Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 45-48
DOI: 10.22060/ceej.2019.14571.5687

Evaluation of the Impacts of Unconditional Active Transit Signal Priority in VISSIM, Case Study: A Corridor in Isfahan

A. R. Ghafari, M. Akbarzadeh*

Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ABSTRACT: The implementation of the priority system for transit at signalized intersections with high traffic volumes will help reduce transit delays and red lights stop at these intersections. In this paper, we propose an unconditional active signal priority control method for the public transportation system, which includes regular buses and a Bus Rapid Transit. we examined 11 different modes of bus availability at the intersection, based on the estimated time of transit arrival. Reduce transit delays at the intersection, increase the convenience and reliability of public transportation, increase the total intersection efficiency and reduce the negative impact on personal vehicles are also considered. Finally, a simulation model was conducted by VISSIM by writing an algorithm modeling in VisVAP for the Keshavarzi-Daneshgah corridor with BRT and regular bus in Isfahan City, Iran. the results showed that, due to the implementation of this method, BRT passengers' delay decreased by an average of 65% and decrease regular bus passengers' delay by an average of 7% compared to existing signal control scenarios.

Review History:
Received: 6/9/2018
Revised: 3/18/2019
Accepted: 4/5/2019
Available Online: 6/11/2019

Keywords:
TSP
Public Transportation
Simulation
VISSIM
BRT

1. INTRODUCTION

Traffic congestion is rapidly increasing in cities. It leads to an increase in transit travel time and loss in the reliability of transit vehicles, so increasing the usage of the public transportation system requires improved services and increased utilities. Using intelligent systems is one of the ways to solve the traffic problem. One of the results of the use of intelligent systems is the timing of traffic lights with implementing transit signal priority (TSP). The implementation of a priority system for transit at signalized intersections with high traffic volumes will help to reduce traffic delays and red lights stop at these intersections. However, previous research has shown that the impacts and benefits of a TSP application are subjective and depend on its surrounding environment (such as signal timing settings, congestion, levels, etc.) [1].

Transit signal priority at signalized intersections is an operational strategy that changes the timing of the lights in which the public transport vehicles can cross the intersection with minimum conflict with red lights. This priority is applied by increasing the green time or reducing red time in the bus approach, [2]. TSP can reduce unintended transit delays at signalized intersections, increase the convenience and reliability of public transportation and increase the total intersection efficiency. It also has the potential for reducing bus punctuality, [3]. At the same time, TSP attempts to provide these benefits with a minimum of impact on other facility users. On the other hand, TSP has two major negative consequences. Changing the lights settings for transit will increase the delay at the crossroads. Also, increasing the passage of a priority route may lead to more traffic in upstream flow [4].

This research presents a real-time, unconditional signal control system for signal priority on conflicting transits. It proposes a TSP method for a public transportation system which includes regular buses and a Bus Rapid Transit (BRT), that minimize total delay while it assigns priority to the transit vehicles. In this research 11 different modes of bus availability at the intersection, based on the estimated time of transit arrival were examined. Passenger delays at the intersection, increase the convenience and reliability of public transportation, increase the total intersection efficiency and reduce the negative impact on personal vehicles are also considered. Finally, a simulation model was conducted by VISSIM by writing an algorithm model for signalized intersections in VAP.

2. METHODOLOGY

An unconditional transit signal priority model is formulated to optimize intersection signal phasing for minimizing transit delay at an intersection by using four methods of green extension, red truncation, phase insertion, and phase rotation.

The proposed algorithm is based on the information

*Corresponding author's email: makbarzadeh@cc.iut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

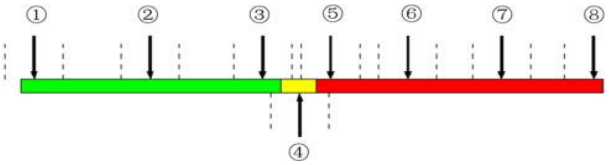


Fig. 1. Different modes of the arrival of transit to an intersection.

received from the detectors located inroads which obtain location information and speed of the vehicles. So the arrival time of transit is strictly predictable.

2.1. Transit travel time predicting model

· BRT

The arrival time of BRT to the stop line can be predicted immediately after its detection at the upstream flow. For BRT with a special line, the travel time predicting model is:

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

$t_{ATS,R}$: Average amount of predicted bus arrival time to the stop line

$t_{s,r}$: The bus travel time from the detection point to the stop line at the intersection

$t_{t,r}$: The stopping time of BRT at the station for a condition that exists a station after the detector.

The time interval at which the BRT reaches the intersection can be obtained using t_{ATS} and σ_r:

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

The following equation is used to determine the location of the BRT arrival time cycle:

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

$t_{now,r}$: the moment BRT detected

C_T: cycle time

· Bus

Bus arrival time to the stop line can be predicted after its detection at the upstream flow. For a bus moving with traffic flow, the travel time predicting model can be written as:

$$\begin{cases} t_{ATS,B} = t_{s,b} + t_{t,b} + \dfrac{N^b_{j,T}}{s_j} & t_{b,T} \in G_{i,T} \\ t_{ATS,B} = t_{s,b} + t_{t,b} + \dfrac{N^b_{j,T}}{s_j} + \left(t_T + R - t_b\right) & t_{b,T} \in R_{j,T} \end{cases} \quad (4)$$

$t_{ATS,B}$: Average amount of predicted bus arrival time to the stop line

$t_{s,b}$: The bus travel time from the detection point to the stop line at the intersection when there is no vehicle

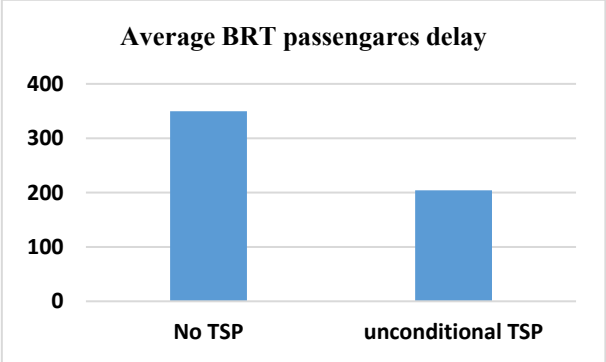


Fig. 2. Average BRT passengers delay.

$t_{t,b}$: The stopping time of the bus at the station for a condition that exists a station after the detector

s_j: saturation flow rate

$N_{j,T}^{B}$: The number of vehicles in front of the bus to reach the stop line at the intersection

t_T: The cycle start time

R: Spent time from the beginning of cycle T to the end of the red phase where the bus is detected.

t_b: the moment of bus detected

The time interval at which the bus reaches the intersection can be obtained using $t_{ATS,B,}$ and σ_b:

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

The following is used to determine the location of the BRT arrival time cycle:

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

Eight arrival modes may occur based on the location of the transit arrival time to the stop line, as shown in Fig. 1. Each arrival mode has its prioritization method.

Other arrival modes of transits to an intersection which considered in this paper are as follows:

9. The transits of two facing approaches that have different phases arrive at the same time at the intersection.

10. More than one bus is reaching the intersection from one approach.

11. Transits arrive at the intersection from conflicting approaches

ESULTS AND DISCUSSION

To test the TSP model, a simulation model was conducted by VISSIM by writing an algorithm model for signalized intersections in VAP for Keshavarzi-Daneshgah corridor with BRT and regular buses in Isfahan City, Iran.

The results showed that, due to the implementation of this method, BRT passenger's delay decreased by an average of 65%, and regular bus passenger's delay decrease by an average of 7% compared to existing signal control scenarios. Also, the total intersection efficiency increase by 4%. The results showed that BRT stops decrease by 78% which leads to decrease fuel consumption and also increase reliability.

CONCLUSIONS

TSP is arousing increasingly research interests all around the world, mainly because of its benefits to the road network. Unconditional TSP appears to be a more feasible alternative due to its easier satisfied technical requirements. This method can extend to the entire urban transport network as a new method to encourage travelers to choose transit mode for their travels hence mitigate traffic congestion. It also reduces fuel consumption that improves environmental indicators. It also reduces operational costs and passenger costs. However, unconditional TSP can increase total passenger's delay in peak hours.

REFERENCES

[1] V. Ngan, T. Sayed, A. Abdelfatah, 2004. "Impacts of various parameters on transit signal priority effectiveness, Journal of Public Transportation". *Journal of transportation engineering*, 7(3)

[2] F. Dion, H. Rakha, Y. Zhang., 2004. "Evaluation of potential transit signal priority benefits along a fixed-time signalized arterial". *Journal of transportation engineering*, 130(3), pp. 294–303.

[3] Y. Ji, B. Hu, J. Han, D. Tang, 2014. "An improved algebraic method for transit signal priority scheme and its impact on traffic emission". *Mathematical Problems in Engineering,* 2014(2014).

[4] Y. Lin, X. Yang, N. Zou, M. Franz., 2015. "Transit signal priority control at signalized intersections: a comprehensive review", *Transportation Letters,* 7(3), pp. 168-180

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 45-48.

DOI: 10.22060/ceej.2019.14571.5687

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۰۱ تا ۲۱۲
DOI: 10.22060/ceej.2019.14571.5687

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

خلاصه: گرایش مسافران به حمل ونقل عمومی می تواند باعث کاهش استفاده از خودرو در شهرها شود و کاهش ترافیک، کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا را به دنبال داشته باشد. اولویت دهی به حمل ونقل همگانی در تقاطع های چراغ دار شلوغ به کاهش تأخیر ناشی از ترافیک و برخورد با چراغ قرمز در این تقاطع ها کمک می کند و باعث افزایش اطمینان پذیری این سامانه می شود. در این مقاله، روشی برای اولویت دهی فعال به حمل ونقل همگانی در یک تقاطع شامل اتوبوس های عادی و خط ویژه اتوبوس های تندرو (BRT) ارائه شده است. اهداف مورد توجه شامل کاهش تأخیر مسافران اتوبوس، افزایش قابلیت اعتماد سامانه حمل ونقل 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 وزن دهی به اتوبوس‌های عادی، اتوبوس‌های تندرو و خودروهای شخصی، تأثیر حضور اتوبوس و حجم تردد خودرو در هر رویکرد بصورت کمّی در نظر گرفته شد. برای افزایش مزایای مسافرین، یازده حالت مختلف از رسیدن اتوبوس به تقاطع بررسی شد. با نوشتن الگوریتم متناسب، تقاطع سهروردی در شهر اصفهان در نرم‌افزار VISSIM شبیه سازی 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 می یابد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۷/۱۲/۲۷
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱

کلمات کلیدی:
VISSIM
TSP
حمل ونقل همگانی
سامانه اتوبوس تندرو
شبیه سازی

۱- مقدمه

افزایش میزان استفاده از سامانه حمل‌ونقل همگانی مستلزم بهبود خدمات و افزایش مطلوبیت آن است. معمولاً حمل ونقل 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، می تواند باعث ایجاد مزیت و در نتیجه رقابت‌پذیری آنها با خودروهای سواری شود. همچنین، انتقال حق عبور از گونه شخصی به گونه همگانی را می‌توان 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 تقاطع هاست. یکی از نتایج استفاده از سیستم‌های هوشمند، امکان زمان‌بندی چراغ های راهنمایی با رعایت اولویت خودروهای حمل‌ونقل همگانی (TSP[1]) است که از دهه ۱۹۶۰به عنوان یکی از روش‌های کاهش زمان سفر اتوبوس در شریان های شهری معرفی شده است [۱]. اولویت‌دهی به حمل‌ونقل همگانی در تقاطع های چراغ‌دار به این معنی است که زمان‌بندی چراغ به گونه‌ای انجام شود

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

1 Transit signal priority

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

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 نتجه 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 می دهد 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 اتوبوس ها 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، تغیر توالی فاز و افزودن فاز.

هدف این پژوهش، به دست آوردن و ادغام اطلاعات حمل ونقل و اجرای کنترل هماهنگ مسافران، وسایل نقلیه و تقاطع ها به منظور بهبود شرایط حمل‌ونقل همگانی در تقاطع ها، با استفاده از فن آوری های پیشرفته و شبکه های حسگر است. اتوبوس ها در هنگام عبور از تقاطع با پیاده سازی الگوریتم های خاصی از روش های ویژه، مانند افزایش زمان سبز و کاهش زمان قرمز برای عبور از چهارراه استفاده می کنند [۵]، تا مطلوبیت عملکرد سیستم اتوبوس تندرو و اتوبوس عادی به طور قابل توجهی بهبود یابد.

اسمیت و همکاران در سال ۱۹۶۸جز اولین نفراتی بودند که استفاده از اولویت دهی به سیستم حمل ونقل همگانی را به سمت اتوبوس و برای کاهش زمان سفر این وسیله نقلیه بردند [۶]. هد در سال ۲۰۰۶ با ارائه هسته ای برای سیگنال های ترافیکی امکان آنالیز رفتارهای پیچیده را فراهم کرد که برای اجرای TSP در حالات پیچیده (چهارراه های نیازمند به اجرای TSP در چند جهت) به کار می رود [۷]. دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با در نظر گرفتن شاخص های ترافیکی و شاخص های زیست محیطی به عنوان اهداف چندگانه، الگوریتمی برای اجرای TSP در خطوط اتوبوس تندرو با پیش بینی مدت زمان توقف در ایستگاه ها ارائه دادند و مدل را برای سامانه تندروی شهر گوانگژو چین شبیه سازی کردند و نشان دادند که این روش باعث کاهش نرخ توقف اتوبوس و تأخیرات آن می شود و همچنین آلودگی در چهارراه ها کاهش می یابد و در شرایط افزایش حجم ترافیک معبر، TSP شرایط عملکرد بهتر اتوبوس تندرو را فراهم می کند [۸]. روی لی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از الگوریتم ژنتیکی مدلی برای بهینه سازی TSP مسافر مبنا برای کاهش تأخیر مسافران در دسترسی به حمل ونقل همگانی را شبیه‌سازی کردند [۹]. کریستف و همکاران در سال ۲۰۱۳ روش بهینه‌سازی TSP فرد مبنا 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 می دهد و اولویت برای اتوبوس ها در جریان متقاطع را بر اساس میزان اشغال آنها ایجاد می کند روش خود را فرمول بندی کردند [۱۰]. هو و همکاران در سال ۲۰۱۵ با ارائه روش بهینه سازی TSP بر مبنای تأخیرات افراد و در چهارراه های هماهنگ سازی 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 می داد. 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 زمان بندی عقب باشد و اجرای TSP باعث افزایش مجموع تأخیرات نگردد [۱۱]. کریستفا و همکاران در سال ۲۰۱۶ روی بهینه سازی چراغ راهنمایی بر اساس کاهش تأخیرات افراد در خیابان های شریانی در شرایط حقیقی پژوهش انجام دادند. در این پژوهش نویسندگان با گسترش پژوهش های قبلی به کل خیابان و در شرایط وجود چند خط حمل ونقل عمومی در یک شریان که می توانند در چهارراه با یکدیگر برخورد نیز داشته باشند و همچنین در نظر گرفتن صفوف چهارراه ها بسیاری از مشکلات TSP را حل نموده و میزان تأخیرات را کاهش داده اند 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 داده اند [۱۲]. یان و پیتر در سال ۲۰۱۴ با توجه به وابستگی این روش به محل قرارگیری حسگرها و زمان و

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 درکاهش ترافیک و افزایش رضایت مسافران در استفاده از حمل ونقل 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 وکاهش زمان سفر کل مسافران شبکه رفت. با افزایش تقاضای استفاده از سیستم حمل ونقل 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 فروانی خصوصاً در زمینه نحوه اجرا و الگوریتم ها دارد.

۲- روش پژوهش

این پژوهش یک الگوریتم جهت کنترل اولویت دهی به حمل ونقل 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 دقیقا 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 فاز و تغییر توالی فازها در ازای انجام تحلیل های پیچیده به صورت آنی و دائمی در تقاطع استفاده شده است.

اهداف اجرای این روش شامل افزایش راحتی و اطمینان مسافرین به حمل ونقل همگانی، کاهش تأثیرات منفی ناشی از اجرای این طرح در یک رویکرد، افزایش مطلوبیت حمل ونقل همگانی، و کاهش تأخیرات مسافرین 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 می‌یابد 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 می‌گیرد که کمینه زمان سبز جریان متقاطع سپری شده باشد؛

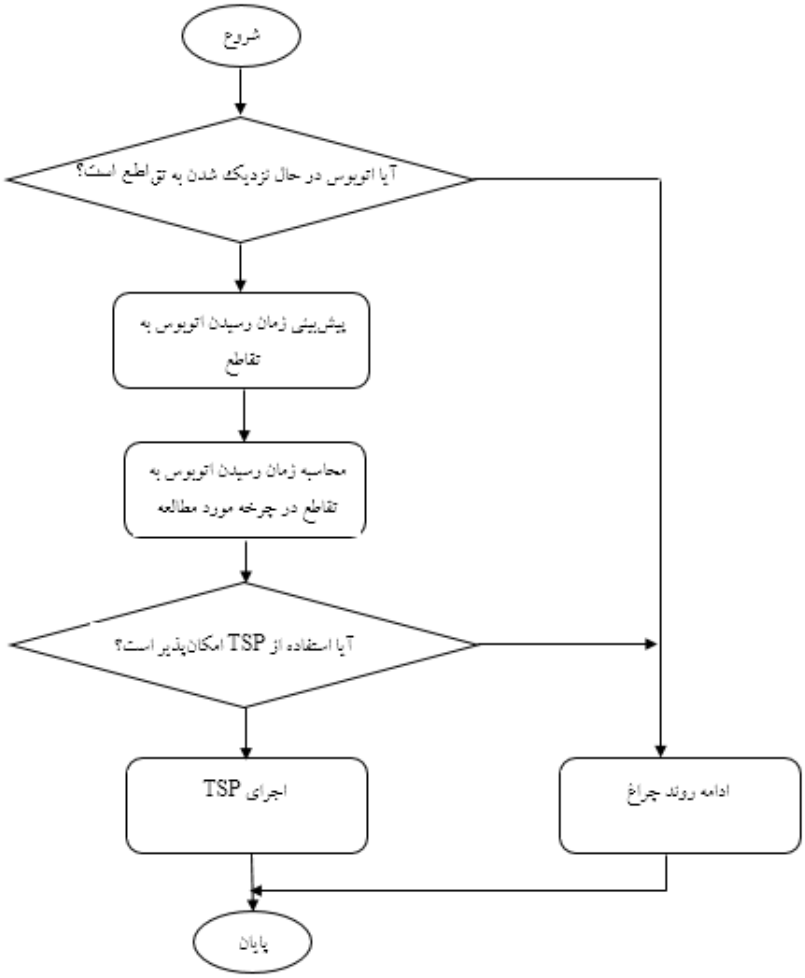
۳- تمام فازهای یک چرخه باید اجرا شوند.

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.



شکل ۱.فرآیند اولویت‌دهی به سیستم حمل‌ونقل همگانی

Fig. 1. Mechanism of Transit Signal Priority

۳- فرآیند اولویت دهی به سیستم حمل ونقل همگانی

فرآیند اولویت دهی به سیستم حمل ونقل همگانی در یک تقاطع را می توان به شکل الگوریتم ساده شده ای که در شکل ۱ نشان داده شده است تعریف کرد. الگوریتم متناسب با تقاطع مورد مطالعه در نرم افزار VisVAP نوشته شد و در شبیه سازی چراغ مورد استفاده قرار گرفت. در فرآیند برنامه ریزی 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.

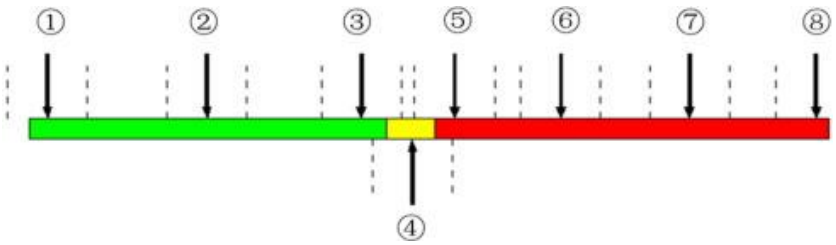
۳-۱- مدل پیش‌بینی زمان سفر اتوبوس

۳-۱-۱- اتوبوس تندرو

زمان رسیدن اتوبوس تندرو به خط توقف را می‌توان بلافاصله پس 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 اتوبوس های 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.

$$t_{ATS,R} = t_{s,r} + t_{t,r} \quad (۱)$$



شکل ۲. حالت‌های مختلف از زمان رسیدن یک اتوبوس به تقاطع

Fig. 2. Different States of Arrival Time of Bus to the Junction

که در این رابطه $t_{ATS,R}$ مقدار متوسط پیش‌بینی زمان ورود اتوبوس تندرو به خط توقف؛ $t_{s,r}$ زمان سفر اتوبوس تندرو از محل شناسایی تا خط توقف در تقاطع است که با داشتن اطلاعات مکان و سرعت اتوبوس تندرو قابل‌محاسبه است و $t_{t,r}$ زمان توقف اتوبوس تندرو در ایستگاه برای حالتی که بعد از تشخیص اتوبوس تندرو 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 تندرو به تقاطع می‌رسد را می‌توان با استفاده از t_{ATS} و σ_r در معادله (۲) به دست آورد.

$$\left[t_{ATS,R}-\sigma_r, t_{ATS,R}+\sigma_r\right] \qquad (۲)$$

۳-۱-۲ مشخص کردن زمان ورود اتوبوس تندرو در چرخه

مقدار متوسط، حد پایین و حد بالای بازه زمانی رسیدن اتوبوس تندرو به تقاطع باید در یک چرخه و فازهای آن قرار گیرد تا در صورت نیاز به اجرای TSPروش اجرای آن را بتوان مشخص کرد. از رابطه زیر برای تعیین محل این مقادیر در چرخه استفاده می‌شود.

$$mod\left(\left[t_{now,r}+t_{ATS,R}-\sigma_r, t_{now,r}+t_{ATS,R}+\sigma_r\right], C_T\right) \qquad (۳)$$

که در آن $t_{now,r}$ لحظه‌ای که اتوبوس اتوبوس تندرو 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 تندرو در مراحل مختلف ممکن است اتفاق بیفتد. هر حالت ورودی دارای روش اولویت‌دهی مربوط به خود است.

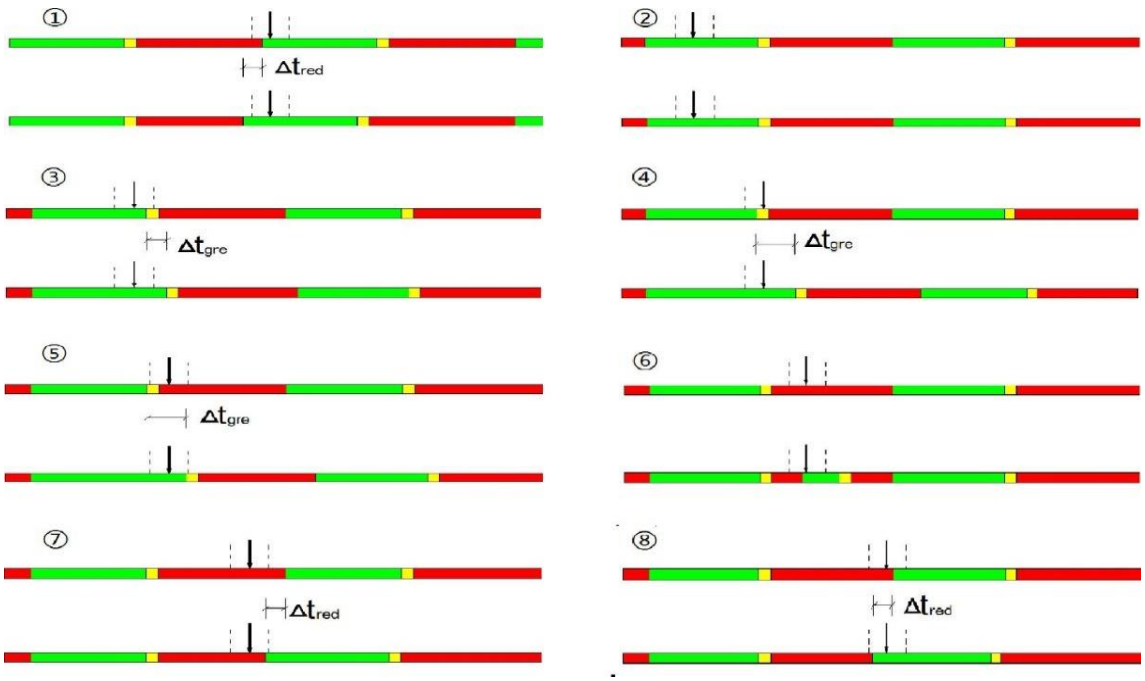
۳-۱-۳ اتوبوس عادی

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 به‌اندازه 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 به‌عنوان 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.

$$\begin{cases} t_{ATS,B}=t_{s,b}+t_{t,b}+\dfrac{N^b_{j,T}}{s_j} & t_{b,T}\in G_{i,T} \\ t_{ATS,B}=t_{s,b}+t_{t,b}+\dfrac{N^b_{j,T}}{s_j}+\left(t_T+R-t_b\right) & t_{b,T}\in R_{j,T} \end{cases} \qquad (۴)$$

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 تندرو 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؛ $\mathrm{N^b_{j,T}}$ تعداد خودروهای جلو اتوبوس تا رسیدن به خط توقف در تقاطع؛ t_T زمان شروع چرخه T؛ R زمان سپری‌شده از ابتدای چرخه T تا پایان



شکل ۳. حالتهای محتلف رسیدن یک اتوبوس به تقاطع

Fig. 3. Different States of Bus Arrival to the Junction

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.

$$\left[t_{ATS,B}-\sigma_b, t_{ATS,B}+\sigma_b\right] \quad (۵)$$

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.

$$mod\left(\left[t_{now,b}+t_{ATS,B}-\sigma_b, t_{now,b}+t_{ATS,B}+\sigma_b\right], C_T\right) \quad (۶)$$

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

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- حالت های 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 اتوبوس ها 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.

$$t_{red} = \min\left[\sigma, r - g_{n,min}\right] \quad (۷)$$

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 صادرشده 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:

$$t_{gre} = \min\left[\sigma, g_{tmax} - g_t\right] \quad (۸)$$

در این رابطه t_{gre} برابر افزایش طول زمان سبز در مرحله اولویت‌دهی به اتوبوس؛ g_{tmax} 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 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.

$$t_{gre} = \min\left[2\sigma, g_{tmax} - g_t\right] \quad (۹)$$

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:

$$t_{(rot)} = \max\left[t_{ATS,R} - \sigma, \sum_{i}^{m-1}(g_i + y_i) + g_{m,min}\right] \quad (۱۰)$$

$t_{(rot)}$ 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.

$$t_{(rot)} = \max\left[t_{ATS,B} - \frac{N^{b}_{j,T}}{s_j}, \sum_{i}^{m-1}(g_i + y_i) + g_{m,min}\right] \quad (۱۱)$$

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 تندرو:

$$t_{red} = \min\left[(t_T + R) - (t_{ATS,R} - \sigma), (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1}(g_i + y_i) - g_{nmin}\right] \quad (۱۲)$$

برای اتوبوس عادی:

$$t_{red} = \min\left[(t_T + R) - \left(t_{ATS,B} - \frac{N^b_{j,T}}{s_j}\right), (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1}(g_i + y_i) - g_{nmin}\right] \quad (۱۳)$$

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:

$$t_{red} = \min\left[2\sigma, (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1}(g_i + y_i) - g_{nmin}\right] \quad (۱۴)$$

برای اتوبوس عادی:

$$t_{red} = \min\left[\frac{N^b_{j,T}}{s_j}, (t_T + R) - \sum_{i=1}^{n-1}(g_i + y_i) - g_{nmin}\right] \quad (۱۵)$$

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:

$$t_{ins} = \min\left[t_{ATS,R} - \sigma, \sum_{i}^{n-1}(g_i + y_i) + g_{n,min}\right] \quad (۱۶)$$

برای اتوبوس‌های عادی:

$$t_{ins} = \min\left[t_{ATS,B} - \frac{N^b_{j,T}}{s_j}, \sum_{i}^{n-1}(g_i + y_i) + g_{n,min}\right] \quad (۱۷)$$

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 می شود، 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.

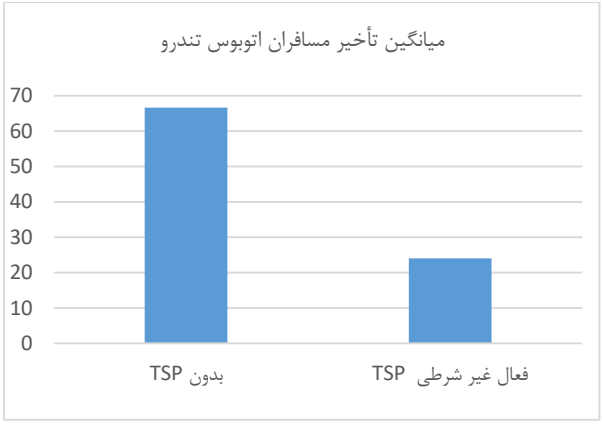
۴- شبیه سازی و نتایج

برای آزمایش الگوریتم ارائه شده، تقاطع سهروردی در شهر اصفهان که در مسیر خط ۱ اتوبوس تندرو قرار دارد و به دلیل ترافیک پرحجم در این تقاطع و قرارگرفتن آن در شریان های اصلی شهر جز تقاطع‌های مهم به حساب می آید در نظر گرفته شد و اطلاعات مربوط به حجم های 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 واقع گرایانه تری 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 می آید، 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.

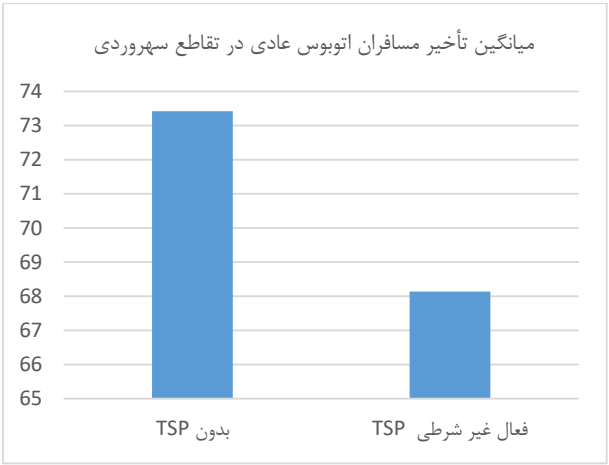
پس اجرای شبیه سازی های مورد نیاز برای دو حالت شرایط فعلی تقاطع و شرایطی که چراغ راهنمایی تقاطع با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برنامه ریزی شده باشد نتایج استخراج گردید.

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



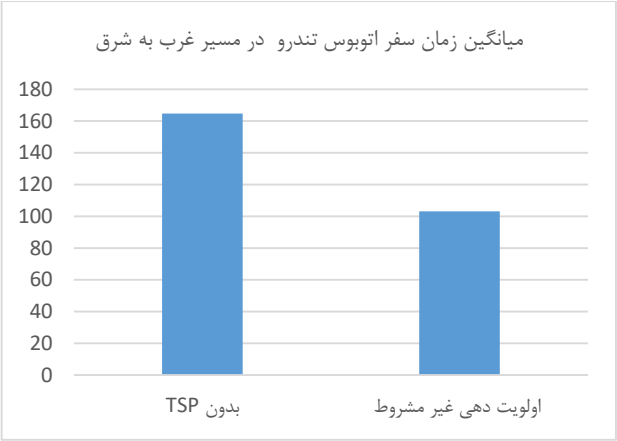
شکل ۴. نمودار مقایسه‌ای میانگین تأخیر مسافران اتوبوس تندرو عبوری از تقاطع

Fig. 4. Comparison of Average Delay of Passengers of BRT Passing the Junction



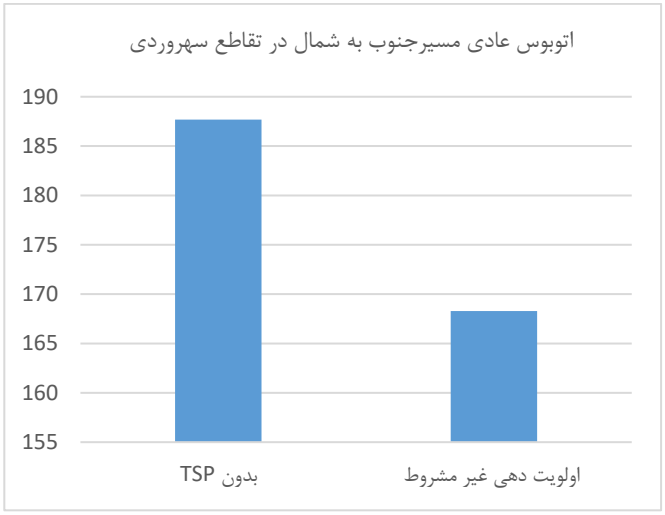
شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای میانگین تأخیر مسافران اتوبوس عادی عبوری از تقاطع

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

عادی می شود. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می یابد.

۵- نتیجه گیری

استفاده از این روش قابلیت گسترش به کل شبکه حمل ونقل شهری به عنوان یک روش جدید برای افزایش مطلوبیت و تشویق مردم به استفاده از سیستم حمل ونقل همگانی را دارد. افزایش استفاده از حمل ونقل همگانی باعث کاهش سفرهای خودروی شخصی می شود. کاهش سفرهای خودروی شخصی کاهش ترافیک در معابر شهری، کاهش مصرف سوخت و بهبود شاخص های زیست میحطی را می تواند به همراه داشته باشد. همچنین هزینه های گردانندگان و مسافرین را کاهش می دهد.

این پژوهش بر روش کنترل اولویت دهی به حمل ونقل 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 می دهد که روش پیشنهادی میانگین تأخیر مسافرین اتوبوس تندرو را تا ۶۵ درصد و میانگین تأخیر مسافرین اتوبوس عادی را ۷ درصد نسبت به روش کنترل چراغ موجود بهبود می بخشد. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می یابد. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

در آینده، می توان 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

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-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.

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

این صفحه عمداً خالی است