



بررسی تأثیر اولویت‌دهی فعال غیرمشروط به حمل‌ونقل همگانی در زمان‌بندی چراغ راهنمایی با شبیه‌سازی

علیرضا غفاری^۱، میثم اکبرزاده^{۲*}

^۱ دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱

کلمات کلیدی:

VISSIM

TSP

حمل و نقل همگانی

سامانه اتوبوس تندرو

شبیه‌سازی

خلاصه: گرایش مسافران به حمل و نقل عمومی می‌تواند باعث کاهش استفاده از خودرو در شهرها شود و کاهش ترافیک، کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا را به دنبال داشته باشد. اولویت‌دهی به حمل و نقل همگانی در تقاطع‌های چراغ‌دار شلوغ به کاهش تأخیر ناشی از ترافیک و برخورد با چراغ قرمز در این تقاطع‌ها کمک می‌کند و باعث افزایش اطمینان‌پذیری این سامانه می‌شود. در این مقاله، روشی برای اولویت‌دهی فعال به حمل و نقل همگانی در یک تقاطع شامل اتوبوس‌های عادی و خط ویژه اتوبوس‌های تندرو (BRT) ارائه شده است. اهداف مورد توجه شامل کاهش تأخیر مسافران اتوبوس، افزایش قابلیت اعتماد سامانه حمل و نقل همگانی و کاهش تأثیر منفی بر خودروهای شخصی است. امکان اجرای TSP در یک تقاطع برای هر رویکرد در هر لحظه، بر اساس میزان تأخیر مسافران اتوبوس عبورکننده از تقاطع تعیین شد و با استفاده از ضرایب جداگانه برای وزن‌دهی به اتوبوس‌های عادی، اتوبوس‌های تندرو و خودروهای شخصی، تأثیر حضور اتوبوس و حجم تردد خودرو در هر رویکرد بصورت کمی در نظر گرفته شد. برای افزایش مزایای مسافران، یازده حالت مختلف از رسیدن اتوبوس به تقاطع بررسی شد. با نوشتن الگوریتم متناسب، تقاطع سه‌روندی در شهر اصفهان در نرم‌افزار VISSIM شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد تأخیر مسافران سامانه تندرو حدود ۶۵ درصد و مسافران اتوبوس عادی حدود ۷ درصد کاهش یافته است. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

بنوعی اعمال سیاست بازدارنده برای رانندگان سواری محسوب کرد. رواج کاربرد سامانه‌های هوشمند در مدیریت ترافیک تسهیل‌کننده اجرای زمان‌بندی متناسب با حجم و ترکیب ترافیک رویکردهای مختلف تقاطع‌هاست. یکی از نتایج استفاده از سیستم‌های هوشمند، امکان زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی با رعایت اولویت خودروهای حمل‌ونقل همگانی (TSP¹) است که از دهه ۱۹۶۰ به عنوان یکی از روش‌های کاهش زمان سفر اتوبوس در شریان‌های شهری معرفی شده است [۱]. اولویت‌دهی به حمل‌ونقل همگانی در تقاطع‌های چراغ‌دار به این معنی است که زمان‌بندی چراغ به گونه‌ای انجام شود

افزایش میزان استفاده از سامانه حمل‌ونقل همگانی مستلزم بهبود خدمات و افزایش مطلوبیت آن است. معمولاً حمل و نقل همگانی از نظر دسترسی، حریم خصوصی، زمان سفر و قابلیت اعتماد زمان سفر عرصه رقابت را به گونه‌های شخصی واگذار می‌کند. از آنجا که بخش قابل توجهی از تأخیر و نوسانات زمانی سفر در تقاطع‌ها اتفاق می‌افتد، اعطای اولویت عبور به خودروهای همگانی، می‌تواند باعث ایجاد مزیت و در نتیجه رقابت‌پذیری آنها با خودروهای سواری شود. همچنین، انتقال حق عبور از گونه شخصی به گونه همگانی را می‌توان

1 Transit signal priority

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: makbarzadeh@cc.iut.ac.ir



که خودروهای حمل‌ونقل همگانی (که در این متن با تسامح اتوبوس خوانده می‌شوند) با حداقل ممکن برخورد با چراغ قرمز، از تقاطع عبور کنند. این اولویت‌دهی با افزایش زمان سبز یا کاهش زمان قرمز در رویکرد اتوبوس اعمال می‌شود [۲].

اولویت‌دهی مناسب به حمل‌ونقل همگانی با کاهش تأخیر اتوبوس در تقاطع‌ها و ایستگاه‌ها و کاهش ناوگان مورد نیاز باعث افزایش کارایی و قابلیت اعتماد سامانه حمل‌ونقل همگانی و در نتیجه افزایش مطلوبیت آن می‌شود. همچنین اجرای TSP، از توقف همزمان اتوبوس‌های چند خط در تقاطع جلوگیری می‌کند [۳]. اجرای صحیح TSP می‌تواند باعث کاهش زمان سفر کلی در مسیرهای شهری شود. اما مطالعات نشان می‌دهد میزان تأثیرات اجرای TSP به وضعیت ترافیکی محیط اطراف وابسته است [۴]. از سوی دیگر، TSP دو پیامد منفی عمده نیز دارد. تغییر تنظیمات چراغ برای اتوبوس‌ها باعث افزایش تأخیر در رویکردهای متقاطع می‌شود. همچنین افزایش عبوردهی مسیر دارای اولویت ممکن است باعث جذب ترافیک بیشتر و در نتیجه ازدحام ثانویه شود [۱]. روش‌های مورد استفاده برای اعمال این سیاست عبارتند از سبز تعمیم‌یافته، قرمز کاهش‌یافته، تغییر توالی فاز و افزودن فاز.

هدف این پژوهش، به دست آوردن و ادغام اطلاعات حمل‌ونقل و اجرای کنترل هماهنگ مسافران، وسایل نقلیه و تقاطع‌ها به منظور بهبود شرایط حمل‌ونقل همگانی در تقاطع‌ها، با استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته و شبکه‌های حسگر است. اتوبوس‌ها در هنگام عبور از تقاطع با پیاده‌سازی الگوریتم‌های خاصی از روش‌های ویژه، مانند افزایش زمان سبز و کاهش زمان قرمز برای عبور از چهارراه استفاده می‌کنند [۵]، تا مطلوبیت عملکرد سیستم اتوبوس‌تندرو و اتوبوس‌عادی به طور قابل توجهی بهبود یابد.

اسمیت و همکاران در سال ۱۹۶۸ جز اولین نفراتی بودند که استفاده از اولویت‌دهی به سیستم حمل‌ونقل همگانی را به سمت اتوبوس و برای کاهش زمان سفر این وسیله نقلیه بردند [۶]. هد در سال ۲۰۰۶ با ارائه هسته‌ای برای سیگنال‌های ترافیکی امکان آنالیز رفتارهای پیچیده را فراهم کرد که برای اجرای TSP در حالات پیچیده (چهارراه‌های نیازمند به اجرای TSP در چند جهت) به کار می‌رود [۷]. دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با در نظر گرفتن شاخص‌های ترافیکی و شاخص‌های زیست‌محیطی به عنوان اهداف

چندگانه، الگوریتمی برای اجرای TSP در خطوط اتوبوس‌تندرو با پیش‌بینی مدت زمان توقف در ایستگاه‌ها ارائه دادند و مدل را برای سامانه تندروی شهر گوانگژو چین شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که این روش باعث کاهش نرخ توقف اتوبوس و تأخیرات آن می‌شود و همچنین آلودگی در چهارراه‌ها کاهش می‌یابد و در شرایط افزایش حجم ترافیک معبر، TSP شرایط عملکرد بهتر اتوبوس‌تندرو را فراهم می‌کند [۸]. روی لی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از الگوریتم ژنتیکی مدلی برای بهینه‌سازی TSP مسافر مینا برای کاهش تأخیر مسافران در دسترسی به حمل‌ونقل همگانی را شبیه‌سازی کردند [۹]. کریستف و همکاران در سال ۲۰۱۳ روش بهینه‌سازی TSP فرد مینا را در معابر دارای ترافیک سنگین و پیچیده ارائه کردند. آنها با استفاده از مدل غیرخطی عدد صحیح که مجموع تأخیرات فرد در شبکه را کاهش می‌دهد و اولویت برای اتوبوس‌ها در جریان متقاطع را بر اساس میزان اشغال آنها ایجاد می‌کند روش خود را فرمول‌بندی کردند [۱۰]. هو و همکاران در سال ۲۰۱۵ با ارائه روش بهینه‌سازی TSP بر مبنای تأخیرات افراد و در چهارراه‌های هماهنگ‌سازی شده بر اساس خودروهای به هم پیوسته نشان دادند این روش ضمن حفظ کارایی و تحرک سیستم TSP بیش از ۷۵٪ تأخیرات افراد را نسبت به اجرای معمولی TSP کاهش می‌داد. این روش در تمامی مقادیر ازدحام قابل استفاده بود. همچنین در زمانی که حجم ترافیک کمتر از ظرفیت بود این روش هیچگونه تأثیر منفی نداشت. شرایط اجرای TSP در این روش زمانی است که اتوبوس از برنامه زمان‌بندی عقب باشد و اجرای TSP باعث افزایش مجموع تأخیرات نگردد [۱۱]. کریستف و همکاران در سال ۲۰۱۶ روی بهینه‌سازی چراغ راهنمایی بر اساس کاهش تأخیرات افراد در خیابان‌های شریانی در شرایط حقیقی پژوهش انجام دادند. در این پژوهش نویسندگان با گسترش پژوهش‌های قبلی به کل خیابان و در شرایط وجود چند خط حمل‌ونقل عمومی در یک شریان که می‌توانند در چهارراه با یکدیگر برخورد نیز داشته باشند و همچنین در نظر گرفتن صفوف چهارراه‌ها بسیاری از مشکلات TSP را حل نموده و میزان تأخیرات را کاهش داده‌اند و با در نظر گرفتن همزمان دو چهارراه مرتبط با هم، زمان انجام محاسبات را کاهش داده و قابلیت اجرای این روش در محیط حقیقی را افزایش داده‌اند [۱۲]. یان و پیتز در سال ۲۰۱۴ با توجه به وابستگی این روش به محل قرارگیری حسگرها و زمان و

فاز و تغییر توالی فازها در ازای انجام تحلیل های پیچیده به صورت آبی و دائمی در تقاطع استفاده شده است.

اهداف اجرای این روش شامل افزایش راحتی و اطمینان مسافری به حمل و نقل همگانی، کاهش تأثیرات منفی ناشی از اجرای این طرح در یک رویکرد، افزایش مطلوبیت حمل و نقل همگانی، و کاهش تأخیرات مسافری اتوبوس گذرنده از تقاطع است.

اولویت دهی فعال غیر مشروط

در رویکرد فعال، از حسگرهایی برای دریافت سیگنال حضور وسیله نقلیه همگانی در نزدیکی تقاطع استفاده می شود. وقتی اتوبوس به تقاطع نزدیک شود، با اعلام حضور آن توسط حسگرها زمان بندی مناسب برای عبور بدون توقف این وسیله نقلیه طراحی می شود [۱]. در این روش ضمن لحاظ کردن موارد ایمنی، در زمان رسیدن اتوبوس، صرف نظر از اینکه در رویکرد متقاطع یا مقابل، طول صف چقدر باشد و یا چه مقدار زمان از آخرین درخواست اجرای TSP گذشته است، زمان سبز افزایش یا زمان قرمز کاهش می یابد تا اتوبوس بتواند بدون توقف از تقاطع عبور کند [۳].

قواعد اولیه جهت اجرای این روش به شرح زیر است:

۱- شناساگرها باید در فاصله مناسب در جریان بالادست تقاطع قرار گیرند؛

۲- چنانچه اتوبوسی در زمان سبز جریان متقاطع در تقاطع حضور پیدا کند، تغییر چراغ تنها زمانی صورت می گیرد که کمینه زمان سبز جریان متقاطع سپری شده باشد؛

۳- تمام فازهای یک چرخه باید اجرا شوند.

همچنین میزان انحراف اتوبوس از زمان بندی تعیین شده با استفاده از اطلاعات دریافتی از اتوبوس ها قابل برداشت است، بنابراین با استفاده از این اطلاعات می توان الگوریتم اجرای TSP را برنامه ریزی کرد. این الگوریتم شامل سه مرحله است:

۱- دریافت مکان و سرعت اتوبوس ها در هریک از مسیرهای عادی و یا ویژه؛

۲- تعیین زمان رسیدن آنها به تقاطع بر اساس شرایط ترافیکی موجود و وجود یا عدم وجود ایستگاه در محدوده مورد مطالعه؛

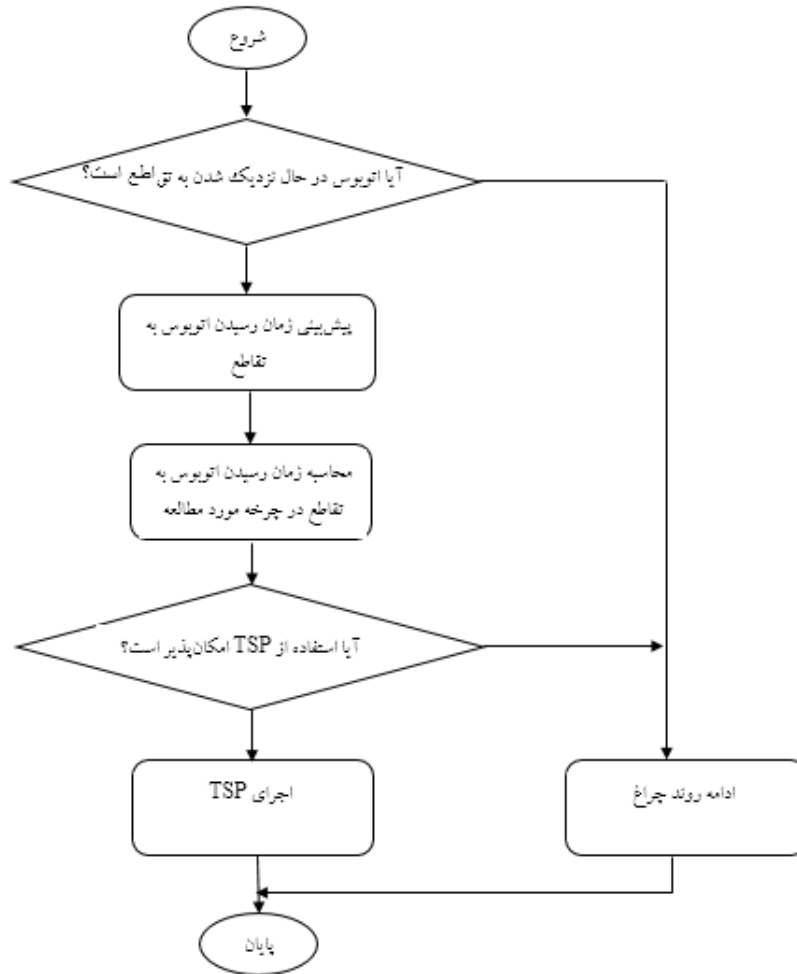
۳- تعیین امکان ارائه خدمات TSP به اتوبوس در تقاطع بسته به زمان رسیدن اتوبوس به تقاطع.

مکان قرارگیری و اطلاع رسانی آن ها جهت افزایش بهره وری این روش الگوریتمی را تهیه کردند که بر اساس آن اتوبوس در دو تا سه چرخه پیش از اینکه به تقاطع برسد، اطلاعاتش دریافت می گردد و ضمن در نظر گرفتن شرایط ترافیکی معبر و شرایط اتوبوس در حال حرکت وضعیت سبز را در زمان رسیدن به تقاطع برایش فراهم می کند [۱۳]. لی ژو و همکاران در سال ۲۰۱۷ با توجه به اهمیت خطوط اتوبوس تندرو در کاهش ترافیک و افزایش رضایت مسافران در استفاده از حمل و نقل عمومی روشی را برای کاهش تأخیر اتوبوس تندرو در چهارراه ها با ارائه یک مدل کنترل چراغ فعال برای این دسته خودروها بر اساس سیستم یکپارچه اطلاعات ارائه دادند [۵].

محققان در مطالعات اولیه با استفاده از شبیه سازی و همچنین اجرای تجربی TSP روش های مختلفی را ارائه دادند و با گذر زمان و تکمیل شدن و پیشرفت فناوری مربوط به حسگرها و شناساگرها، تحقیقات به سمت کاهش زمان تلف شده در سفر، بهینه کردن روش TSP و کاهش زمان سفر کل مسافران شبکه رفت. با افزایش تقاضای استفاده از سیستم حمل و نقل همگانی و خودروی شخصی، TSP پیچیده تر شده و مسائل جدیدی در این زمینه مطرح می شود. با وجود پژوهش های فراوان در زمینه TSP این روش همچنان خلأ ها و کمبودهای فزاینده ای خصوصاً در زمینه نحوه اجرا و الگوریتم ها دارد.

۲- روش پژوهش

این پژوهش یک الگوریتم جهت کنترل اولویت دهی به حمل و نقل همگانی برای یک تقاطع در شرایط واقعی که از دو رویکرد آن اتوبوس عادی و از دو رویکرد دیگر آن اتوبوس تندرو عبور می کند، پیشنهاد می دهد که می تواند با توجه به تعامل اطلاعات بین وسیله نقلیه و کنترل کننده چراغ، کنترل وسایل نقلیه اتوبوس تندرو که روی خطوط ویژه اتوبوس تندرو در خط وسط حرکت می کنند و اتوبوس های عادی که در رویکردهای متفاوت این تقاطع در جریان هستند را به دست گیرد. الگوریتم پیشنهادی بر مبنای اطلاعات دریافتی از حسگرهای تعبیه شده در مسیر برای بدست آوردن اطلاعات مکان و سرعت وسایل نقلیه به طوری که زمان سفر وسایل نقلیه اتوبوس تندرو و اتوبوس های عادی دقیقاً پیش بینی می شود، کار می کند. در این راستا از روش اولویت بندی فعال غیر مشروط و با استفاده از چهار روش افزایش زمان سبز، کاهش زمان قرمز، افزودن



شکل ۱. فرآیند اولویت‌دهی به سیستم حمل‌ونقل همگانی
 Fig. 1. Mechanism of Transit Priority

از شناسایی آن در بالادست جریان پیش‌بینی کرد. در ابتدا فاصله محل شناسایی اتوبوس تندرو تا خط توقف باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا زمان سفر اتوبوس تندرو از محل شناسایی‌شده تا خط توقف بیشتر از زمان پاسخ سیستم باشد. این مقدار در این پژوهش ۱۵۰ متر در نظر گرفته شد تا زمان کافی برای پاسخ به درخواست هر یک از اتوبوس‌های تندرو و عادی وجود داشته باشد. سپس، مدل خطی برای پیش‌بینی زمان ورود اتوبوس تندرو استفاده می‌شود که در آن پیش‌بینی زمان ورود و انحراف معیار استاندارد اتوبوس تندرو به ترتیب به عنوان میانه و انحراف حد بالا یا پایین از مقدار متوسط محاسبه می‌شود.

برای اتوبوس تندرو که دارای خط ویژه است، مدل پیش‌بینی زمان سفر در معادله (۱) نشان داده شده است.

$$t_{ATS,R} = t_{s,r} + t_{l,r} \quad (1)$$

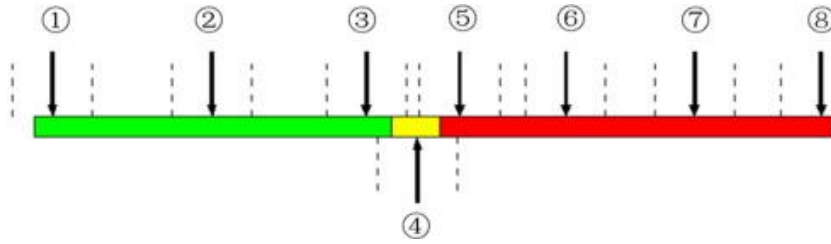
۳- فرآیند اولویت‌دهی به سیستم حمل‌ونقل همگانی

فرآیند اولویت‌دهی به سیستم حمل‌ونقل همگانی در یک تقاطع را می‌توان به شکل الگوریتم ساده شده‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده است تعریف کرد. الگوریتم متناسب با تقاطع مورد مطالعه در نرم‌افزار VisVAP نوشته شد و در شبیه‌سازی چراغ مورد استفاده قرار گرفت. در فرآیند برنامه‌ریزی شده برای چراغ زمان سبز هر فاز به دو مقدار کمینه زمان سبز و بیشینه زمان سبز محدود گردید. بیشینه زمان سبز اضافه شده برای اجرای درخواست TSP در هر فاز حداکثر ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

۳-۱- مدل پیش‌بینی زمان سفر اتوبوس

۳-۱-۱- اتوبوس تندرو

زمان رسیدن اتوبوس تندرو به خط توقف را می‌توان بلافاصله پس



شکل ۲. حالت‌های مختلف از زمان رسیدن یک اتوبوس به تقاطع
Fig. 2. Different States of Arrival Time of Bus to the Junction

هر حالت ورودی دارای روش اولویت‌دهی مربوط به خود است.

۳-۱-۳ اتوبوس عادی

زمان رسیدن اتوبوس عادی به خط توقف را می‌توان پس از شناسایی آن در بالادست جریان پیش‌بینی کرد. در ابتدا فاصله محل شناسایی اتوبوس تا خط توقف باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا زمان سفر از محل شناسایی شده تا خط توقف بیشتر از زمان پاسخ سیستم باشد. سپس، مدل خطی برای پیش‌بینی زمان ورود اتوبوس به تقاطع استفاده می‌شود که در آن پیش‌بینی زمان ورود و انحراف معیار استاندارد اتوبوس به ترتیب به عنوان میانه و انحراف حد بالا یا پایین از مقدار متوسط محاسبه می‌شود.

برای اتوبوس عادی که با جریان ترافیک همراه است، مدل پیش‌بینی زمان سفر در معادله (۴) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} t_{ATS,B} = t_{s,b} + t_{t,b} + \frac{N_{j,T}^b}{S_j} & t_{b,T} \in G_{i,T} \\ t_{ATS,B} = t_{s,b} + t_{t,b} + \frac{N_{j,T}^b}{S_j} + (t_T + R - t_b) & t_{b,T} \in R_{j,T} \end{cases} \quad (4)$$

که در این رابطه $t_{ATS,B}$ مقدار متوسط پیش‌بینی زمان رسیدن اتوبوس عادی به خط توقف؛ $t_{s,b}$ زمان سفر اتوبوس عادی از محل شناسایی تا خط توقف در تقاطع در حالتی که هیچ ماشینی جلوی آن نباشد و بتواند آزادانه حرکت کند؛ که با داشتن اطلاعات مکان و سرعت اتوبوس تندررو قابل محاسبه است؛ $t_{t,b}$ زمان توقف اتوبوس عادی در ایستگاه، برحسب ثانیه؛ برای حالتی که بعد از تشخیص اتوبوس عادی ایستگاه وجود داشته باشد؛ S_j نرخ جریان اشباع؛ $N_{j,T}^b$ تعداد خودروهای جلو اتوبوس تا رسیدن به خط توقف در تقاطع؛ t_T زمان شروع چرخه R ؛ T زمان سپری شده از ابتدای چرخه T تا پایان

که در این رابطه $t_{ATS,R}$ مقدار متوسط پیش‌بینی زمان ورود اتوبوس تندررو به خط توقف؛ $t_{s,r}$ زمان سفر اتوبوس تندررو از محل شناسایی تا خط توقف در تقاطع است که با داشتن اطلاعات مکان و سرعت اتوبوس تندررو قابل محاسبه است و $t_{t,r}$ زمان توقف اتوبوس تندررو در ایستگاه برای حالتی که بعد از تشخیص اتوبوس تندررو ایستگاه وجود داشته باشد، می‌باشد.

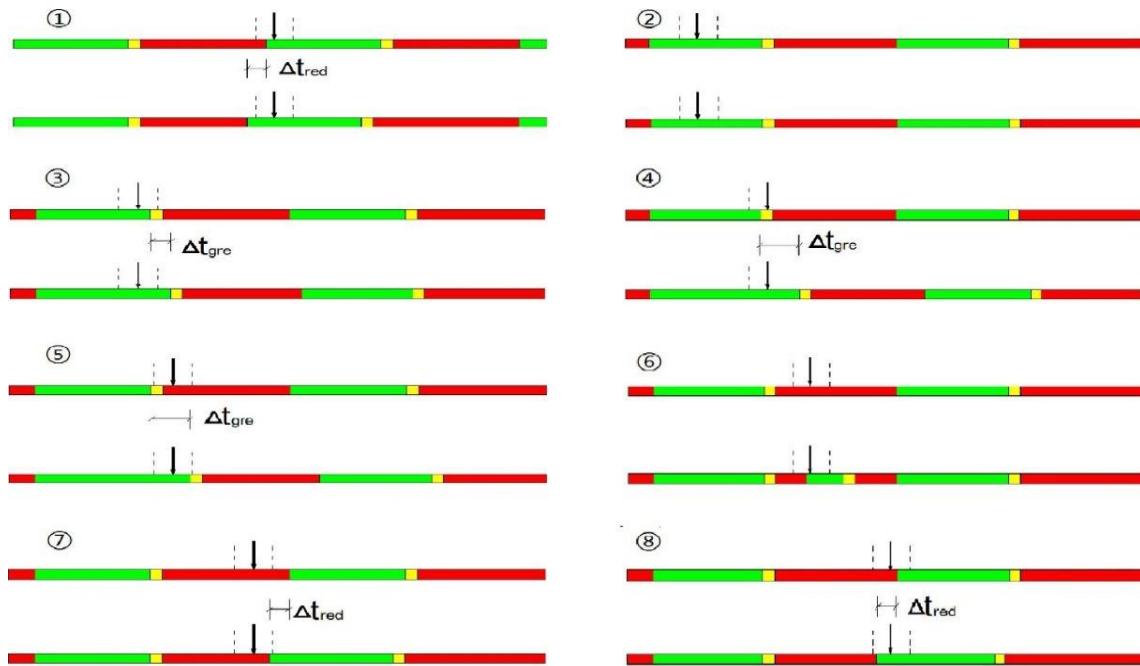
مقدار انحراف معیار استاندارد را می‌توان به عنوان یک پارامتر متغیر (به عنوان مثال ۳ ثانیه) در آزمایش‌های شبیه‌سازی در نظر گرفت. بازه زمانی که در آن اتوبوس تندررو به تقاطع می‌رسد را می‌توان با استفاده از t_{ATS} و σ_r در معادله (۲) به دست آورد.

$$[t_{ATS,R} - \sigma_r, t_{ATS,R} + \sigma_r] \quad (2)$$

۳-۱-۲ مشخص کردن زمان ورود اتوبوس تندررو در چرخه مقدار متوسط، حد پایین و حد بالای بازه زمانی رسیدن اتوبوس تندررو به تقاطع باید در یک چرخه و فازهای آن قرار گیرد تا در صورت نیاز به اجرای TSP روش اجرای آن را بتوان مشخص کرد. از رابطه زیر برای تعیین محل این مقادیر در چرخه استفاده می‌شود.

$$\text{mod}([t_{now,r} + t_{ATS,R} - \sigma_r, t_{now,r} + t_{ATS,R} + \sigma_r], C_T) \quad (3)$$

که در آن $t_{now,r}$ لحظه‌ای که اتوبوس اتوبوس تندررو شناسایی می‌شود، برحسب ثانیه و C_T طول چرخه، برحسب ثانیه است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، از آنجا که حد پایین، مقدار متوسط و حد بالا زمان ورود اتوبوس در مراحل مختلف در یک چرخه متفاوت است، هشت حالت ورودی بر اساس مکان‌یابی زمان ورود اتوبوس تندررو در مراحل مختلف ممکن است اتفاق بیفتد.



شکل ۳. حالت‌های مختلف رسیدن یک اتوبوس به تقاطع
 Fig. 3. Different States of Bus Arrival to the Junction

همانند آنچه برای اتوبوس تندرو شرح داده شد از آنجا که حد پایین، مقدار متوسط و حد بالا زمان ورود اتوبوس عادی به تقاطع در مراحل مختلف در یک چرخه متفاوت است، هشت حالت ورودی بر اساس مکان‌یابی زمان ورود اتوبوس عادی در مراحل مختلف ممکن است اتفاق بیفتد، که در شکل ۲ نشان داده شده است. هر حالت ورودی دارای روش اولویت‌دهی مربوط به خود است.

۳-۲- حالت‌های مختلف برای اتوبوس و اتوبوس تندرو در هنگام رسیدن به تقاطع

هشت حالت مختلف از امکان رسیدن یک اتوبوس به تقاطع که در شکل ۳ نشان داده شده است، همچنین سه حالت از امکان رسیدن همزمان اتوبوس‌ها به تقاطع وجود دارد که در ادامه امکان استفاده از TSP برای هر حالت و روش اجرای آن شرح داده شده است.

حالت اول: رسیدن اتوبوس در ابتدای زمان سبز

حالتی که حد پایین بازه ورود اتوبوس به تقاطع در زمان قرمز باشد. روش اجرای TSP در این حالت کاهش زمان قرمز است؛ که در آن طول کاهش زمان قرمز باید به اندازه‌ای باشد که حداقل زمان سبز در فاز قبلی طی شده باشد.

فاز قرمزی که اتوبوس در آن شناسایی می‌شود t_b لحظه شناسایی اتوبوس است.

مقدار انحراف معیار استاندارد را می‌توان به‌عنوان یک پارامتر متغیر (به عنوان مثال ۴ ثانیه) در آزمایش‌های شبیه‌سازی در نظر گرفت. بازه زمانی که در آن اتوبوس عادی به تقاطع می‌رسد را می‌توان با استفاده از $t_{ATS,B}$ و σ_b در معادله (۵) به دست آورد.

$$[t_{ATS,B} - \sigma_b, t_{ATS,B} + \sigma_b] \quad (5)$$

۳-۱-۴ مشخص کردن زمان ورود اتوبوس عادی در چرخه

مقدار متوسط، حد پایین و حد بالای بازه زمانی رسیدن اتوبوس عادی به تقاطع باید در یک چرخه و فازهای آن قرار گیرد تا در صورت نیاز به اجرای TSP روش اجرای آن را بتوان مشخص کرد. برای تعیین محل این مقادیر در چرخه از معادله (۶) می‌توان استفاده کرد.

$$\text{mod}([t_{now,b} + t_{ATS,B} - \sigma_b, t_{now,b} + t_{ATS,B} + \sigma_b], C_T) \quad (6)$$

در این رابطه، $t_{now,b}$ لحظه‌ای که اتوبوس عادی شناسایی می‌شود، است.

روش افزودن فاز و یا افزایش زمان سبز قابل اجرا است که روش افزودن فاز در ادامه شرح داده خواهد شد.

میزان افزایش زمان سبز در این حالت برابر با رابطه (۹) است.

$$t_{gre} = \min[2\sigma, g_{max} - g_i] \quad (9)$$

حالت ششم: رسیدن اتوبوس در میانه زمان قرمز

در این حالت اتوبوس ممکن است مانند شکل ۳ در میانه زمان قرمز به تقاطع برسد. در این حالت چنانچه باقی ماندن اتوبوس پشت چراغ قرمز باعث زیاد شدن میانگین تأخیر تقاطع شود یا باعث پشت سرهم قرار گرفتن اتوبوس‌ها در تقاطع بالأخص برای اتوبوس‌های تندرو شود، از تغییر توالی فاز استفاده می‌شود که ضوابط آن به صورت زیر است:

$$t_{(rot)} = \max \left[t_{ATS,R} - \sigma, \sum_i^{m-1} (g_i + y_i) + g_{m,min} \right] \quad (10)$$

$t_{(rot)}$ زمان تغییر توالی فازها، m فازی که در حد پایین بازه زمانی ورود اتوبوس به تقاطع در حال اجرا است و $g_{m,min}$ کمینه زمان سبز فاز m است.

برای اتوبوس‌های عادی:

با توجه به اینکه برای اتوبوس‌های همراه با جریان رسیدن به تقاطع مستلزم عبور خودروهای جلوی این اتوبوس‌ها است، ضابطه مربوط به این اتوبوس‌ها در رابطه (۱۱) آمده است.

$$t_{(rot)} = \max \left[t_{ATS,B} - \frac{N_{j,T}^b}{S_j}, \sum_i^{m-1} (g_i + y_i) + g_{m,min} \right] \quad (11)$$

حالت هفتم: رسیدن اتوبوس در نیمه پایانی زمان قرمز

این حالت زمانی است که اتوبوس بعد از کمینه زمان قرمز به تقاطع برسد، روش کنترل اولویت برای این حالت، کاهش زمان قرمز است که بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

برای اتوبوس اتوبوس تندرو:

$$t_{red} = \min \left[(t_T + R) - (t_{ATS,R} - \sigma), (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + y_i) - g_{n,min} \right] \quad (12)$$

$$t_{red} = \min[\sigma, r - g_{n,min}] \quad (7)$$

حالت دوم: رسیدن اتوبوس در میانه زمان سبز به تقاطع

در این حالت هر دو مقدار حد بالا و پایین بازه زمانی اتوبوس ورودی در فاز سبز چراغ قرار دارد در این حالت چراغ به روند عادی خود ادامه می‌دهد و نیازی به اجرای TSP نیست.

حالت سوم: رسیدن اتوبوس در انتهای زمان سبز به تقاطع

در این حالت حد بالای بازه زمانی ورود اتوبوس به تقاطع در زمان زرد قرار می‌گیرد، در این حالت می‌توان از دو روش برای اجرای TSP بسته به شرایط ترافیکی تقاطع استفاده کرد:

۱- افزودن فاز، چنانچه جریان رو به روی رویکرد مورد مطالعه دارای فاز سبز جداگانه باشد و هم‌زمان از آن رویکرد درخواست عبور اتوبوس صادر شده باشد و یا اینکه تأخیر خودروها در آن زیاد باشد که در ادامه شرح داده خواهد شد.

۲- افزایش زمان سبز که مقدار این افزایش برابر است:

$$t_{gre} = \min[\sigma, g_{max} - g_t] \quad (8)$$

در این رابطه t_{gre} برابر افزایش طول زمان سبز در مرحله اولویت‌دهی به اتوبوس؛ g_{max} حداکثر زمان سبز در مرحله اولویت‌دهی به اتوبوس و g_t زمان سبز فاز اولویت‌دهی به اتوبوس در زمان‌بندی اصلی چراغ است.

حالت چهارم: رسیدن اتوبوس در انتهای زمان سبز یا در زمان زرد به تقاطع

در این حالت اتوبوس ممکن است در زمان زرد به تقاطع برسد اما حد بالای بازه زمانی رسیدن اتوبوس به تقاطع در زمان قرمز فاز بعدی قرار بگیرد در این حالت نیز مانند حالت سوم بسته به شرایط تقاطع دو روش افزودن فاز و یا افزایش زمان سبز قابل اجرا است که روش افزودن فاز در ادامه شرح داده خواهد شد.

میزان افزایش زمان سبز در این حالت برابر با رابطه (۸) است.

حالت پنجم: رسیدن اتوبوس در ابتدای زمان قرمز به تقاطع

در این حالت اتوبوس ممکن است در ابتدای زمان قرمز به تقاطع برسد. در این حالت نیز مانند حالت سوم، بسته به شرایط تقاطع دو

برای اتوبوس عادی:

$$t_{red} = \min \left[(t_T + R) - \left(t_{ATS,B} - \frac{N_{j,T}^b}{S_j} \right), (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + y_i) - g_{nmin} \right] \quad (13)$$

حالت هشتم: رسیدن اتوبوس در انتهای زمان قرمز

این حالت زمانی است که اتوبوس بعد در انتهای زمان قرمز به تقاطع برسد، روش کنترل اولویت برای این حالت، کاهش زمان قرمز است که بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

برای اتوبوس اتوبوس تندرو:

$$t_{red} = \min \left[2\sigma, (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + y_i) - g_{nmin} \right] \quad (14)$$

برای اتوبوس عادی:

$$t_{red} = \min \left[\frac{N_{j,T}^b}{S_j}, (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + y_i) - g_{nmin} \right] \quad (15)$$

حالت نهم: اتوبوس‌های دو رویکرد روبه‌رو هم‌زمان به تقاطع برسند در حالتی که دو رویکرد رو به روی هم دارای فازهای متفاوت باشند و به طور هم‌زمان اتوبوس‌هایی که مسیر مستقیم را طی می‌کنند در حال نزدیک شدن به تقاطع هستند و یکی از این رویکردها فاز سبز را طی می‌کند می‌توان با افزودن یک فاز که در آن حرکت مستقیم هر دو رویکرد مجاز و چپ‌گرد آن‌ها ممنوع است، تأخیر در تقاطع را کاهش و امکان اولویت‌دهی به سیستم حمل‌ونقل عمومی را فراهم نمود. این عملیات بر اساس محدودیت زیر قابل انجام است.

برای اتوبوس‌های تندرو:

$$t_{ins} = \min \left[t_{ATS,R} - \sigma, \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + y_i) + g_{n,min} \right] \quad (16)$$

برای اتوبوس‌های عادی:

$$t_{ins} = \min \left[t_{ATS,B} - \frac{N_{j,T}^b}{S_j}, \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + y_i) + g_{n,min} \right] \quad (17)$$

حالت دهم: از یک رویکرد چند اتوبوس در حال نزدیک شدن به تقاطع باشند

برای حالتی که یک رویکرد دارای بیشتر از یک خط اتوبوس (به عنوان مثال یک خط اتوبوس عادی و یک خط اتوبوس تندرو یا دو خط اتوبوس عادی) وجود داشته و هم‌زمان دو اتوبوس در حال نزدیک شدن به تقاطع باشند، اتوبوسی که از لحاظ زمانی عقب‌تر است ملاک عمل قرار می‌گیرد و یکی از حالت‌های ۱ تا ۸ برای آن رویکرد اعمال می‌شود.

حالت یازدهم: اتوبوس‌ها از دو رویکرد متقاطع به تقاطع برسند در این حالت دو رویکرد متقاطع هم‌زمان درخواست ارائه TSP می‌کنند. برای تعیین اینکه چه رویکردی باید از خدمات TSP زودتر بهره‌مند گردد، با توجه به مجموع تأخیر هر رویکرد که بر اساس ضریب وزنی جداگانه در نظر گرفته شده برای هر وسیله نقلیه محاسبه می‌شود، رویکردی که بیشترین تأخیر را داشته باشد به آن TSP تعلق می‌گیرد و یکی از حالت‌های ۱ تا ۸ بسته به شرایط تقاطع انتخاب و استفاده می‌شود.

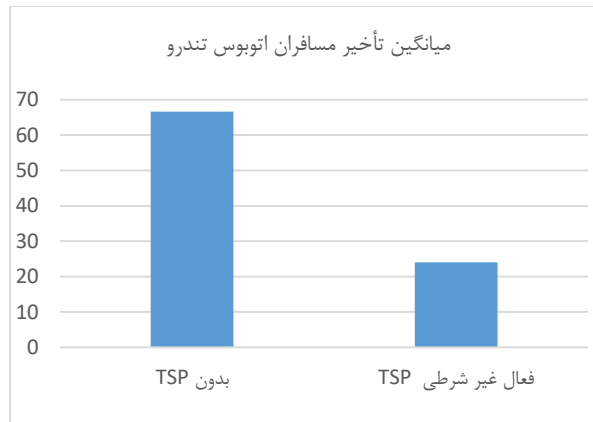
۴- شبیه سازی و نتایج

برای آزمایش الگوریتم ارائه شده، تقاطع سه‌رودی در شهر اصفهان که در مسیر خط ۱ اتوبوس تندرو قرار دارد و به دلیل ترافیک پر حجم در این تقاطع و قرارگرفتن آن در شریان‌های اصلی شهر جز تقاطع‌های مهم به حساب می‌آید در نظر گرفته شد و اطلاعات مربوط به حجم‌های ورودی و خروجی از این تقاطع در یک بازه ۷ روزه و اطلاعات مربوط به فازها و زمان چرخه این چراغ از مرکز کنترل ترافیک شهر اصفهان دریافت شد تا شبیه سازی واقع‌گرایانه‌تری انجام گردد.

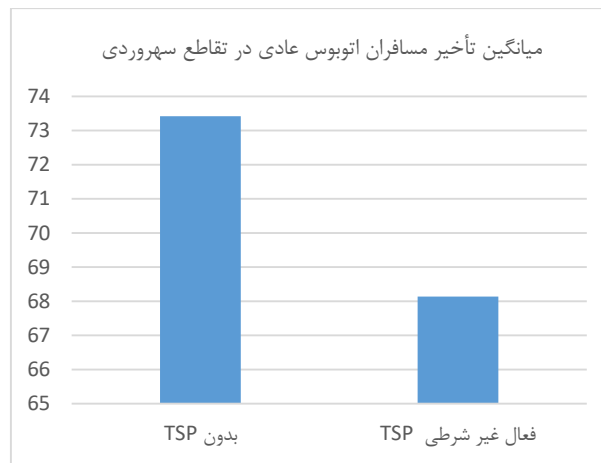
الگوریتم مورد نظر در برنامه VisVAP نوشته شد و مدل تقاطع منتخب در برنامه VISSIM7 اجرا گردید و با استفاده از اطلاعات موجود شبیه سازی در بازه زمانی ۱/۵ ساعته برای زمان اوج ترافیک شبکه انجام گرفت. برای اطمینان از اینکه نتایج قابل اعتمادتری بدست می‌آید، مدل بر اساس شرایط واقعی کالیبره شد و شبیه سازی ده مرتبه با مقادیر مختلف هسته تصادفی انجام گرفت و از میانگین نتایج برای تحلیل الگوریتم و برنامه پیشنهادی استفاده شد.

پس اجرای شبیه سازی‌های مورد نیاز برای دو حالت شرایط فعلی تقاطع و شرایطی که چراغ راهنمایی تقاطع با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برنامه ریزی شده باشد نتایج استخراج گردید.

نتایج حاصل از شبیه سازی انجام گرفته در این تقاطع مطابق تقاطع مورد مطالعه باعث کاهش ۶۵ درصدی میانگین تأخیر مسافران اتوبوس تندرو و کاهش ۷ درصدی میانگین تأخیر مسافران اتوبوس با شکل های ۴ الی ۷ نشان داد اجرای اولویت دهی غیر مشروط در



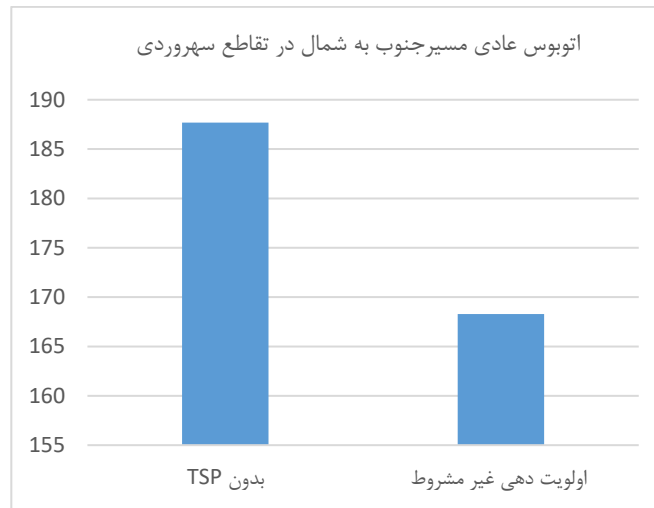
شکل ۴. نمودار مقایسه‌ای میانگین تأخیر مسافران اتوبوس تندرو عبوری از تقاطع
 Fig. 4. Comparison of Average Delay of Passengers of BRT Passing the Junction



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای میانگین تأخیر مسافران اتوبوس عادی عبوری از تقاطع
 Fig. 5. Comparison of Average Delay of Regular Buses Passing the Junction



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای میانگین زمان سفر اتوبوس تندرو در مسیر غرب به شرق
 Fig. 6. Comparison of Average Travel Time of Westbound BRT



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای میانگین زمان سفر اتوبوس عادی در مسیر جنوب به شمال
Fig. 7. Comparison of Average Travel Time of Southbound Regular Buses

در آینده، می‌توان این روش را روی چند تقاطع گسترش داد و همچنین اثر تحلیل نقطه به نقطه سرعت و مکان اتوبوس را در بهبود شرایط این روش سنجید.

مراجع

- [1] Y. Lin, X. Yang, N. Zou, M. Franz, Transit signal priority control at signalized intersections: a comprehensive review, *Transportation letters*, 7(3) (2015) 168-180.
- [2] F. Dion, H. Rakha, Y. Zhang, Evaluation of potential transit signal priority benefits along a fixed-time signalized arterial, *Journal of transportation engineering*, 130(3) (2004) 294-303.
- [3] Y. Ji, B. Hu, J. Han, D. Tang, An improved algebraic method for transit signal priority scheme and its impact on traffic emission, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014 (2014).
- [4] V. Ngan, T. Sayed, A. Abdelfatah, Impacts of various parameters on transit signal priority effectiveness, *Journal of Public Transportation*, 7(3) (2004) 4.
- [5] L. Zhou, Y. Wang, Y. Liu, Active signal priority control method for bus rapid transit based on Vehicle Infrastructure Integration, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(2) (2017) 99-109.
- [6] W. Smith, W. Airbrake, Study of evolutionary urban transportation, US Department of Housing and Urban

عادی می‌شود. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

استفاده از این روش قابلیت گسترش به کل شبکه حمل و نقل شهری به عنوان یک روش جدید برای افزایش مطلوبیت و تشویق مردم به استفاده از سیستم حمل و نقل همگانی را دارد. افزایش استفاده از حمل و نقل همگانی باعث کاهش سفرهای خودروی شخصی می‌شود. کاهش سفرهای خودروی شخصی کاهش ترافیک در معابر شهری، کاهش مصرف سوخت و بهبود شاخص‌های زیست محیطی را می‌تواند به همراه داشته باشد. همچنین هزینه‌های گردانندگان و مسافری را کاهش می‌دهد.

این پژوهش بر روش کنترل اولویت دهی به حمل و نقل همگانی در یک تقاطع متمرکز شده و برنامه و الگوریتم ارائه شده برای آن طراحی شده است و براساس شرایط واقعی شبیه سازی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی میانگین تأخیر مسافری اتوبوس تندرو را تا ۶۵ درصد و میانگین تأخیر مسافری اتوبوس عادی را ۷ درصد نسبت به روش کنترل چراغ موجود بهبود می‌بخشد. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

- based traffic responsive signal control optimization, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 14(3) (2013) 1278-1289.
- [11] J. Hu, B.B. Park, Y.-J. Lee, Coordinated transit signal priority supporting transit progression under connected vehicle technology, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55 (2015) 393-408.
- [12] E. Christofa, K. Ampountolas, A. Skabardonis, Arterial traffic signal optimization: A person-based approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 66 (2016) 27-47.
- [13] Y. Wadjas, P. Furth, Transit signal priority along arterials using advanced detection, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1856) (2003) 220-230.
- Development, 1 (1968).
- [7] L. Head, D. Gettman, Z. Wei, Decision model for priority control of traffic signals, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1978) (2006) 169-177.
- [8] J. Ding, M. Yang, W. Wang, C. Xu, Y. Bao, Strategy for multiobjective transit signal priority with prediction of bus dwell time at stops, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2488) (2015) 10-19.
- [9] R. Li, C. Zheng, W. Li, Optimization Model of Transit Signal Priority Control for Intersection and Downstream Bus Stop, Mathematical Problems in Engineering, 2016 (2016).
- [10] E. Christofa, I. Papamichail, A. Skabardonis, Person-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Akbarzadeh , A. R. Ghafari, Evaluation of the Impacts of Unconditional Active Transit Signal Priority in VISSIM, Case Study: A Corridor in Isfahan, Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 201-212.

DOI: [10.22060/ceej.2019.14571.5687](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14571.5687)



