Bus Lanes. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 49, No. 3, 309–325.
- Song, Y., and Noyce, N. (2019). Effects of Transit Signal Priority on Traffic Safety: Interrupted Time Series Analysis of *Science Technology and Engineering*, Vol. 15, No. 031, 96–100.
- Changxi, M., and Daniel, X. (2020). Providing Spatial-Temporal Priority Control Strategy for BRT Lanes: A Simulation Approach. *J. Transp. Eng., Part A: Systems*.
- Chiabaut, N., and Barcet, A. (2019). Demonstration and Evaluation of an Intermittent Bus Lane Strategy. *Public Transport*.
- Ciuffo, B. F., and Punzo, V. (2010). Verification of Traffic Micro-simulation Model Calibration Procedures: Analysis of Goodness-of-Fit Measures. *Transp. Res. Board 89th Annu. Meet.*
- Dong, L., Xie, X., Feng, L., Zhang, L., and Li, H. (2023). Modelling Method on Dynamic Optimal Setting and Associated Control for Intermittent Bus Lane. *Hindawi, Journal of Advanced Transportation*.
- Dowling, R., Skabardonis, A., and Alexiadis, V. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. *Report No. FHWA-HRT-04-040*.
- Eichler, M. D. (2005). Bus Lanes with Intermittent Priority: Assessment and Design. University of California, *Berkeley*. CA United States.
- Eichler, M., and Daganzo, C. F. (2006). Bus lanes with intermittent priority: strategy formulae and an evaluation. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 40, No. 9, 731–744.
- Gonzalez, L. F. Ch. (2006). Discharge Headway at Signalized Intersections in Monterrey, Nuevo Leon, Mexico. University of Texas at Arlington.
- Guler, SI., and Menendez, M. (2014). Analytical Formulation and Empirical Evaluation of PreSignals for Bus Priority. *Transportation Research Part B*.
- Guler, SI., and Menendez, M. (2014). Analytical Formulation and Empirical Evaluation of Pre-Signals for Bus Priority. *Transportation Research Part B*.
- Guler, SI., and Menendez, M. (2015). Pre-Signals for Bus Priority: Basic

- Wu, W., Head, L., Yan, S., and Ma, W. (2017). Development and Evaluation of Bus Lanes with Intermittent and Dynamic Priority in Connected Vehicle Environment. *Journal of Intelligent Transportation Systems*.
- Yang, D., Wang, T., Gong, X., and Yan, H. (2024). Intermittent Bus Lane Control Method Based on Dynamic Clearance. *Eighth International Conference on Traffic Engineering and Transportation System*.
- Yue, Q., Linghan, Zh., Yuchuan, D., and Shengchuan, J. (2020). Performance Evaluation of Transit Signal Priorities on Bus Transit Corridor Based on Data Envelopment Analysis. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
- Zhang, Z., Yang, X., Liu, Y., and Song, Y. (2025). Network-Level Control of Intermittent Bus Lanes Using Multi-Agent Deep Reinforcement Learning with Multi-Feature State Prediction. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 22.
- Zhu, H.B. (2010). Numerical Study of Urban Traffic Flow with Dedicated Bus Lane and Intermittent Bus Lane. *Physica A*.
- Zyryanov, V., and Mironchuk, A. (2012). Simulation Study of Intermittent Bus Lane and Bus Signal Priority Strategy. *Procedia -Social and Behavioral Sciences* 48, 1464 – 1471.
- Portland, Oregon, Implementations. *Accident Analysis and Prevention*.
- Transportation and Demand Management. *FHWA Operations*. In: FHWA.
- Truong, L. T., Currie, G., and Sarvi, M. (2017). Analytical and Simulation Approaches to Understand Combined Effects of Transit Signal Priority and Road-Space Priority Measures. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 74, 275–294.
- Varaiya, P., and Kurzhanskiy, A. (2010). Active Traffic Management: *Approaches: Active*.
- Viegas, J. M., and Lu, B. (1997). Traffic Control System with Intermittent Bus Lanes. *IFAC Proceedings* Vol., 30, No. 8, 865–870.
- Viegas, J. M., and Lu, B. (2004). The Intermittent Bus Lane Signal Setting Within an Area. *Transportation Research Part C*, Vol. 12, 453–469.
- Wu, D., Deng, W., Song, Y., and Kong, D. (2016). Cellular Automaton Modeling of a Connected Vehicles-Based Bus Lane with Intermittent Priority. *ASCE*.
- Wu, D., X., Deng, W., Song, Y., Yang, H.T., and Kong, D.n. (2017). Sensitivity Analysis of Bus Lane with Intermittent Priority Based on Cellular Automato. *ASCE*.
- Wu, J., and Hounsell, N. (1998). Bus Priority Using Pre-Signals. *Transp Res Part a Policy Pract*.

Performance Evaluation of Intelligent Space -Time based Priority Strategies for Public Transportation Systems (Case Study: Isfahan)

Maryam Dehghani zadeh, PhD. Student in Highway and Transportation Eng., Civil Eng., Dep., Yazd University, Yazd, Iran.

Mehdi Fallah Tafti, Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Eng., Yazd University, Yazd, Iran.

Mehdi Rafati Fard, Assistant Professor, Transportation Planning Group, Faculty of Eng., Imam Khomeini Int. University, Qazvin, Iran.

E-mail: fallah.tafti@yazd.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

This study aims to compare two proposed strategies for prioritizing urban public transport buses in pursuit of enhancing the quality of public transportation systems while simultaneously minimizing the total delay experienced by users of the urban roadway network: the space-based priority strategy (intermittent bus lane priority) and the combined space–time priority strategy (intermittent bus lanes integrated with transit signal priority). To this end, a 5.5-km corridor consisting of seven signalized intersections in the city of Isfahan was simulated using the Aimsun Software. Three scenarios were modeled: the existing dedicated bus lane, the bus lane with space-based priority, and the bus lane with combined space–time priority. The simulations were conducted under two traffic volume and for different bus headways. The primary evaluation criterion was the total person delay along the entire corridor (person–hours). The results indicated that the optimal performance of each strategy depended on bus headways and traffic volumes. Under short headways (2 and 3 minutes), the space-based priority strategy outperformed the alternative, reducing person delay by 3.7% under unsaturated–saturated conditions and by 9–15.8% under saturated–oversaturated conditions. In contrast, at longer headways (6 and 10 minutes), the combined space–time priority strategy proved more effective, reducing total person delay by 6.8–7.1% and 20.5–27.1% across the aforementioned traffic. These findings indicate that both examined priority strategies can have a significant positive impact on overall traffic performance for private vehicles and public transportation under appropriate operational conditions, and can thus be effectively implemented.

Keywords: Public Transport Priority, Spatial (Space-based) Priority, Person Delay, Bus Lanes with Intermittent Priority, Microscopic Simulation Aimsun Next