تحلیل فنی پارامترهای موثر بر اولویت‌دهی به اتوبوس‌ها در تقاطعات با چراغ‌راهنمایی به جهت بهبود شرایط ترافیکی (مطالعه موردی: تقاطع پل آذر در شهر اصفهان)

مقاله علمی – پژوهشی

رضا شکوهی، گروه حمل و نقل، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*هومن رحیمی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، دانشگاه واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، شهر قدس، ایران
علی نادران، گروه حمل و نقل، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hoomanrahimi@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲– پذیرش:۱۴۰۵/۰۳/۰۲
صفحه ۴۳۰-۴۱۷

چکیده

با رشد شهرنشینی و افزایش ترافیک شهری، به‌ویژه در شرایط فوق‌اشباع، تأخیر سفر اتوبوس‌های شهری به‌عنوان شاخص کلیدی کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی افزایش یافته و جذابیت این سامانه کاهش می‌یابد. ضرورت این تحقیق به دلیل ناکارآمدی مدل‌های موجود در شرایط ازدحام شدید مطرح شده است؛ چراکه اغلب این مدل‌ها برای شرایط زیر اشباع تو سعه یافته‌اند. هدف پژوهش حاضر، ارائه و اعتبارسنجی مدلی نوین برای تخمین زمان سفر اتوبوس در تقاطع‌های چراغ‌دار با کنترل عمل‌کننده هست که بر اساس مکان‌یابی بهینه دیتکتورها و زمان توقف اتوبوس طراحی شده است. در این مطالعه، داده‌های میدانی از دو تقاطع پرترافیک در اصفهان جمع‌آوری و با نرم‌افزار شبیه‌سازی ایمسان و خروجی سامانه، سناریوهای مختلف مکان دیتکتور و مقادیر زمان توقف شبیه‌سازی شد. ابتدا مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی اولیه استفاده شد و سپس الگوریتم برنامه‌نویسی بیانی ژنتیک به‌منظور بهینه سازی دقت پیش‌بینی به‌کار رفت. نتایج نشان داد ترکیب بهینه فاصله دیتکتورها از خط توقف و زمان توقف مناسب با مدل، دقت بالایی (R^2= ۰/۹۹) در تخمین زمان سفر اتوبوس ارائه می‌دهد. همچنین، افزایش بیش از حد این پارامترها پس از نقطه آستانه، کارایی را کاهش می‌دهد. به طور کلی، راهبرد کنترل سیگنال پویا همراه با تنظیمات بهینه، تأخیر اتوبوس‌ها را در تقاطع‌های پرترافیک کاهش داده و قابلیت اطمینان سیستم حمل‌ونقل عمومی را ارتقا می‌دهد به صورتیکه با اعمال استراتژی های اولویت‌دهی به همراه تنظیم مکان بهینه دیتکتور و تمدید زمان سبز، تاخیر اتوبوس‌ها تا ۳۵ درصد و تاخیر کلی ۳٤ درصد کاهش پیدا کردند. همچنین به عنوان یک راه حل، این مدل به برنامه‌ریزان شهری برای طراحی اولویت‌دهی به اتوبوس‌ها توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ایمسان، اولویت دهی، دیتکتور، زمان توقف

۱-مقدمه

سیاست‌های کلان یک کشور همواره مبین رویکرد بلندمدت و چشم‌انداز برنامه‌ریزان و کاربران برای نیل به اهداف خاص در یک موضوع ویژه است. موضوع حمل‌ونقل از جمله موضوعاتی هست که با توجه به ارتباط با زیرساخت‌های کلان اقتصادی و اجتماعی کشور و اثرگذاری متقابل بین آن‌ها همواره جزء لاینفک برنامه‌های کلان و راهبردی کشور بوده است. در اغلب شهرهای بزرگ دنیا به ویژه جوامع در حال توسعه، ترافیک و تراکم معابر و معضلات ناشی از آن ازجمله مشکلاتی هستند که

بایستی برای آن‌ها راه حل های منا سبی پیشنهاد شود. در این میان، برنامه ریزی حمل‌ونقل و مهندسی ترافیک، تنها راه پیش روی مدیریت حمل‌ونقل شهری است که می تواند ضمن اثر پذیری از سایر ابعاد مدیریت شهری نظیر معماری، شهر سازی، محیط زیست، به ایجاد الگوی متوازن سکونت و فعالیت در شهرها کمک نماید. بدین منظور، تدوین برنامه‌های جامع مدیریت شهر در افق‌های کوتاه مدت و بلندمدت، منطبق بر اهداف و آرمان‌های مناسب شهر، تنها راه برای اتخاذ و اجرای تصمیمات موثر در زمینه‌ی حمل‌ونقل و ترافیک است. انجام تحقیقات و مطالعات، بررسی راهکارها و طرح های پیشنهادی جهت ایجاد ساختارها و بسترهای مورد نیاز، پیش بینی و برنامه ریزی با فرایندهای علمی و تخصصی، کشف علت ها و معلول ها با هدف جلوگیری از ایجاد مشکلات، محاسبه، ارزیابی و اینده نگری وضعیت عبور و مرور در سطح شبکه معابر شهری با نگاه جامع و کلان در تمامی بخش‌های مرتبط از جمله فعالیت‌های مدیریت حمل‌ونقل شهری هست. در چنین شرایطی، و به خصوص با توجه به محدودیت شدید منابع، بسیاری از متخصصان، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران دریافته‌اند که راه حل بهبود کیفیت حمل‌ونقل، استفاده بهینه از تسهیلات موجود و مدیریت تقاضای حمل‌ونقل است. در مدیریت تقاضای حمل و نقل، با هدف ایجاد یک تعادل منطقی بین تقاضا و عرضه موجود، در عین حالی که گزینه‌های حمل و نقلی مختلفی برای انجام سفرهای شهری در دسترس است، برای کمینه سازی تعداد سفر با خودروهای شخصی از طریق افزایش تعداد سرنشینان و سایل نقلیه، تغییر نوع و سیله سفر، تغییر زمان وقوع سفر و یا به طور کلی، نیاز به سفر (ضرورت انجام سفر)، برنامه هایی طراحی میشوند. این اقدامات میتوانند باعث کاهش ازدحام ترافیک، افزایش کارایی زیرساخت‌های حمل‌ونقلی موجود و بهبود کیفیت هوا شود. روش های افزایش مطلوبیت حمل‌ونقل همگانی و حمل‌ونقل غیرموتوری (دوچرخه سواری و پیاده‌روی) از جمله مهمترین روش‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل برای جایگزینی و سایل تک سرنشین است. همچنین، این روشها مطابق با سیاست توسعه مبتنی بر حمل ونقل همگانی هستند. مسأله مهم و در واقع چالش اساسی این تحقیق، تنظیم زمانبندی چراغ‌های راهنمایی برای عبور روان‌تر و سایل نقلیه همگانی با استفاده از نتایج خروجی نرم‌افزار شبیه ساز ایمسان می‌باشد. در واقع در این تحقیق ابتدا شبیه‌سازی یک تقاطع در شهر اصفهان در نرم‌افزار شبیه ساز ایمسان انجام شده و پس از آن بهینه سازی متغیرهای موثر بر اولویت‌دهی به وسایل حمل‌ونقل همگانی، با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند بردار پشتیبانی ماشینی، درخت تصمیم و جنگل تصادفی انجام شده است. عوامل موثر بر استراتژی‌های اولویت‌دهی به حمل‌ونقل همگانی در این تحقیق به صورت **شکل شبکه**: تعداد خطوط عبور، حضور یا عدم حضور عابرین پیاده، تعداد تقاطع‌های چراغ‌دار، موقعیت قرارگیری ایستگاه‌ها و وجود خطوط ویژه اتوبوس، **وضعیت ترافیک**: درجه اشباع جهت مخالف، حجم وسایل نقلیه همگانی جهت مخالف، حجم وسایل نقلیه شخصی و حجم جریان گردش به چپ و ویژگی‌های سیستم حمل‌ونقل همگانی: تعداد اتوبوس‌ها، نحوه توزیع رسیدن اتوبوس‌ها، زمان توقف اتوبوس‌ها، جانمایی ایستگاه ها، جانمایی آشکارسازهای اتوبوس و تاخیر اتوبوس‌ها. همچنین در این تحقیق از روش و الگوریتم یادگیری ماشین به نام جنگل تصادفی برای بهینه سازی روش های اولویت‌دهی به وسایل نقلیه همگانی در محل تقاطع های چراغدار استفاده شده است. در الگوریتم‌های یادگیری ماشین، الگوریتم جنگل تصادفی شامل مدل های سرپرستی شده به همراه الگوریتم‌های یادگیری هستند که داده‌ها را برای طبقه بندی و تحلیل رگرسیونی مورد تحلیل قرار می‌دهند. بهینه‌سازی روش های اولویت‌دهی به وسایل نقلیه همگانی در محل تقاطع ها به دلایلی از جمله زمان سفر در قطعات و زمان توقف در ایستگاه‌ها ماهیت تصادفی دارد. برای فایق آمدن بر این مشکل با استفاده از فناوری یادگیری ماشین مطالعه را انجام می‌دهیم. همچنین به وسیله مشخص کردن پارامترهای بهینه، مدل جنگل تصادفی به همگرایی می‌رسد. معمولا مدل‌های جنگل تصادفی توانایی خوبی در پیش بینی با یک حاشیه خطای قابل صرف نظر کردن دارند.

استراتژی‌های اولویت‌دهی به وسایل نقلیه همگانی شامل زمان سبز زودرس، تمدید زمان سبز، تقطیع زمان قرمز، اولویت‌دهی به وسایل نقلیه همگانی با خط ویژه و اولویت‌دهی به وسایل نقلیه همگانی بدون خط ویژه هستند.

زمان سبز زودرس: تعبیه یک فاز سبز در میان فازها برای عبور وسیله حمل‌ونقل همگانی، **تمدید زمان سبز**[3]: ادامه زمان سبز پس از پایان فاز سبز برای رسیدن وسیله حمل‌ونقل همگانی به تقاطع و عبور از آن و **تقطیع زمان قرمز**[4]: شروع زمان سبز قبل از پایان فاز قرمز در رویکرد وسایل حمل‌ونقل همگانی برای تخلیه تقاطع و عبور وسیله حمل‌ونقل همگانی. در این پژوهش، نوآوری اصلی در توسعه و اعتبارسنجی مدلی نوین برای تخمین زمان سفر اتوبوس در شرایط فوق‌اشباع (□/□≥۱) و در تقاطع‌های چراغ‌دار با کنترل عمل‌کننده نهفته است. برخلاف اغلب مدل‌های پیشین که برای شرایط زیراشباع طراحی شده‌اند و در مواجهه با ازدحام شدید کارایی خود را از دست می‌دهند، مدل ارائه شده در این تحقیق با لحاظ مکان‌یابی بهینه دیتکتورها و زمان توقف اتوبوس و بهره‌گیری از الگوریتم برنامه‌نویسی بیانی ژنتیک، دقت پیش‌بینی بسیار بالایی (R^2=۰/۹۹) را در شرایط پرترافیک شهری ارائه می‌دهد. این رویکرد، برای نخستین‌بار در کشور و با داده‌های واقعی شهر اصفهان پیاده‌سازی شده و می‌تواند به‌عنوان الگویی بومی برای سایر شهرهای پرترافیک ایران و منطقه مطرح شود.

۲-پیشینه تحقیق

هد در سال ۲۰۰۶ مدلی را بر اساس ساختار مرسوم چراغ راهنمایی ر آمریکای شمالی ساختند و با استفاده از مدل مشخص شد که سیاست خدمت دهی اول به اولین خودرو تقا ضا کننده اولویت باعث تاخیر زیادی در محل چراغ می شود و بهتر ا ست که تقا ضا از چندین و سیله نقلیه همگانی در محل تقاطع با هم پردازش شوند (هد و همکاران، ۲۰۰۶).

لی و همکاران در سال ۲۰۱۰ توسعه و کاربرد اولویت‌دهی به و سایل نقلیه همگانی در محل تقاطع با دو رینگ از مجموعه فازها بررسی کردند. نتایج نشان می دهد که در یک تقاطع با ترافیک بالا تاخیر وسایل نقلیه همگانی و ترافیک هم جهت با آن به ترتیب ۴۳ و ۱۶ درصد کاهش یافته حال اینکه تاخیر جهت مخالف ۱۲ درصد افزایش یافته است (لی و همکاران، ۲۰۱۰). کریستوفا و اسکاباردونیس در سال ۲۰۱۱ سیستمی را برای اولویت‌دهی پیشنهاد کردند که ضمن اینکه تاخیر هر کاربر اعم از شخصی و همگانی را حداقل می‌کرد، به وسایل نقلیه همگانی هم بر پایه ضریب اشغال آن‌ها اولویت می داد. نتایج نشان می داد که تاخیر و سایل نقلیه همگانی همچنین کل تاخیر کاربران کاهش یافته است(کریستوفا و اسکاباردونیس، ۲۰۱۱). در سال ۲۰۱۲ تو و سانو مقایسه‌ای را در خصوص استراتژی های اولویت‌دهی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دادن اولویت بسیار بالا به اتوبوس مانند اولویت‌دهی در خط انحصاری می‌تواند تاخیر را تا ۱۰۰ درصد بهبود بخشد. در نقطه مقابل اولویت‌دهی بسیار بالا می‌تواند باعث افزایش تاخیر سایر وسایل نقلیه تا ۹۴ درصد شود که اصولا قابل قبول نیست (تو، سانو و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین در یک مطالعه مدلی را پیشنهاد شده که تقاضای چند وسیله نقلیه همگانی را برای یکی از استراتژی های اولویت‌دهی با در نظر گرفتن حداقل زمان سبز، در نظر می گرفت. نتایج نشان می‌داد که مدل اولویت‌دهی پویا بر مدل اولویت‌دهی به اولین درخواست به ترتیب برتری دارد (ما و همکاران، ۲۰۱۴). در مطالعه‌ای نیز، یک مدل غیرخطی به منظور بهینه کردن انحراف ها از فازبندی مرحله قبلی که مداوم به روزرسانی می شد ابداع کردند. نتایج نشان می داد که تاخیر تا ۳۰ درصد برای اتوبوس کاهش یافته و در حالتی که چند اتوبوس اولویت‌دهی به صورت همزمان می شوند این کاهش تاخیر قابل ملاحظه تر است (زنگ و همکاران، ۲۰۱۴). در سال ۲۰۱۷ روش کنترل اولویت‌دهی فعال را در چراغ ها برای خطوط انحصاری اتوبوس سریع السیر ابداع شد. ۸ سناریوی اولویت‌دهی برای ۸ مود اتوبوس سریع السیر بررسی شدند. نتایج نشان می دهد که تاخیر کاربران ۱۳ تا ۲۵ درصد کاهش و سرعت اتوبوس‌های سریع السیر ۷ تا ۷/۵ درصد افزایش یافته است (ژو و همکاران، ۲۰۱۷). در یک مطالعه دیگر یک تقاطع چراغدار به صورت کامل اتوماسیون برای اولویت‌دهی به سیستم اتوبوس سریع‌السیر انجام شد و مشاهده گردید که تاخیر به ازای هر کاربر به صورت کلی ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است (کبلاوی و تامر، ۲۰۲۴).

در مطالعه دیگری به اتوبوس‌ها بر اساس ضریب اشغال آن‌ها(تعداد مسافر) و تاخیرشان، بر اساس یک سیستم سلسله مراتبی ۲۵ سطحی در محل تقاطع‌های چراغدار، اولویت‌دهی انجام شد. نتایج نشان می‌داد که زمان سفر این اتوبوس‌ها تا ۸۷

درصد بهبود و کاهش پیدا کرده است (کاتیا جولیان اشمیت، ناتالی اشتینمتز و مارتین مارگریتر، ۲۰۲٤). همچنین در یک تحقیق در کشور چین، به اتوبوس‌ها علی الخصوص در حرکت های گردش به چپ، اولویت‌دهی بر ا ساس یک سی ستم پیش تنظیم چراغ داده می شد. نتایج نشان دادند که برای اتوبوس‌های گردش به چپ تاخیر به میزان چشمگیری کاهش یافته و برای حرکت‌های مستقیم هم تاخیر تا حدودی بهبود یافته است (یتونگ سان و همکاران، ۲۰۲۱). در ادامه و در تحقیقی دیگر در کشور کره جنوبی، با طراحی یک مرکز اولویت‌دهی به اتوبوس‌ها با در نظر گرفتن شرایط وسایل نقلیه دیگر انجام شد و انحراف اتوبوس‌ها از زمان بندی ۵۲ تا ۵۷ در صد کاهش یافت (کیم و هان، ۲۰۲۲).

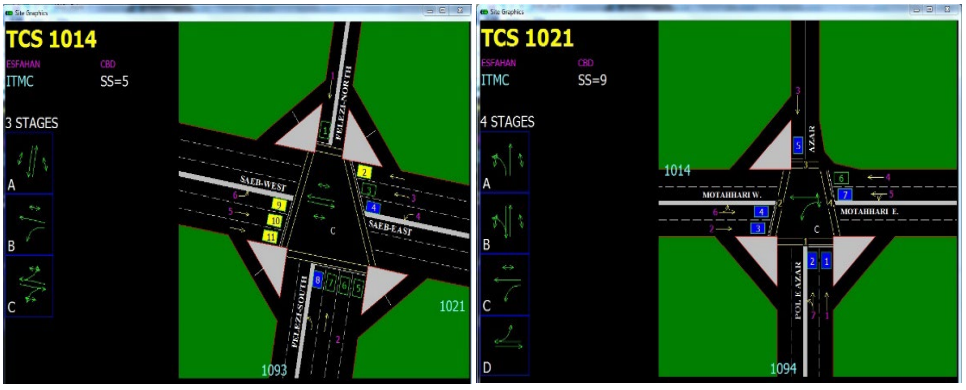
جدول ۱. خلاصه پیشینه تحقیق

ردیف	نام نویسنده	نام مقاله/ کتاب	تاریخ انتشار	خلاصه تحقیق
۱	کاتیا، جولیان، اشمیت و همکاران	روش اولویت‌بندی اتوبوس برای تقاطع‌های چراغ‌دار بر اساس ضریب اشغال اتوبوس و تأخیر	۲۰۲٤	این مطالعه یک استراتژی ارجحیت‌دهی به اتوبوس‌ها در تقاطع‌های چراغ‌دار پیشنهاد می‌دهد تا قابلیت اطمینان و جذابیت حمل‌ونقل عمومی افزایش یابد. نتایج نشان می‌دهد که مفهوم ارجحیت‌دهی توسعه یافته مؤثر است و اتوبوس‌های دارای اولویت از کاهش چشمگیر در زمان سفرشان (تا ٪۸۷) و تعداد توقف‌ها بهره‌مند می‌شوند. اتوبوس‌های دارای سطح اولویت پایین‌تر ممکن است با افزایش زمان سفر خود (تا ٪۱۲٦) مواجه شوند.
۲	یوتونگ، سان و همکاران	طراحی همزمان اولویت اتوبوس بر اساس سیستم پیش تنظیم چراغ راهنمایی	۲۰۲۱	مدل طراحی روی ورودی یک تقاطع اعمال می‌شود تا فرآیند ورود و خروج خودروها در سیگنال اصلی و پیش‌سیگنال مطالعه شود، با این سیستم، کل تأخیر تجربه شده توسط خودروهای حرکت مستقیم به یک چرخه کاهش پیدا می‌کند.
۳	کریستوفا و اسکاباردونیس	بهینه‌سازی چراغ راهنمایی با کاربرد اولویت سیگنال حمل‌ونقلدر یک تقاطع جدا شده	۲۰۱۱	این تحقیق یک سیستم کنترل سیگنال واقعی و واکنش‌گرا به ترافیک ارائه می‌دهد که برای اولویت‌دهی سیگنال‌ها در مسیرهای متناقض حمل‌ونقل عمومی طراحی شده و همچنین تأثیرات منفی بر ترافیک خودروها را به حداقل می‌رساند. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی باعث کاهش قابل توجهی در تأخیر کاربران حمل‌ونقل عمومی و مجموع تأخیر افراد در تقاطع شد.
٤	کیم و همکاران	اولویت روشنایی چراغ‌های راهنمایی هماهنگ‌شده و هدایت وسایل نقلیه برای اتوبوس‌های خودکار	۲۰۲٤	این مطالعه یک کنترل تعاونی مبتنی بر مرکز بین اولویت سیگنال حمل‌ونقلو هدایت وسیله نقلیه پیشنهاد می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که انحرافات زمان‌بندی مسیر اتوبوس نسبت به اولویت فعال و هدایت سرعت با اولویت فعال به طور قابل توجهی بین ۵۱٫۸ تا ٪۵۷٫۳ بهبود یافته‌اند.

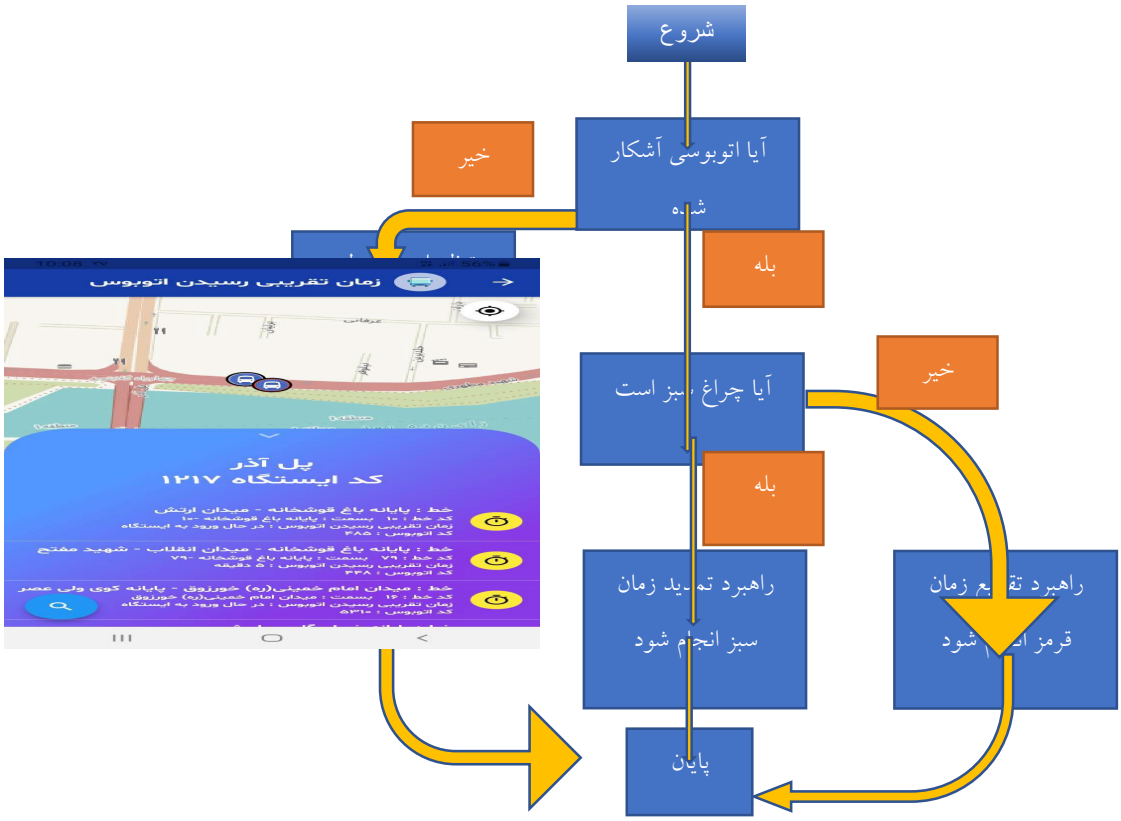
ردیف	نام نویسنده	نام مقاله/ کتاب	تاریخ انتشار	خلاصه تحقیق
۵	وای دونگ	کنترل اولویت سیگنال حمل‌ونقلانطباقی برای ایمنی و بهینه‌سازی کارایی ترافیک: چارچوب یادگیری تقویتی عمیق چندهدفه	۲۰۲٤	این مطالعه یک چارچوب کنترل اولویت سیگنال تردد تطبیقی مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق چندهدفه (DRL) معرفی می‌کند که به منظور بهبود ایمنی و کارایی در محیط‌های ترافیکی با خودروسواری ترکیبی طراحی شده است. نتایج نشان دادند که نسبت وزن ۵:۵ برای ایمنی و کارایی بهترین تعادل را ایجاد کرد و تاخیرها و برخوردها را برای همه نوع وسایل نقلیه به حداقل رساند.
٦	چنگ	یادگیری تقویتی برای اولویت‌بندی سیگنال حمل‌ونقل با عامل اولویت	۲۰۲٤	نتایج شبیه‌سازی نشان داد که □□□ پیشنهادی همراه با PF نه تنها زمان‌های سفر اتوبوس را کاهش می‌دهد و تعارض بین درخواست‌های اولویت را حل می‌کند، بلکه تأثیر منفی قابل توجهی بر عملکرد خودروهای سواری ندارد.
۷	یانگ	کنترل اولویت سیگنال عبوری با فناوری خودروهای متصل: رویکرد یادگیری تقویتی عمیق	۲۰۲٤	این مطالعه هدف دارد یک کنترل‌کننده تطبیقی TSP قوی در محیط CV پیشنهاد دهد تا اولویت وسایل نقلیه حمل‌ونقلرا تضمین کند و در عین حال تأثیر منفی بر ترافیک عادی را به حداقل برساند.

۳- روش تحقیق

در این تحقیق از یک الگوریتم اولو یت‌دهی پو یا به منظور فراهم کردن بهترین راهبرد اولو یت‌دهی در مـحل تـقاطع های چراغدار پل آذر و پل فلزی در شـــهر اصـــفهان (شـــکل ۱)، برای وسایل نقلیه همگانی استفاده شده است. الگوریتم یاد شده از یک آشکارساز برای مشخص نمودن زمان رسیدن اتوبوس به تقاطع چراغدار، بهره می‌گیرد. به منظور مقایســـه با شـــرایط معمولی، دو الگوریتم اولویت‌دهی متغیر و کلاســـیک (ایســـتا) طراحی و مـطالعه شـــدند (شـــکل ۲). برای انـجام این امر الگوریتم‌ها در مدول فعال شـــده به وســـیله اتوبوس در نرم‌افزار شبیه‌ساز خرد نگر ایمسان برنامه ریزی شدند.



شکل ۱. تقاطع پل آذر و پل فلزی در نرم‌افزار اسکتس

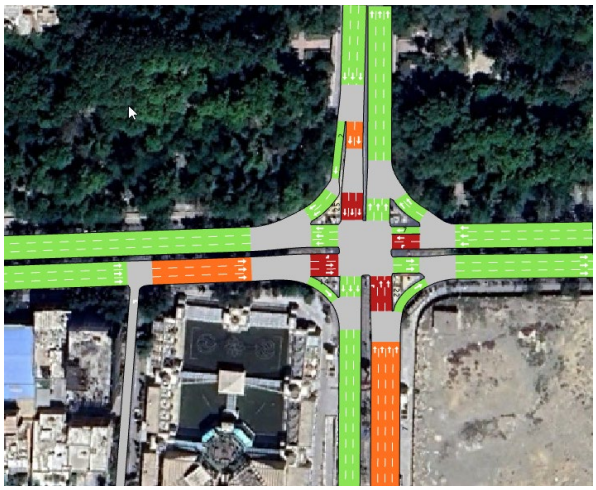


شکل ۲. فلوچارت الگوریتم اولویت‌دهی به اتوبوس

همچنین پس از جمع آوری داده های میدانی مربوط به حجم و زمان اعزام و رسیدن اتوبوس‌ها به تقاطع و اخذ اطلاعات زمان بندی و فازبندی چراغ راهنمایی در یک تقاطع چراغدار و ایستگاه اتوبوس قرار گرفته در قبل از آن در شهر اصفهان، از معاونت ترافیک و حمل‌ونقل شهرداری و مرکز کنترل ترافیک، شبیه‌سازی در سه مرحله در نرم‌افزار ایمسان (Aimsun. Next 22) صورت گرفته و در هر مرحله داده‌های خروجی شبیه‌سازی برای مقایسه نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرند. سه حالت شبیه‌سازی عبارت هستند از: شبیه‌سازی با فرض زمان بندی و فازبندی ثابت و از پیش تعیین شده در محل تقاطع چراغ دار، شبیه‌سازی با فرض زمان بندی و فازبندی فراخوان شده با اولویت‌دهی به اتوبوس و شبیه سازی با فرض زمان بندی و فازبندی فراخوان شده، با اعمال الگوریتم‌های اولویت‌دهی از پیش تعریف شده به اتوبوس در نرم‌افزار و تعریف سناریوهای متفاوت و انجام تحلیل حساسیت برای متغیر های مورد سنجش در هر سناریو از قبیل تغییر محل آشکارساز، حداقل زمان سبز برای اولویت دهی، محل ایستگاه و دیگر متغیرهای مشخص. پس از انجام مراحل سه گانه شبیه‌سازی در نرم‌افزار، بهترین مقادیر برای متغیرهایی نظیر محل آشکارساز اتوبوس(دیتکتور) و حداقل زمان سبز برای اولویت‌دهی به اتوبوس ها با فرض زمان بندی و فازبندی فراخوان شده به دست می‌آید.

در این تحقیق، هند سه مدل عبارت هست از ۲ تقاطع چراغدار در شهر اصفهان به نام چهار راه قلم زنی(پل فلزی) و چهار راه گلابتون (پل آذر) (شکل ۳، ٤ و ٥) و ایستگاه اتوبوس پل فلزی ما بین آن‌ها. فاصله بین خطوط توقف پشت چراغ راهنمایی در دو تقاطع ذکر شده ۵۵۰ متر، فاصله ایستگاه اتوبوس از خط توقف تقاطع قلم زنی(پل فلزی) ۳۵ متر و مسیر دارای سه خط عبور به عرض هر کدام ۲/۵ متر می باشد. با توجه به داده‌های معاونت ترافیک شهرداری اصفهان، سر فاصله زمانی اعزام اتوبوس‌ها ۱۵ دقیقه و مدت زمان توقف آن‌ها در ایستگاه مورد نظر به صورت متوسط ۲۰ ثانیه هست. داده‌های مربوط به حجم و زمان اعزام و رسیدن اتوبوس‌ها از نرم‌افزار اسکتس که مورد استفاده توسط معاونت حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری اصفهان است استخراج شده و با استفاده از اپلیکیشن (اص رو) اطلاعات مربوط به خطوط اتوبوسرانی و زمان رسیدن و سایر اطلاعات مربوط به اعزام و سرویس دهی اتوبوس‌های همگانی به دست می آید. خطوط اتوبوسرانی فعال در بین دو تقاطع

پایانه خورا سگان – پل شیری، میدان امام خمینی(ره) خورزوق – پایانه کوی ولی عصر و پایانه باغ قوشخانه – میدان ارتش می‌باشند. حجم ترافیک به دست آمده در تاریخ ۱۵ و ۱۶ آبان ۱۴۰۱(۶ و ۷ نوامبر ۲۰۲۲) از نرم‌افزار ا سکتس مورد برر سی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مشخص شد که ساعات اوج ترافیک صبح از ساعت ۷:۰۰ الی ۱۰:۰۰ و ظهر از ساعت ۱۱:۰۰ الی ۱۵:۰۰ و سپس مجددا از ساعت ۱۶:۰۰ الی ۲۰:۰۰ اوج ترافیک در مسیر یاد شده می‌باشد. داده‌های مربوط به حجم هر رویکرد در تقاطع چراغدار گلابتون (پل آذر) مربوط به تاریخ ۱۵ آبان ۱۴۰۱ (۵ نوامبر ۲۰۲۲) در جدول نمایش داده شده است. اشکال زیر مربوط به نمایش رویکردها در تقاطع چراغدار هست.



شکل ۳. تقاطع پل فلزی و پل آذر در گوگل ارث

شکل ٤. تقاطع پل فلزی در اپلیکیشن اص رو

٤-یافته‌ها

با داشتن هندسه، حجم تقاطع و اطلاعات چراغ راهنمایی، شبیه‌سازی تقاطع پل آذر در نرم‌افزار Aimsun. Next 22 صورت پذیرفت. شبیه‌سازی در ۳ مرحله انجام شد. **حالت اول** و ضعیت موجود بر ا ساس زمانبندی و فازبندی ثابت و از پیش تعریف شده، با استفاده از داده های مرحله قبل، **حالت دوم** با در نظر گرفتن تنظیمات چراغ فراخوان شده و زمان بندی و فازبندی متغیر و **حالت سوم** با تنظیمات چراغ راهنمایی به صورت زمان بندی و فازبندی فراخوان شده و در نظر گرفتن ۱۲ ترکیب از متغیرهای محل قرارگیری آشکارساز اتوبوس و حداقل زمان سبز تخصیص داده شده برای اولویت‌دهی.

نتایج خروجی شبیه سازی و ضع موجود به صورت شکل ٦ و نمودارهای شکل ۸ الی ۱۱ به دست آمده است. در حالت اول، متوسط تاخیر برای وسایل نقلیه شخصی ۱۱۰ ثانیه، برای

اتوبوس ۸۶ ثانیه و برای کل وسایل حمل و نقل (شخصی و اتوبوس) ۱۱۵ ثانیه به دست آمده است. در مرحله دوم شبیه سازی که اولویت‌دهی به وسایل نقلیه همگانی (اتوبوس) اعمال شده است، تاخیر وسایل نقلیه شخصی ۷۲ ثانیه، تاخیر اتوبوس ۵۵ ثانیه و تاخیر کلی(شخصی و اتوبوس) ۷۶ ثانیه به دست آمده است. در واقع با اعمال استراتژی‌های اولویت‌دهی تاخیر وسایل نقلیه شخصی تقریبا ۳۵ درصد، تاخیر وسایل حمل‌ونقل همگانی (اتوبوس) ۳۵ درصد و تاخیر کلی ۳۴ درصد کاهش پیدا کرده است.

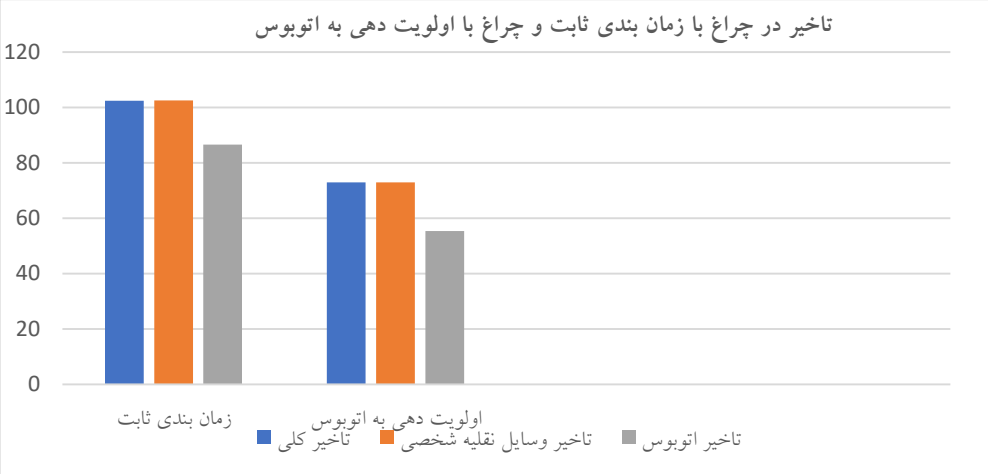
در حالت سوم شبیه‌سازی، در حقیقت نوعی تحلیل حساسیت بر روی یک سری از پارامتر ها مانند فاصله آشکارساز اتوبوس از محل خط توقف تقاطع و همچنین مدت زمان تمدید زمان سبز صورت گرفت. با در نظر گرفتن فاصله آشکار ساز از خط توقف در سه حالت ۵۰، ۶۸ و ۸۰ متر و حداقل زمان سبز تمدید شده برای اولویت‌دهی ۱۰، ۱۵، ۱۸ و ۲۲ ثانیه (۱۲ حالت ترکیبی)، مقادیر خروجی های مختلف مانند تاخیر اتوبوس، جریان، زمان سفر، زمان سفر کل و سرعت از شبیه‌سازی به دست آمد. نتایج نشان می دهند که به ازای فاصله ۸۰ متر و ۵۰ متر برای آشکار ساز و تمدید زمان سبز به میزان ۱۸ ثانیه، کمترین زمان سفر برای اتوبوس را خواهیم داشت. همچنین از منظر آماری، حجم مشاهده شده در این مطالعه برابر ۳۲۰۲ و حجم عبوری از شبکه در شبیه‌سازی ۳۱۵۹ می‌باشد. خروجی‌های شبیه‌سازی نشان دادکه مقدار میانگین تاخیر در وضع موجود ۷۲ ثانیه و انحراف معیار آن ۴،۴۷ برای تعداد اولیه ۱۰ تکرار بود و از این رو، تعداد تکرار بهینه عدد ۲ بدست آمد. برای محاسبه سطح خدمت بر اساس آیین نامه HCM از جدول ۱ استفاده می شود. مطابق با جدول پارامتر تاخیر بایستی بر اساس ثانیه استفاده شود، بنابراین ابتدا طول شبکه حساب شده و سپس میزان تاخیر بر اساس ثانیه بدست می‌آید. همچنین با توجه به طول شبکه که مقدار ۱۲۶۷/۵ متر را دارد نتایج بدست آمده مقدار تاخیر در وضع موجود را عدد ۱۲۹/۸ ثانیه بر هروسیله و برای زمانبندی متعیر مقدار ۹۲/۴را نشان می‌دهد. با توجه به جدول هردو در سطح خدمت F قرار دارند، اما وضعیت بهینه چراغ نشان از کاهش ۳۵ درصدی زمان تاخیر کلی را دارد.

شکل ۵. تقاطع پل فلزی در اپلیکیشن اص رو

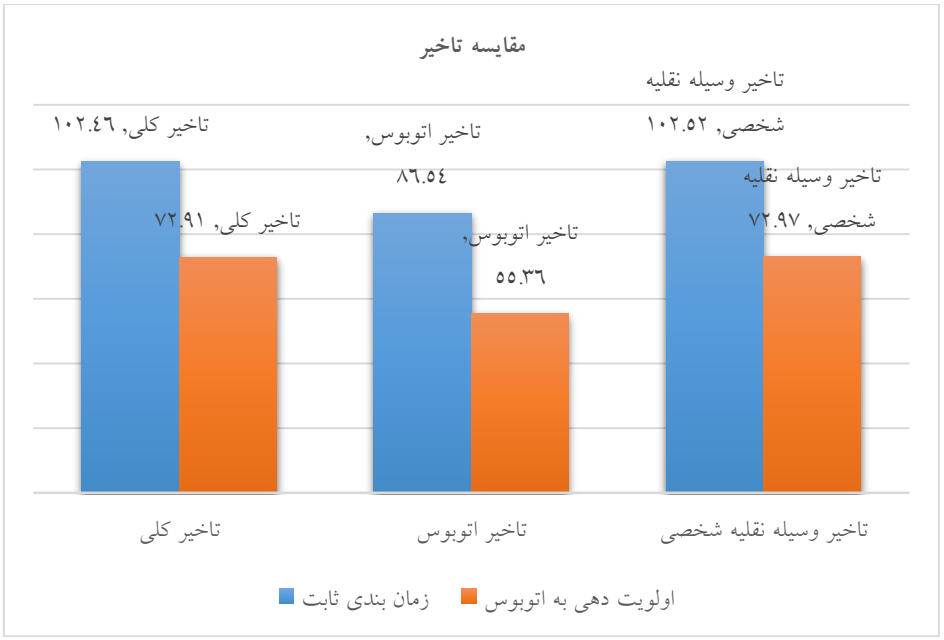
شکل ٦. خروجی شبیه سازی در نرم‌افزار ایمسان

جدول ۲. تشخیص سطح سرویس تقاطع پل آذر

میزان تاخیر ثانیه بر وسیله نقلیه	سطح سرویس در نسبت حجم به ظرفیت	
	نسبت حجم به ظرفیت کوچک تر از ۱	نسبت حجم به ظرفیت بزرگ تر از ۱
۰-۱۰	A	F
>۱۰-۲۰	B	F
>۲۰-۳۵	C	F
>۳۵-۵۵	D	F
>۵۵-۸۰	E	F
>۸۰	F	F



شکل۷. نمودار تاخیر در دو حالت زمان بندی ثابت و اولویت‌دهی به اتوبوس



شکل ۸. مقایسه تاخیر در دو حالت زمان بندی ثابت و اولویت‌دهی به اتوبوس

جدول۳. مقایسه تاثیر پارامتر های موثر بر اولویت‌دهی بر زمان سفر اتوبوس

زمان انتظار در صف(ثانیه)	زمان سفر اتوبوس (ثانیه بر کیلومتر)	کل زمان سفر اتوبوس(ساعت)	سرعت(کیلومتر بر ساعت)	جریان (اتوبوس بر ساعت)	تاخیر اتوبوس (ثانیه بر کیلومتر)	فاصله دیتکتور و زمان توقف		
۰/۱۷	۳۱۰/۷۴	۰/۵۱	۱۳/۹۳	۱۰/۸	۲۰۰/۷۲	۱۰	حداقل زمان سبز تمدید شده برای اولویت دهی(ثانیه)	۶۸
۰/۰۳	۱۶۶/۵۸	۰/۳	۲۳/۴	۱۱/۲	۶۰/۱۳	۱۵		
۰/۱۱	۱۵۷/۱	۰/۳۳	۲۴/۸	۱۲/۸	۵۴/۹۸	۱۸		
۰/۰۷	۱۵۴/۶۲	۰/۳	۲۵/۵۹	۱۲/۱	۵۱/۲۳	۲۲		
۰/۰۹	۳۴۱/۲۷	۰/۵۷	۱۳/۵۶	۱۰/۳	۲۳۲/۶۴	۱۰		۵۰
۰/۰۸	۱۶۱/۰۲	۰/۲۹	۲۴/۹۳	۱۱/۲	۵۴/۲۹	۱۵		
۰/۰۹	۱۵۰/۱۲	۰/۳۱	۲۵/۴۲	۱۲/۷	۴۸/۴۴	۱۸		
۰/۱۳	۱۵۴/۹۵	۰/۳۱	۲۶/۴۸	۱۲/۳	۵۲/۰۳	۲۲		
۰/۰۴	۲۵۶/۴۷	۰/۵	۱۶/۷	۱۱/۹	۱۵۱/۹۶	۱۰		۸۰
۰/۱۴	۱۵۴/۷۸	۰/۲۹	۲۵/۲۹	۱۱/۶	۵۰/۱۷	۱۵		
۰/۰۳	۱۴۹/۴۴	۰/۲۸	۲۵/۸۱	۱۱/۷	۴۴/۲۶	۱۸		
۰/۱	۱۵۴/۵۷	۰/۲۹	۲۵/۱۷	۱۱/۴	۴۸/۵۴	۲۲		

محل قرار گیری دتکتور آشکارساز اتوبوس نسبت به خط توقف

۴-۱- تحلیل حساسیت پارامترها

به‌منظور افزایش شفافیت و کاربرد پذیری نتایج، تحلیل حساسیت مدل نسبت به دو پارامتر کلیدی، یعنی فاصله دیتکتورها از خط توقف و زمان توقف اتوبوس، انجام شد. نتایج این تحلیل نشان داد که تا رسیدن به مقدار بهینه هر پارامتر، دقت مدل بهبود می‌یابد، اما افزایش بیش از حد هر یک از این متغیرها پس از نقطه آستانه، موجب کاهش کارایی مدل می‌شود. این یافته‌ها به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا در طراحی و نصب تجهیزات، محدوده بهینه هر پارامتر را رعایت کرده و از اتلاف منابع و کاهش اثربخشی جلوگیری کنند. ارائه نمودار یا جدول تغییرات دقت مدل بر اساس این پارامترها، به درک بهتر تأثیر هر متغیر کمک خواهد کرد.یک جدول نمونه برای **تحلیل حساسیت پارامترها** (بر اساس فرضیات رایج و ساختار مطالعات مشابه) ارائه می‌شود. این جدول نشان می‌دهد که چگونه تغییر فاصله دیتکتورها و زمان توقف اتوبوس بر دقت مدل (R^2) و میانگین خطای تخمین زمان سفر اتوبوس تأثیر می‌گذارد. مطابق جدول، با افزایش فاصله دیتکتور و زمان توقف تا نقطه بهینه (۲۰ متر و ۳۰ ثانیه)، دقت مدل افزایش و خطای تخمین کاهش می‌یابد و پس از این نقطه، افزایش بیشتر هر پارامتر باعث کاهش دقت و افزایش خطا می‌شود.

۴-۲-کاربردپذیری و توصیه‌های اجرایی

مدل پیشنهادی این پژوهش قابلیت پیاده‌سازی در سامانه‌های مدیریت ترافیک شهری مانند SCATS را دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی راهبردهای اولویت‌دهی به اتوبوس‌ها مورد استفاده قرار گیرد. برای اجرای موفق این مدل، تجهیز تقاطع‌ها به دیتکتورهای هوشمند و جمع‌آوری داده‌های دقیق از زمان توقف اتوبوس‌ها ضروری هست. همچنین، همکاری نزدیک میان مدیران شهری، شرکت‌های حمل‌ونقل عمومی و واحدهای فناوری اطلاعات برای یکپارچه‌سازی داده‌ها و به‌روزرسانی الگوریتم‌های کنترل سیگنال توصیه می‌شود. این اقدامات، ضمن کاهش تأخیر و افزایش قابلیت اطمینان سفرهای اتوبوس، به بهبود کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی و کاهش استفاده از خودروهای شخصی منجر خواهد شد.

جدول ٤. نتایج دقت مدل با افزایش فاصله دیتکتور و زمان توقف

فاصله دیتکتور از خط توقف (متر)	زمان توقف اتوبوس (ثانیه)	دقت مدل (R^2)	میانگین خطای تخمین (ثانیه)
۱۰	۲۰	۰.۹٦	۷.۳
۱۵	۲۵	۰.۹۸	٤.٦
۲۰ (مقدار بهینه)	۳۰ (مقدار بهینه)	۰.۹۹	۲.۱
۲۵	۳۵	۰.۹۷	۵.٤
۳۰	٤۰	۰.۹۵	۸.۰

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که ترکیب بهینه‌ی مکان‌یابی آشکارساز و زمان توقف اتوبوس می‌تواند عملکرد سامانه اولویت‌دهی به اتوبوس‌ها در تقاطع‌های پرترافیک را به طور چشم‌گیری بهبود بخشد. مدل ارائه‌شده با بهره‌گیری از الگوریتم، توانست دقت پیش‌بینی زمان سفر را به سطح بسیار بالایی (R^2= ۰/۹۹) برساند و نسبت به مدل‌های کلاسیک عملکرد بهتری ارائه دهد. یافته‌های این پژوهش برای برنامه‌ریزان حمل‌ونقل و مدیران شهری دارای کاربرد عملی قابل توجهی است. به ویژه در شهرهایی مانند تهران یا اصفهان که با مشکلات شدید ترافیکی و آلودگی مواجه هستند، به‌کارگیری الگوریتم‌های هوشمند زمان‌بندی چراغ‌ها می‌تواند:

-میزان تاخیر وسایل حمل‌ونقل عمومی را کاهش دهد؛

-سهم استفاده از اتوبوس در سفرهای شهری را افزایش دهد؛

-تصادفات ناشی از ترافیک و تقاطع‌های شلوغ را کاهش دهد؛

-هزینه‌های بهره‌برداری سیستم حمل‌ونقل عمومی را کاهش داده و بهره‌وری ناوگان را بهبود بخشد. این مدل همچنین می‌تواند به عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای سیاست‌گذاران در طراحی استراتژی‌های مدیریت تقاضا و توسعه حمل‌ونقل پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی

-بررسی امکان پیاده‌سازی مدل در شبکه‌ای از چند تقاطع متوالی به‌جای یک تقاطع منفرد.

-تلفیق مدل پیشنهادی با سامانه‌های پردازش تصویر برای تشخیص هوشمند جریان ترافیک در زمان واقعی.

-ارزیابی اثر مدل بر شاخص‌هایی مانند مصرف سوخت، سطح آلودگی هوا و رضایت کاربران.

-توسعه چارچوب‌هایی برای اتصال مدل به سیستم‌های

-کنترل ترافیک شهرهای بزرگ از طریق کلان‌داده‌ها.

٦- مراجع

-Alexander Skabardonisa, Eleni Christofa. (2011). Impact of Transit Signal Priority on Level of Service at Signalized Intersections. *6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service Stockholm,* Sweden June 28 – July 1, 612-619.

-Bilal Thonnam Thodi, Bhargava Rama Chilukuri and Lelitha Vanajakshi. (2022). An analytical approach to real-time bus signal priority system for isolated intersections. *Journal of Intelligent Transportation Systems.* Vol. 26. No. 2. 145-167.

-Bin-bin Hao, BinLv, and Qixiang Chen (2021). A Bus Signal Priority Model at Oversaturated Intersection under Stochastic Demand. *Journal of Mathematical Problems in Engineering.* Vol. 2021. 13-26.

-Doğan, E. (2024). Examining the safety impacts of transit priority signal systems using simulation techniques. *Scientific Journal of Silesian University of Technology.* Vol. 122. 61-71.

-Eric Albright and Miguel Figliozzi. (2012). Factors Influencing Effectiveness of Transit Signal Priority and Late-Bus Recovery at Signalized-Intersection Level. *Journal of Transportation Research Board.* No. 2311. 186-194.

-Federal Transit Administration. (2010). Bus and Rail Transit Preferential Treatments in Mixed Traffic. *Tcrp (Transit Cooperative Research Program).* Synthesis 83.

Conditional Priority for Use at Isolated Signalized Intersections. *Journal of Transportation Engineering.* 136. 1092-1103.
-Isfahan Municipality Traffic and Transportation Deputy.
-Isfahan Municipality Traffic Control Center.
-Katia, J. S., Steinmetz, N., Margreiter, M. (2024). Bus Priority Procedure for Signalized Intersections Based on Bus Occupancy and Delay. *SUMO Conference Proceedings.* NO. 5. 127-145.
-Kittelson & associates Inc. (2008). signal timing manual. U.s. department of transportation, *Federal Highway Administration.*
-Wael ekeila. (2006). dynamic transit signal priority. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of master of applied science. The American university of Sharjah.
-Yang, T. (2024). Transit Signal Priority Control with Connected Vehicle Technology: Deep Reinforcement Learning Approach. A dissertation submitted to the faculty of the University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Infrastructure and Environmental Systems.
- Yutong, S. et., Al. (2021). Tandem Design of Bus Priority Based on a Pre-Signal System. *Sustainability.* Vol. 13. Issue. 18.
-Yuxuan, D. et. Al. (2024). Adaptive Transit Signal Priority Control for Traffic Safety and Efficiency Optimization: A Multi-Objective Deep Reinforcement Learning Framework. *Mathematics.* Vol. 12. Issue. 24.
-Hoi-Kin Cheng, Kun-Pang Kou, Ka-Io Wong. (2024). Reinforcement Learning for Transit Signal Priority with Priority Factor. *Smart Cities.* Vol. 7. No. 5. 2861-2886.
-Hongfeng Xu, Jian Sun and Mingming Zheng. (2010). Comparative Analysis of Unconditional and
- Isfahan Municipal Bus Transit Company).
-Jie Li, Wei Wang, Henk J. van Zuylen, N. N. Sze, Xuewu Chen, and Hao Wang. (2012). Predictive Strategy for Transit Signal Priority at Fixed-Time Signalized Intersections Case Study in Nanjing, China. *Journal of Transportation Research Board.* No. 2311. 124-131.
- Minji, K, Yohee, H, Youngchan, K. (2024). Coordinated Transit Signal Priority and Vehicle Guidance for Automated Buses. *IEEE Access.* Vol. 12. 117143-117154.
-Mahmud, K. Tomer, T. (2023). Automatic Design of Optimal Actuated Traffic Signal Plans with Active Transit Priority. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* Vol. 99. 1-13.
-Ming Liu, Yecheng Zhao, Feng Chu, Feifeng Zheng, and Chengbin Chu. (2021). A Mathematical Model for Bus Scheduling with Conditional Signal Priority. *IFIP International Federation for Information Processing.* IFIP AICT. 632. 274-281.
-Rafidah Md Noor, Ng Seong Yik, Raenu Kolandaisamy, Ismail Ahmedy, Mohammad Asif Hossain, Kok-Lim Alvin Yau, Wahidah Md Shah, Tarak Nandy. (2020). Predict Arrival Time by Using Machine Learning Algorithm to Promote Utilization of Urban Smart Bus. Preprint.
-Use of High-Resolution Signal Controller Data to Measure Transit Signal Priority Performance: A Case Study in the Boston Region, J Jackson et al, 2024.

A Technical Evaluation of Key Parameters Influencing Bus Priority at Signalized Intersections to Enhance Traffic Conditions: A Case Study of the Azar Bridge Intersection in Isfahan, Iran

Reza Shokohi, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
***Homan Rahimi,** Department of civil Engineering, ShQ.C., Islamic Azad University, Shahr-e-Qods, Iran.*
Ali Naderan, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: hoomanrahimit@yahoo.com

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT
With increasing urbanization and traffic congestion—particularly under oversaturated conditions (V/C ≥ 1)—bus travel delays have become a major concern, reducing the appeal of public transportation. This study addresses the inadequacy of existing travel time models under heavy congestion, as most are developed for under-saturated conditions. A novel model is proposed and validated to estimate bus travel time at signalized intersections with actuated control, based on optimal detector placement and bus dwell time. Field data from two congested intersections in Isfahan were used. Simulation scenarios were developed using Aimsun and SCATS output to assess the impact of different detector locations and dwell times. Linear regression was used for initial predictions, followed by Gene Expression Programming (GEP) for optimization. The GEP model, incorporating optimal detector distance and dwell time, achieved high accuracy ($R^2 = 0.99$). However, exceeding threshold values for these parameters reduced model effectiveness. The findings suggest that dynamic signal control strategies, when optimized, can significantly reduce bus delays and enhance the reliability of public transit. The delay of buses reduced by 35% and overal delay reduced by 34%. Overally this model is recommended for use in planning and implementing Transit Signal Priority (TSP) systems.

Keywords: Aimsun, Priority, Detector, Dwell Time