Karafan

Quarterly Scientific Journal of National University of Skill

Autumn 2025, Vol. 22, No. 3, p. 335-355

Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en

:10.48301/kssa.2025.494106.3086

Agent-Based Simulation for Reducing Pollution and Delay at Signalized Intersections

Farzad Azhari[1], Amir Abbas Rassafi[2*], Nasser Pourmoallem[3]

[1] M.Sc., Department of Transportation Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
[2] Professor, Department of Transportation Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
[3] Department of Transportation Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 28.12.2024
Revised: 09.04.2025
Accepted: 14.12.2025

Keyword:
Traffic Delay
Air Pollution
Signalized Intersection
Agent-Based Simulation
Optimization

[*]Corresponding Author:
Amir Abbas Rassafi
Email: *rasafi@eng.iku.ac.ir*

ABSTRACT

The increase in the number of motor vehicles and population growth has led to intensified traffic congestion, reduced efficiency of transportation systems, increased air pollution, and higher fuel consumption. This study employs agent-based simulation to investigate the impact of traffic factors, including traffic light timing and changes in the geometric design, on traffic indicator (delay) and environmental indicators (pollutant levels) at a signalized intersection in Qazvin city. In this regard, six scenarios with various combinations of signal timing (green times of 25, 35, and 45 seconds) and geometric design (adding or not adding an exclusive left-turn lane) were designed, and the impact of each scenario on five response variables—namely delay, carbon dioxide, nitrogen oxides, carbon monoxide, and hydrocarbons—was examined. The simulations for different scenarios were conducted in the NetLogo software environment, and the optimal scenario for reducing traffic delay and air pollution was identified through pairwise comparison using the t-test. The results indicate that selecting an appropriate geometric design and traffic light timing can reduce air pollution by up to 30% and traffic delay by up to 38%. This study demonstrates that the application of agent-based simulation can significantly contribute to improving urban traffic management and reducing environmental impacts without the need for implementing policies in the real world, which often require substantial time and cost.

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Excessive consumption of fossil fuels such as oil, gasoline, and natural gas has led to significant environmental pollution and adverse health impacts. Among the major contributors, vehicle operations at signalized intersections play a critical role in urban traffic-related emissions. Studies indicate that 35–40% of travel time in urban centers is caused by delays at intersections. Since vehicular emissions at intersections are directly proportional to delays induced by traffic signals, minimizing delays can significantly reduce environmental pollution. With the advent of computational simulation, traditional rigid models have evolved, allowing a more comprehensive representation of real-world systems. Agent-based modeling (ABM) has emerged as a robust approach to simulate interactions among individuals and policies in complex environments. In ABM, three primary components—agents, environment, and time—are defined, where agents possess specific attributes and objectives, enabling interactions with other agents. This methodology facilitates the assessment of traffic management policies under various geometric designs and signal timing scenarios. The present study aims to identify optimal strategies to minimize traffic delays and environmental impacts at intersections using agent-based simulation, considering six distinct scenarios and testing the hypotheses that signal timing and the presence of dedicated left-turn lanes affect delays and emissions.

Methodology

The study focuses on Valiasr Intersection in Qazvin city as a case study. The intersection includes four approaches and multiple traffic movements. An agent-based model was implemented using NetLogo software to simulate vehicles (mobile agents) and traffic lights (stationary agents). Vehicles were assigned constant acceleration rates and interacted with traffic lights based on proximity, speed, and lane occupancy. The geometric layout of the intersection in the simulation closely mirrored the real-world design, including dedicated left-turn lanes where applicable. Three signal green-time levels (25, 35, and 45 seconds) were evaluated across six scenarios that combined the presence or absence of dedicated left-turn lanes with these green-time durations. For each scenario, 100 simulation runs were conducted to generate statistically significant data. Traffic performance was assessed using delay indices, and environmental impact was evaluated by calculating emissions of CO2, NOX, CO, and HC using Vehicle Specific Power (VSP) methodology. Statistical analysis, including t-tests for independent samples, was applied to compare scenarios and identify the optimal policy in terms of traffic efficiency and environmental performance.

Results And Discussion

The simulation results demonstrated that the scenario combining a green time of 25 seconds with dedicated left-turn lanes in the east-west and west-east directions (CD25 scenario) provided the best overall performance. Compared to other scenarios, CD25 achieved the lowest traffic delays and minimized emissions across all pollutants measured. Statistical comparisons confirmed significant differences between scenarios, emphasizing the critical role of signal timing and geometric lane configuration in traffic and environmental outcomes. Sensitivity analysis revealed that increasing green time or

removing dedicated left-turn lanes led to higher delays and elevated emissions, while integrating dedicated left-turn lanes significantly enhanced traffic flow efficiency and reduced pollutant concentrations. These findings highlight the importance of coordinated signal timing and geometric optimization in urban intersections. By leveraging agent-based simulation, policymakers can anticipate the impacts of traffic management strategies, optimize intersection performance, and reduce urban traffic-related environmental burdens.

Conclusion

This study confirms that optimizing both traffic signal timing and intersection geometry can substantially reduce vehicle delays and emissions at urban signalized intersections. Among the six scenarios tested, the CD25 scenario—incorporating a green-time of 25 seconds and dedicated left-turn lanes in specific approaches—proved most effective in improving traffic efficiency and minimizing environmental impact. The results provide actionable insights for traffic engineers and urban planners to implement policies that enhance intersection performance, promote sustainable urban mobility, and mitigate environmental pollution. Future research could expand this methodology to multiple intersections, integrate real-time adaptive signal control, and consider varying vehicle types to further improve traffic and environmental outcomes.

کارافن
فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت
پاییز ۱۴۰۴، دوره ۲۲، شماره ۳، ۳۵۵-۳۳۵
آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir
doi:10.48301/kssa.2025.494106.3086

شبیه‌سازی عامل‌مبنا برای کاهش آلودگی و تأخیر در تقاطع‌های هم‌سطح چراغ‌دار

فرزاد اظهری[۱]، امیرعباس رصافی[۲*]، ناصر پورمعلم[۳]

۱-دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.
۲- استاد، گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.
۳- گروه برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

کلید واژگان:
تاخیر ترافیک
آلودگی هوا
تقاطع چراغ‌دار
شبیه‌سازی عامل‌مبنا
بهینه‌سازی

***نویسنده مسئول:** امیرعباس رصافی
پست الکترونیکی:
rasafi@eng.iku.ac.ir

چکیده

افزایش تعداد وسایل نقلیه موتوری و رشد جمعیت، منجر به تشدید ترافیک، کاهش کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل، افزایش آلودگی هوا و مصرف سوخت شده است. این پژوهش با به‌کارگیری شبیه‌سازی عامل‌مبنا، تأثیر عامل‌های ترافیکی شامل زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی و تغییرات در طرح هندسی تقاطع را بر شاخص‌های ترافیکی (تاخیر) و محیط زیستی (میزان آلاینده‌ها) در یک تقاطع چراغ‌دار در شهر قزوین بررسی می‌کند. در این راستا، شش سناریو با ترکیب‌های گوناگون از زمان‌بندی چراغ (زمان‌های سبز ۲۵، ۳۵ و ۴۵ ثانیه) و نوع طرح هندسی (افزودن یا عدم افزودن خط چپ‌گرد اختصاصی) طراحی شده، و تاثیر انتخاب هر سناریو بر پنج متغیر پاسخ، یعنی تاخیر، دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، مونوکسید کربن و هیدروکربن‌ها بررسی شده است. در شبیه‌سازی عامل‌مبنا، خودروها به‌عنوان عامل‌های مستقل در نظر گرفته شده‌اند که بر اساس قوانین حرکتی و تعامل با چراغ‌های راهنمایی، رفتار خود را تنظیم می‌کنند. شبیه‌سازی‌ها برای سناریوهای مختلف (هر سناریو ۱۰۰بار) در محیط نرم‌افزار NetLogo اجرا شده‌اند و سناریوی بهینه از نظر کاهش تاخیر ترافیکی و آلودگی هوا با مقایسه جفت سناریوها از طریق آزمون t مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب طرح هندسی مناسب و زمان‌بندی بهینه چراغ‌های راهنمایی می‌تواند تا ۳۰٪ از آلودگی هوا و ۳۸٪ از تاخیر ترافیکی بکاهد. این پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری شبیه‌سازی عامل‌مبنا می‌تواند به بهبود مدیریت ترافیک شهری و کاهش اثرات زیست‌محیطی، بدون نیاز به اجرای سیاست‌ها در محیط واقعی (که مستلزم هزینه و زمان قابل توجهی است)، کمک شایانی کند.

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰
شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

به دلیل مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی مانند نفت، بنزین و گاز و تأثیرات منفی آن بر سلامتی انسان‌ها، نیاز به کاهش مصرف سوخت و به تبع آن کاهش آلایندگی‌ها احساس می‌شود. طبق آمارهای رسمی، بخش عمده‌ای از این آلودگی‌ها مربوط به مصرف سوخت در وسایل نقلیه و خودروها است [۱; ۲]. یکی از بحرانی‌ترین نقطه‌ها در شبکه‌ی حمل‌ونقل، از جهات گوناگون نظیر ایمنی و آلودگی تقاطع‌های چراغ‌دار هستند [۳]. تراکم ترافیک در این بخش از شبکه باعث تاخیر شده و درنتیجه زمان استفاده از خودرو را افزایش داده و باعث آلودگی بیشتر می‌شود. به‌طوریکه ۳۵ تا ۴۰ درصد زمان سفر در مراکز شهرها، ناشی از تأخیر به وجودآمده در تقاطع‌ها است [۴]. از آنجاکه تولید آلودگی خودرو در تقاطع‌ها رابطه‌ی مستقیمی با تأخیر به وجودآمده ناشی از چراغ دارد، هنگامی که تأخیر کمینه شود، آلودگی ناشی از خودرو نیز کمینه می‌شود.

از سوی دیگر با پیدایش شبیه‌سازهای کامپیوتری، انعطاف‌ناپذیری مدل‌های کلاسیک کاهش یافته و می‌توان جنبه‌های بیشتری از سیستمی که قصد مدل‌سازی آن شده است را وارد مدل کرد [۵]. این روش که به شکل مصنوعی رفتارها و تعاملات افراد و سیاست‌ها را در یک محیط مدل سازی می‌کند، امکان بررسی اثرات متقابل و پیچیده‌ی عوامل مختلف را فراهم می‌کند [۶]. محاسبات مبتنی بر عامل، یکی از قوی‌ترین فناوری‌ها برای توسعه سیستم‌های پیچیده توزیع یافته است. فناوری عامل‌های هوشمند میتوانند به خصوص از طریق شبیه سازی و سناریو سازی، قابلیت همکاری و تعامل و توانایی محاسبه توزیع‌یافته سیستمهای اطلاعات متمرکز را بهبود بخشند [۷]. در روش شبیه‌سازی عامل‌مبنا، سه عنصر اصلی و متقابل، یعنی عامل، محیط و زمان مشخص می‌شوند [۸]. عامل‌ها بر اساس ویژگی‌های خود تعریف می‌شوند و هر عامل هدفی خاص در یک محیط دارد و می‌تواند در طول زمان با عامل‌های دیگر تعامل داشته باشد. استفاده از روش شبیه‌سازی عامل‌مبنا، امکان ارزیابی اثرات سیاست‌های حمل‌ونقل مختلف در محیط‌های پیچیده را فراهم می‌کند [۹].

هدف این مطالعه، انتخاب سیاست بهینه به منظور کاهش اثرات مخرب محیط‌زیستی و ترافیکی تقاطع‌ها با استفاده از شبیه سازی عامل‌مبنا و در شرایط مختلف طرح هندسی و زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی است. بدین منظور شش سناریو مطرح شده و پس از اجراهای متعدد فرضیه‌های زیر آزموده می‌شوند:

- زمان‌بندی چراغ بر تأخیر و آلودگی محیط زیستی تأثیر می‌گذارد.
- وجود خط چپ‌گرد اختصاصی تأخیر و آلودگی محیط زیستی را کاهش می‌دهد.

ادامه این مقاله به این شکل سازماندهی شده است که پس از مرور منابع، روش شناسی پژوهش شامل معرفی مدل عامل‌مبنا و پیاده‌سازی آن بیان می‌شود. سپس، داده‌های مورد استفاده تشریح شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل آماری ارائه می‌گردد. در نهایت، با تفسیر نتایج، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاربردی ارائه می‌شود.

مرور منابع

روش شبیه‌سازی عامل‌مبنا به پژوهشگران و تصمیم‌گیران ابزاری قدرتمند می‌دهد تا در زمینه حمل‌ونقل بهبودهای قابل توجهی ایجاد کنند [۱۰]. روش‌های تجزیه و تحلیل سنتی اغلب ناتوان در درک تعامل پیچیده عوامل، متغیرها و فاکتورهای مختلف در سیستم‌های حمل‌ونقل امروزی هستند [۱۱]. شبیه‌سازی عامل‌مبنا به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا رفتار نهادهای فردی در شبکه حمل‌ونقل را مدل کنند [۵]. روش شبیه سازی عامل‌مبنا نه تنها به درک دقیق‌تری از سیستم‌های حمل‌ونقل کمک می‌کند، بلکه بستری را برای آزمون و بهبود مداخلات سیاست‌گذاری‌ها فراهم می‌کند. قابلیت شبیه سازی موقعیت‌های مختلف در یک محیط کنترل شده، به تصمیم‌گیران این امکان را می‌دهد که تأثیرات سیاست‌های جدید را قبل از اجرا ارزیابی کنند [۱۲]. این رویکرد پیش‌بینی‌پذیر به کاهش ریسک‌های مرتبط با تغییرات سیاست‌ها کمک می‌کند و به بهبود کلیت کارایی و اثربخشی سیستم‌های حمل‌ونقل کمک می‌کند [۱۳].

شبیه‌سازی در حمل‌ونقل

استفاده از شبیه سازی رایانه‌ای به ابزاری حیاتی در مطالعه و بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل برای پژوهشگران تبدیل شده است. این ابزار قدرتمند این امکان را به پژوهشگران می‌دهد که بدون نیاز به مداخله در سیستم حقیقی، عملکرد و عواقب سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل را در شرایط متنوع و تحت تأثیر عامل‌های مختلف، مدل‌سازی و ارزیابی کنند [۱۰].

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در حوزه حمل‌ونقل امکان پیش‌بینی و ارزیابی تأثیرات مختلف را بر عملکرد سیستم فراهم می‌کند. با شبیه‌سازی می‌توان تغییرات در شرایط محیطی، حجم ترافیک، نقشه‌های مسیر و سناریوهای مختلف را مدل سازی کرده و اثرات آنها را بر عملکرد سیستم حمل‌ونقل به دقت بررسی کرد. این ابزار امکان اجرای آزمایش‌های گوناگون را فراهم می‌کند که با توجه به پیچیدگی سیستم‌های حمل‌ونقل، از اهمیت بسزایی برخوردار است.

همچنین، شبیه سازی رایانه‌ای نقش مهمی در افزایش پیش‌بینی‌پذیری تصمیم‌گیری‌های مرتبط با سیستم حمل‌ونقل دارد [۱۱]. با مدل‌سازی دقیق و شبیه‌سازی تأثیرات مختلف، تصمیم‌گیران می‌توانند از پیش ببینند چگونه تغییرات در زیر ساخت‌ها، فناوری‌ها یا سیاست‌ها می‌توانند بر عملکرد سیستم حمل‌ونقل تأثیر بگذارند. این اطلاعات ارزشمند به آن‌ها کمک می‌کند تا تصمیمات بهینه‌ای را در زمینه بهبود کیفیت و بهره‌وری حمل‌ونقل شهری اتخاذ کنند و به مسائل مرتبط با ترافیک پاسخ دهند.

شبیه‌سازی تقاطع‌ها

تقاطع‌ها به عنوان نقاط حیاتی و اتصالی در سیستم حمل‌ونقل شهری، نقش بسیار مهمی را در فعالیت روزانه‌ی شهرنشینان ایفا می‌کنند. مدیریت کارا و بهینه این نقاط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نقص در این بخش می‌تواند به تنظیم نامناسب جریان ترافیک و افزایش زمان سفر منجر

شود. به منظور بهبود کارایی و اثربخشی این قسمت از شبکه‌ی حمل‌ونقل، از شبیه سازی رایانه‌ای به عنوان ابزاری حیاتی برای ارزیابی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

بررسی اثرات طرح‌های مختلف کنترل ترافیک در محیط واقعی گاهی ممکن نیست، اما با بهره‌گیری از شبیه‌سازی رایانه‌ای، مدیران ترافیک می‌توانند به دقت اثرات هر طرح را پیش‌بینی کرده و میزان کارایی آن را مورد سنجش قرار دهند [۱۲]. این امکان به آن‌ها این اجازه را می‌دهد که قبل از اجرای عملیات در دنیای واقعی، گزینه‌های مختلف را مورد ارزیابی دقیق قرار داده و تصمیمات منا سبی اتخاذ کنند.

همچنین، از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌توان به بهینه‌سازی امکانات حمل‌ونقل همگانی در تقاطع‌ها پرداخت. این مهم به مسئولان امکان می‌دهد تا با در نظر گرفتن ترافیک، نیازهای شهروندان و عوامل محیطی، سیستم حمل‌ونقل شهری را به صورت هوشمندانه‌تری طراحی و مدیریت کنند [۱۳]. به این ترتیب، شبیه سازی رایانه‌ای نه تنها به بهبود جریان ترافیک کمک می‌کند بلکه اقدام مؤثری نیز در جهت ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان و بهره‌وری حمل‌ونقل شهری است.

شبیه‌سازی تقاطع‌های چراغدار

شبیه‌سازی تقاطع‌های چراغدار نقش بسیار حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد ترافیکی این تقاطع‌ها دارد، زیرا زمان‌بندی دقیق چراغ‌های ترافیکی به تناسب با شرایط مختلف ترافیکی می‌تواند تاثیر چشمگیری بر کارایی و سرعت حرکت و سایل نقلیه دا شته با شد. این امر به ویژه در مناطق شهری با جریان ترافیک بالا و تقاطع‌های پرتردد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. شبیه سازی رایانه‌ای این امکان را به مدیران ترافیک می‌دهد تا مختلف‌ترین سناریوها و زمان‌بندی‌های ممکن را به صورت مجازی اجرا کرده و بهینه‌سازی انجام شود [۱۴].

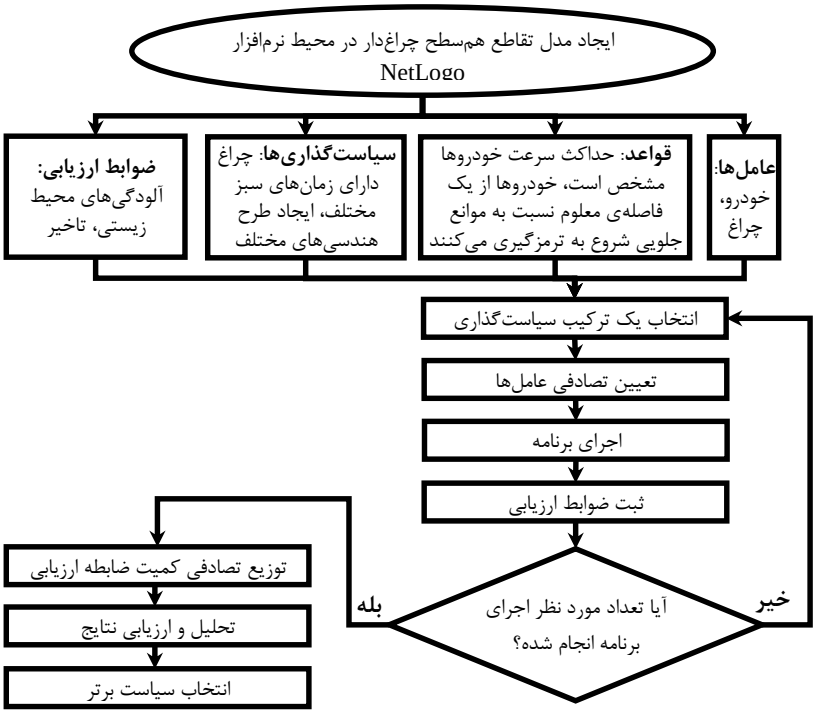
با بهره‌گیری از شبیه‌سازی رایانه‌ای در زمینه تقاطع‌های چراغدار، می‌توان به عنوان یک ابزار پیشرفته در پیش‌بینی و کاهش آلاینده‌های محیطی ناشی از توقف‌های مکرر در این تقاطع‌ها اقدام کرد. با بهینه سازی زمان‌بندی چراغ‌ها، میزان توقف و تاخیر و سایل نقلیه در تقاطع‌ها کمینه می شود که در نتیجه کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود کیفیت هوا و همچنین کاهش آلودگی صوتی ناشی از تقاطع را به همراه دارد [۱۵; ۱۶].

همچنین، این ابزار می‌تواند در مطالعه تأثیر تغییرات در نقشه‌های ترافیکی شهر، جمع‌آوری داده‌های ترافیکی در شرایط مختلف و ارزیابی اثرات پروژه‌های بهبود ترافیکی در این تقاطع‌ها به کار رود. در نتیجه، تأثیرگذاری شبیه‌سازی رایانه‌ای در بهبود امکانات حمل‌ونقل و بهره‌وری ترافیکی در شهرها بیانگر اهمیت آن به عنوان یک ابزار استراتژیک در مدیریت ترافیک و محیط زیست است.

روش تحقیق

شکل ۱ فلوچارت روش مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل دیده می شود ابتدا محیط شبیه دنیای واقعی ایجاد شده، سپس سناریوی مورد نظر انتخاب می شود، سپس برای دستیابی به توزیع مناسبی از داده‌ها هر سناریو ۱۰۰ بار اجرا می‌شود و در نهایت، با ترکیب اطلاعات شبیه‌سازی و نتایج ارزیابی‌ها، بهترین سیاست‌گذاری‌ها برای نمونه موردی (تقاطع ولی‌عصر در شهر قزوین) را شناسایی می کند تا مشکلات ترافیکی و آلودگی را به حداقل برساند و حالت بهینه تقاطع را تعیین کند.

با استفاده از کدنویسی در شبیه ساز کامپیوتری نت‌لوگو[۱۷]، تقاطع ولی‌عصر در شهر قزوین تحت شرایط مختلف سیا ست‌گذاری و با رعایت ضوابط ارزیابی ترافیکی و محیط زیستی مورد سنجش قرار می‌گیرد. شکل ۲ نمایی از تقاطع شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

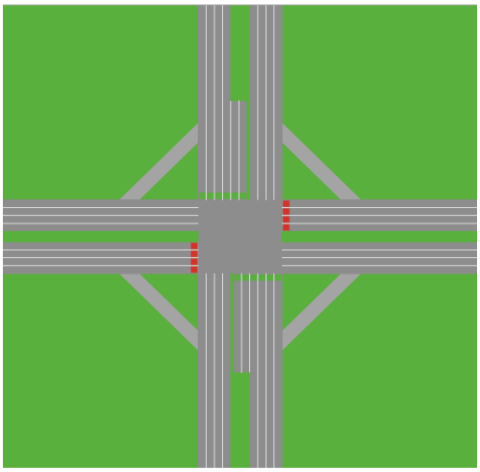


شکل ۱. فلوچارت روش پژوهش

طرح هندسی فضای تقاطع در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار به نحوی پیاده‌سازی شده است که در حد ممکن به واقعیت نزدیک باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در هر رویکرد ۴ خط تعبیه شده و

[۱] Netlogo

در هر یک از رویکردهای شمال-جنوب دو خط چپ‌گرد اختصاصی نیز وجود دارد. شبیه‌سازی‌های دینامیکی نقاط تقاطع نیاز به مقیاس‌های دقیق زمانی و مکانی دارند، زیرا سرعت تاثیرگذار بر نتایج شبیه سازی ا ست و محا سبه‌ی سرعت م ستلزم دقت در م شخ صات مکانی و زمانی ا ست. با تطابق سنجه‌های زمانی و مکانی نرم‌افزار با مقادیر مکانی و زمانی دنیای واقعی، تحلیل نتایج شبیه سازی انجام می‌شود. شکل ۲ نشان دهنده‌ی طرح هندسی تقاطع ولی‌عصر در فضای شبیه‌سازی نرم‌افزار است.



شکل ۲. طرح هندسی تقاطع ولی‌عصر در فضای شبیه‌سازی

در این مطالعه، دو عامل چراغ و خودرو تعریف شده است. چراغ‌ها در مکان‌های ثابت قرار دارند و خودروها با آن‌ها در تعامل هستند. خودروها به عنوان عامل‌های متحرک در نظر گرفته می‌شوند و چراغ‌های راهنما به عنوان عامل‌های ثابت شناخته می‌شوند. عامل متحرک خودرو دارای دو ویژگی است: مشخصات خودرو و خصوصیات رانندگان. رانندگان بر اساس خصوصیات شخصی خود، در مورد نحوه‌ی پیمایش مسیر با استفاده از خودروی خود تصمیم‌گیری می‌کنند.

تمام ارزیابی‌ها بر اساس سرعت و مکان خودرو انجام می‌شود. در شبیه‌سازی، اندازه‌ی طولی خودروها یکسان در نظر گرفته شده و افزایش یا کاهش سرعت آن‌ها بر ا ساس قوانین حرکت با شتاب ثابت انجام می‌شود. به هر خودرو یک مقدار شتاب ثابت اختصاص داده می‌شود که برای افزایش سرعت و شتاب‌گیری استفاده می‌شود. اختصاص شتاب افزایشی به خودروها براساس توزیع نرمال انجام می‌شود.

حرکت‌های با شتاب خودروها بر اساس فاصله با خودروی جلویی انجام می‌شود. بدین معنی که اگر تا یک فاصله‌ی مشخص (فاصله‌ی تغییر شتاب)، خودرویی در پیش رو وجود نداشته باشد، خودروها با توجه به شتاب ثابت (مثبت) خود، سرعت خود را افزایش می‌دهند. در صورت وجود خودروی جلویی در فاصله‌ی مشخص، خودروها با شتاب غیر ثابت (ولی بر اساس قوانین حرکت با شتاب ثابت)، سرعت خود

را کاهش می‌دهند. همچنین فاصله‌ی حساسیت برای ترمزگیری در مواجهه با چراغ‌های زرد و قرمز نیز طبق فاصله‌ی تغییر شتاب تعیین می‌شود.

خودروهایی که حرکت گردشی به راست و چپ دارند، از نزدیک‌ترین خط به جهت مسیرهای گردشی خود وارد محیط شبیه سازی می شوند (خودروهای راست‌گرد از آخرین خط سمت راست، و چپ‌گرد از آخرین خط سمت چپ). در هر یک از رویکردهای جنوبی و شمالی، دو خط چپ‌گرد اختصاصی نیز وجود دارد و خودروهایی که قصد گردش به چپ دارند ابتدا از آخرین خط (مستقیم) سمت چپ وارد محیط شده و سپس در محدوده‌ی خطوط چپ‌گرد اختصاصی به سمت آخرین خط چپ‌گرد تغییر مسیر می‌دهند. در صورتی که خودروی جلویی به این خط تغییر مسیر داده باشد (کناری‌ترین خط چپ‌گرد اشغال باشد)، خودروی مذکور به سمت دومین خط چپ‌گرد تغییر مسیر می‌دهد. در صورتی که خط دوم هم اشغال باشد، خودروی مورد نظر تا باز شدن فضا، توقف می‌کند. در این شبیه سازی فرض شده است که عابرین پیاده در زمان‌های مختص برای هر رویکرد از محل تقاطع عبور می‌کنند تا ناسازگاری با خودروها به وجود نیاید.

عامل چراغ نیز در شبیه‌سازی حائز اهمیت است و دارای ویژگی‌های مدت زمان سبز و قرمز هر چراغ است. این زمان‌بندی و ترتیب چراغ‌ها قبل از اجرای شبیه‌سازی تنظیم می‌شود و می‌توان زمان‌های سبز و قرمز مختلفی را در طول شبیه‌سازی تخصیص داد.

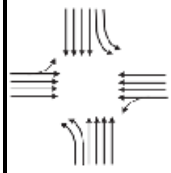
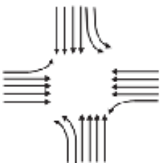
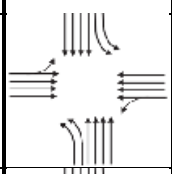
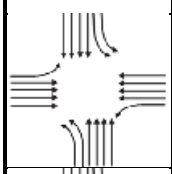
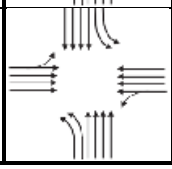
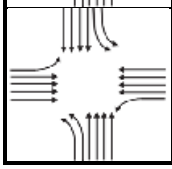
در این مطالعه، سیاست‌ها بر اساس زمان‌های سبز و طرح هندسی تقاطع به اجرا درآمده‌اند. طول چرخه و زمان سبز برای هر رویکرد، از جمله مهم‌ترین عواملی است که تأثیرگذاری عمده در عملکرد تقاطع‌های چراغ‌دار را دارد. هدف اصلی در طراحی تقاطع‌ها، کاهش تأخیرات خودروها با تخصیص کمترین زمان تاخیر به هر خودرو است. بر این اساس با استفاده از زمان‌بندی هوشمند، کوشش می‌شود جریان ترافیک بهینه شده، و کارایی تقاطع‌های چراغ‌دار افزایش یابد. این رویکردها، با ترکیب طراحی هندسی مناسب با زمان‌بندی بهینه چراغ‌ها، به‌منظور کاهش زمان تأخیر و بهبود جریان ترافیک، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴].

برای این مقاله، سه زمان سبز ۲۵، ۳۵ و ۴۵ ثانیه برای زمان‌های سبز چراغ پیشنهاد شده است. رویکردهای شرق به غرب و غرب به شرق در وضعیت موجود، خطوط چپ‌گرد اختصاصی ندارند، در حالی که با توجه به حجم چپ‌گرد تقاطع مورد نظر در این رویکردها، توصیه می‌شود که خطوط چپ‌گرد اختصاصی وجود داشته باشند [۱۸].

شبیه‌سازی در فضای گسسته سطح‌های خاص از هر عامل صورت می‌گیرد، و انتخاب تعداد عامل‌ها، تعداد سطوح، و ترکیب‌های مختلف از هر سطح برای هر عامل ضابطه مشخصی ندارد، بلکه بسته به شرایط مسئله، محدودیت‌ها، بزرگی آن، و اطلاعات و تجربه تحلیلگر برای یک مسئله واحد می‌تواند این آزمایش به صورت‌های متفاوتی طراحی شود. در خصوص مطالعه حاضر منطق انتخاب بدین صورت بود که ابتدا با توجه به جغرافیای تقاطع مورد بررسی و شرایط ترافیکی آن، دو عامل زمان سفر و طرح هندسی، عامل‌های قابل تصمیم‌گیری تشخیص داده شدند. سپس در خصوص انتخاب سطوح برای زمان

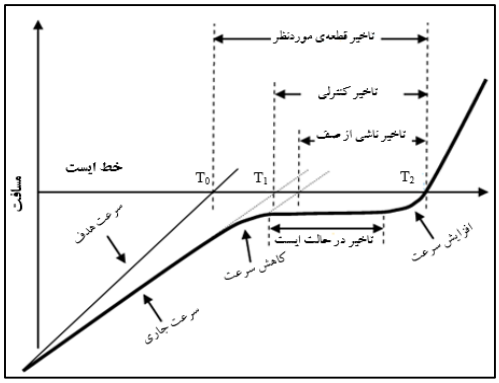
سفر، زمان‌های سبز ۲۵ و ۴۵ ثانیه به عنوان زمان‌هایی که به ترتیب به به طول چرخه (تقریبا) ۱/۵و ۳ دقیقه ختم می شوند، و زمان سبز ۳۵ در وسط این بازه به عنوان سطح‌های عامل زمان انتخاب شدند. در خصوص طرح هندسی، با توجه به آن که تقاطع در وضع فعلی دارای خط اختصاصی گردش به چپ در راستای شمال-جنوب هست، داشتن یا نداشتن (وضع فعلی) این خط برای راستای شرق به غرب به عنوان دو سطح این عامل انتخاب شد. بنابراین، شش سناریو با سه زمان سبز مختلف و وجود یا عدم وجود خطوط چپ‌گرد اختصاصی برای رویکردهای غربی و شرقی هستند. برای ارزیابی عملکرد تقاطع‌ها، دو عملکرد ترافیکی و محیط‌زیستی جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای ترافیک، شاخص تاخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای محیط‌زیست، گازهای آلاینده از خودروها اندازه‌گیری می‌شوند. جدول ۱ سناریوهای شبیه‌سازی برای این مقاله را به‌طور خلاصه شرح می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات سناریوهای شبیه‌سازی

شماره سناریو	نماد	طول زمان سبز هر رویکرد (ثانیه)	خط چپ‌گرد اختصاصی برای رویکردهای شرقی-غربی؟	گروه‌های خطی حرکت رویکردها	شماره سناریو	نماد	طول زمان سبز هر رویکرد (ثانیه)	خط چپ‌گرد اختصاصی برای رویکردهای شرقی-غربی؟	گروه‌های خطی حرکت رویکردها
۱	BD25	۲۵	خیر		۴	CD25	۲۵	بله	
۲	BD35	۳۵	خیر		۵	CD35	۳۵	بله	
۳	BD45	۴۵	خیر		۶	CD45	۴۵	بله	

این مطالعه به تحلیل و ارزیابی کیفیت عملکرد تقاطع‌های چراغ‌دار با استفاده از شبیه‌سازی سیاست‌های مبتنی بر زمان‌های سبز و طرح هندسی می‌پردازد. در اینجا، تاخیر به عنوان شاخص اصلی عملکرد ترافیکی تقاطع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که با توجه به وجود تجهیزات کنترلی (چراغ‌ها) محاسبه می شود. تأخیر خودروها بر اساس اصول شکل ۳ مدل می شود[۱۹]. در شکل ۳، مقدار - T2 T1نشان‌دهنده‌ی تاخیر کنترلی و مقدار T0 – T2 نشان‌دهنده‌ی تاخیر قطعه است [۲۰]. این تعریف برای محاسبات شبیه‌سازی استفاده می‌شود. تأخیر قطعه به تأخیری اشاره دارد که خودروها در محدوده تقاطع به دلیل وجود تجهیزات کنترلی (مانند چراغ‌ها) مجبور به کاهش و افزایش سرعت می‌شوند.

محاسبه تاخیر به صورت ناهمفزون[۲] انجام می شود. با توجه به سرعت جریان آزاد که در نرم افزار برابر با ۱۲ است، اگر خودرو با سرعت کمتر از ۱۲ حرکت کند، تاخیر بر اساس تغییر مکان خودرو به دلیل اختلاف سرعت محاسبه می‌شود. تاخیرهای خودروها در مسیرهای مختلف شامل تاخیر خودروهای مستقیم، چپ‌گرد و راست‌گرد محاسبه می شوند. این محاسبات با توجه به سرعت و شتاب خودروها انجام شده و در نهایت جمع‌بندی می‌شوند.



شکل ۳. تعریف زمانی و مکانی تاخیر [۲۰]

برای محاسبه آلودگی هوا، انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_X)، مونوکسید کربن (CO) و هیدروکربن‌ها (HC) از خودروها در محدوده‌ی شبیه‌سازی بررسی می‌شود. انتشار این آلودگی‌ها با استفاده از شاخص VSP[۳] و ویژگی‌های مختلف خودروها در هر لحظه‌ی زمانی بستگی دارد [۱۵]. شاخص VSP انرژی استفاده‌شده توسط موتور احتراق داخلی برای حرکت خودرو بوده، و با توجه به شرایط مختلف محیطی تعیین می‌شود. محاسبه آلودگی‌ها از این شیوه و با استفاده از روابط مختص به هر آلاینده انجام می‌شود.

در این بخش، تحلیل و ارزیابی نتایج با استفاده از آزمون‌های آماری مانند آزمون t (اختلاف یا عدم اختلاف معنادار تاخیر و آلودگی بین هر جفت سناریو) انجام می‌شود. برای انجام این آزمون‌ها، اولین شرط این است که توزیع ضابطه‌های ارزیابی باید نرمال باشد. این ضابطه‌های ارزیابی بر اساس سرعت و موقعیت خودروها محاسبه می‌شوند، اما سرعت نقش تعیین‌کننده بیشتری دارد [۲۱].

برای جمع‌آوری داده‌های سرعت خودروها، شتاب‌های افزایشی و کاهشی به‌صورت کاملاً تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شتاب‌ها میان خودروها و زمان‌ها متغیر است. با این ویژگی‌ها، مقادیر شاخص‌های ارزیابی نیز توزیع تصادفی دارند. پس از مشخص شدن سرعت هر لحظه‌ی خودرو، VSP

---

[۲] Disaggregate

[۳] Vehicle Specific Power (قدرت مشخصه‌ی خودرو)

متناظر با آن خودرو در آن لحظه مشخص می‌شود و حال می‌توان آلودگی‌های منتشرشده در آن لحظه را حساب کرد. جدول ۲ رابطه‌ی آلودگی‌های منتشرشده و شاخص VSP را نشان می‌دهد. در این جدول y نشان دهنده‌ی مقدار آلودگی و x نیز ارائه‌کننده‌ی مقدار شاخص VSP است. همچنین مقدار شاخص R در هر چهار فرمول نزدیک به یک است که نشان می‌دهد مدل تقریبا همه‌ی تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند.

جدول ۲. فرمول‌های محاسبه‌ی آلودگی‌ها [۱۵]

CO_2	$y = ۰/۰۹۰۷x^۲ - ۱/۴۹۴۱x + ۶/۷۵۸۸$	$R^۲ = ۰/۹۹$
NO_X	$y = ۰/۰۰۰۶x^۲ - ۰/۰۱۰۳x + ۰/۰۴۷۴$	$R^۲ = ۰/۹۸$
CO	$y = ۰/۰۰۱۵x^۲ - ۰/۰۲۵۵x + ۰/۱۳۱۷$	$R^۲ = ۰/۹۷$
HC	$y = ۰/۰۰۰۲x^۲ - ۰/۰۰۰۲۵x + ۰/۰۱۰۳$	$R^۲ = ۰/۹۹$

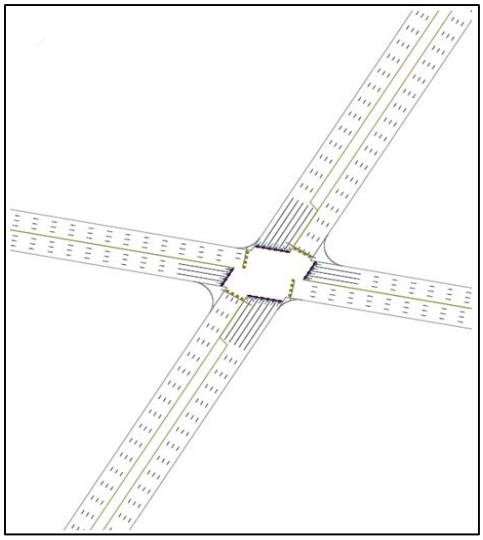
در هر سناریو، برنامه ۱۰۰ بار اجرا می‌شود و برای هر بار اجرا، ۱۰۰ فایل حاوی تمامی شاخص‌های ارزیابی ایجاد می‌گردد. سپس با استفاده از آزمون‌های آماری، سناریوهای مختلف دو به دو مورد مقایسه قرار می‌گیرند تا بررسی شود آیا سیاست جدید نسبت به سیاست قبلی بهبود یافته است یا خیر. این مقایسه‌ها با استفاده از آزمون t و محاسبه واریانس و میانگین شاخص‌ها در سناریوهای مختلف انجام می‌پذیرد. سپس بهترین سناریو از میان ۶ سناریوی تعریف‌شده انتخاب می‌شود، بدین شکل که با مقایسه میانگین شاخص‌ها در سناریوهای مختلف، سناریوی برتر را که دارای بهترین عملکرد است، شناسایی می‌کند. بدین ترتیب، بهترین سیاست از میان مجموعه سیاست‌های اعمال شده، انتخاب خواهد شد.

معرفی داده‌های مورد استفاده

تقاطع انتخابی برای مدل سازی، تقاطع ولی‌عصر در شهر قزوین است. این تقاطع در جنوب شرقی شهر قرار دارد و به عنوان ورودی به منطقه تجاری و اداری شهر معرفی می‌شود. این تقاطع دارای چهار رویکرد و سه گروه حرکتی است. تقاطع دارای مسیرهای مختلفی برای ورود و خروج خودروهاست. مدل‌سازی و شبیه‌سازی تقاطع به داده‌هایی نیاز دارد که شامل اطلاعات هندسی تقاطع، گروه‌های حرکتی و حجم تردد در ساعت اوج باشد. این اطلاعات با همکاری دانشگاه بین‌المللی امام خمینی و شهرداری قزوین جمع‌آوری شده‌اند.

طراحی تقاطع شامل چهار رویکرد و سه گروه حرکتی است که بر اساس این رویکردها و گروه‌ها، خطوط و مسیرهای ورودی و خروجی برای خودروها تعیین می‌شود. حجم تردد و حرکت‌های مختلف خودروها نیز بر اساس این تقسیم‌بندی مشخص می شود. برای مدل سازی چراغ‌های راهنمایی نیز از حجم‌های ورودی خودروها استفاده می‌شود. چرخه چراغ‌ها بر اساس این حجم‌ها طراحی می‌شود.

همچنین، نحوه ورود و خروج خودروها به تقاطع نیز توضیح داده شده است. از تصادفی‌سازی برای شبیه‌سازی ورود خودروها به تقاطع استفاده شده و تقریباً برای هر تیک زمانی، تصمیم می‌گیرد که آیا یک خودرو وارد تقاطع شود یا خیر. شکل ۴ پلان تقاطع و جزئیات هر کدام از رویکردها را به طور دقیق نشان می‌دهد.



شکل ۴. پلان تقاطع ولی‌عصر شهر قزوین

مقادیر مرتبط با هر گروه حرکتی در هر رویکرد مطابق جدول ۳ در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. همانگونه که اعداد جدول نشان می‌دهند، حجم تردد خودرو در این تقاطع بالا است و بهینه‌سازی تردد خودروها کمک شایانی به بهبود مقادیر شاخص‌های ارزیابی تقاطع می‌کند.

جدول ۳. احجام ورودی به تقاطع

نوع حرکت	جنوب به شمال	شمال به جنوب	غرب به شرق	شرق به غرب
حرکت مستقیم (veh/hr)	۸۱۶	۸۱۴	۸۰۴	۱۳۳۰
حرکت چپ‌گرد (veh/hr)	۲۶۱	۲۶۵	۲۷۹	۴۰۹

با توجه به داده‌های دریافتی، مشخص نیست که نوع و اندازه‌ی خودروها چیست، تنها تعداد آن‌ها معلوم است. باتوجه به فرمول‌های ارائه‌شده، فرض شده است که تنها سرعت خودروها بر انتشار آلودگی تأثیر دارد و نوع خودرو تأثیری ندارد. اما طول خودرو بر نتایج اولیه‌ی شبیه سازی تأثیرگذار است و این تأثیر ناشی از سرعت و جایگیری خودروها در خطوط است. به همین دلیل، فرض شده که همه خودروها در شبیه‌سازی طول یکسانی به اندازه‌ی ۱۳ پچ (مقیاس شبیه‌سازی) دارند.

برای رویکردهای جنوب به شمال و شمال به جنوب که دارای خطوط چپ‌گرد اختصاصی هستند، تمامی خودروهای دارای حرکت چپ‌گرد از این خطوط برای انجام حرکت گردشی استفاده می‌کنند. با توجه به استفاده تصادفی از این خطوط، نمی‌توان نسبتی برای استفاده از دو خط در هر رویکرد تعیین کرد.

در رویکردهای شرق به غرب و غرب به شرق که در حالت پایه خطوط چپ‌گرد اختصاصی ندارند، حرکات گردشی به چپ از طریق خطوط اشتراکی انجام می شود. اما این مطالعه سناریوهایی با ایجاد خطوط چپ‌گرد اختصاصی برای این رویکردها را نیز بررسی می‌کند. در این سناریو، خودروهای دارای حرکت چپ‌گرد در صورت وجود خودروی نزدیک در خط چپ‌گرد اختصاصی، از خطوط مشترک با خودروهای مستقیم استفاده می‌کنند و در غیر این صورت مسیر خود را تغییر می‌دهند. در نهایت، با وجود خطوط چپ‌گرد اختصاصی، نمی‌توان نسبتی برای استفاده از خطوط برای خودروهای حرکت چپ‌گرد در هر دو حالت خطوط چپ‌گرد و خطوط اشتراکی مستقیم تعیین کرد. جدول ۴ و جدول ۵ ترتیب فازها و گروه‌های خطی و حرکتی را نشان می‌دهند.

جدول ۴. فازبندی و تعیین گروه‌های خطی و حرکتی در حالت بدون خط چپ‌گرد اختصاصی

رویکرد	شماره فاز	تعداد خطوط	حرکات خطوط	گروه‌های حرکتی	گروه‌های خطی
غربی	۱	۴	۱: مستقیم و چپ ۲: مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:
شرقی	۲	۴	۱: مستقیم و چپ ۲: مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:
شمالی	۳	۶	۱: چپ ۲: مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:
جنوبی	۴	۶	۱: چپ ۲: مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:

جدول ۵. فازبندی و تعیین گروه‌های خطی و حرکتی در حالت وجود خط چپ‌گرد اختصاصی

رویکرد	شماره فاز	تعداد خطوط	حرکات خطوط	گروه‌های حرکتی	گروه‌های خطی
غربی	۱	۵	چپ مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:
شرقی	۲	۵	چپ مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:
شمالی	۳	۶	چپ مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:
جنوبی	۴	۶	چپ مستقیم	۱: ۲:	۱: ۲:

ارائه‌ی نتایج و تجزیه و تحلیل آن

برای محاسبه تاخیر و میزان انتشار آلودگی خودروها، نوع حرکت و موقعیت مکانی آن‌ها و سرعت آن‌ها مؤثر هستند. به منظور دستیابی به توزیع مناسب داده‌ها، هر یک از سناریوها ۱۰۰ بار اجرا شده است و مقادیر میانگین شاخص‌های ارزیابی در این ۱۰۰ اجرا برای مقایسه سناریوها استفاده شده است. این مقایسه با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام می‌شود [۲۲].

برای بررسی دوبه‌دوی سناریوهای شبیه‌سازی، از آزمون t دو نمونه‌ای مستقل استفاده می‌شود. قبل از انجام این آزمون‌ها، شرط اصلی آزمون t، نرمال بودن توزیع‌ها در هر یک از شاخص‌های ارزیابی است. آزمون‌های نرمال‌بودن با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و آزمون ویلکاکسن تک‌نمونه‌ای انجام می‌شوند.

نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان می‌دهد که توزیع شاخص‌های CO_2، NOX و CO نرمال هستند. همچنین نتایج آزمون ویلکاکسن نیز نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع شاخص‌های HC و تاخیر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تمام شاخص‌های ارزیابی دارای توزیع نرمال هستند.

هدف از ایجاد سناریوهای جدید و شبیه‌سازی، بررسی تأثیرات تغییرات سناریوها بر مقادیر شاخص‌های ارزیابی است. مقایسه یک به یک سناریوها با استفاده از مفاهیم برابری یا عدم برابری واریانس‌ها و میانگین‌ها، و با استفاده از آزمون t دو نمونه‌ای انجام می‌شود. اگر فرضیه برابری واریانس‌ها در مقایسه‌های یک به یک تایید شوند، دامنه‌ی تغییرات شاخص‌ها در دو سناریوی مورد مقایسه با یکدیگر برابر است. در صورتی که فرضیه برابری تایید نشود، می‌توان نتیجه گرفت که دو سناریو با یکدیگر متفاوت هستند و تفاوت معناداری دارند (جدول ۶). برای مقایسه دوبه‌دوی تمام سناریوها با یکدیگر، لازم است ابتدا فرضیه برابری واریانس‌ها و میانگین‌های شاخص‌ها بین جفت سناریوها تایید شود. اگر اختلاف‌ها معنادار باشند و نتوان واریانس‌ها و میانگین‌ها را برابر فرض کرد، این نشان‌دهنده وجود تفاوت معنادار بین سناریوهاست.

سناریوی با کمترین مقادیر شاخص‌ها به عنوان سناریوی برتر انتخاب می‌شود، زیرا شاخص‌های ارزیابی تاثیر منفی دارند. برای شناسایی حالت بهینه‌ی سناریو از گزارش همسانی توکی استفاده می‌شود. بر اساس نتایج، سناریوی با طرح هندسی تغییریافته و زمان سبز ۲۵ ثانیه به عنوان سناریوی برتر تشخیص داده شده است. در این سناریو، مقادیر تمام شاخص‌های ارزیابی در حداقل خود قرار دارند. جدول ۷ رتبه‌بندی سناریوها و شکل ۵ درک بصری مقایسه مقادیر شاخص‌های ارزیابی میان سناریوها را به خوبی نشان می‌دهد.

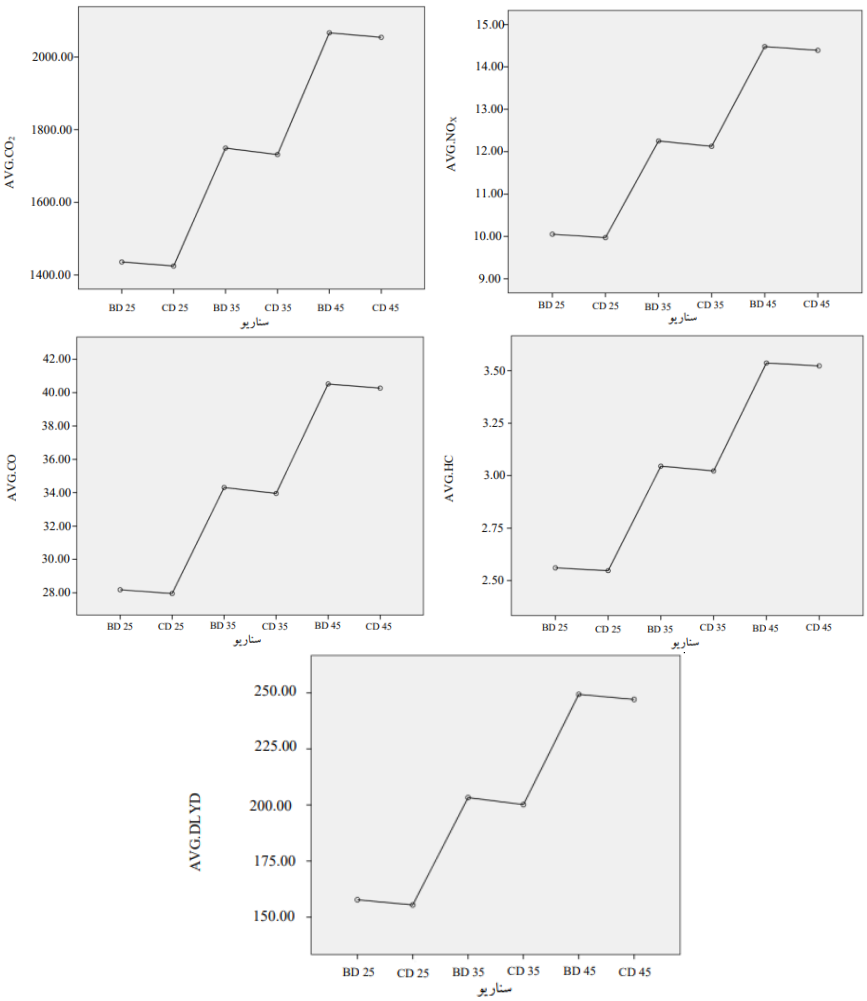
سناریو شماره دو، که در آن زمان سبز هر رویکرد برابر ۲۵ ثانیه تعیین شده و برای رویکردهای شرق به غرب و غرب به شرق یک خط چپ‌گرد اختصاصی اضافه شده است، به عنوان سناریوی برتر شناخته شده است. در این سناریو، تقاطع‌ها دارای زمان‌های سبز ۲۵، ۳۵ و ۴۵ ثانیه و طرح‌هندسی در دو حالت با و بدون خط چپ‌گرد اختصاصی برای رویکردهای غربی و شرقی شبیه سازی شده‌اند. در نتیجه، تأثیر تغییر زمان سبز و وجود یا عدم وجود خط چپ‌گرد اختصاصی در میانگین شاخص‌های ارزیابی در این سناریو مورد سنجش قرار گرفته است. جدول ۸ نیز خلاصه‌ای از نتایج حاصل از این تحلیل حساسیت را به نمایش می‌گذارد.

جدول ۶. بررسی فرضیه برابری واریانس‌ها و میانگین‌های هر شاخص در مقایسه دو به دوی سناریوها

سناریوهای مورد مقایسه		آیا فرضیه برابری واریانس‌های دو سناریو تایید می‌شود؟					آیا فرضیه برابری میانگین‌های دو سناریو تایید می‌شود؟				
		CO_2	NO_X	CO	HC	DLYD	CO_2	NO_X	CO	HC	DLYD
BD25	BD35	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD25	BD45	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD25	CD25	بله	بله	بله	بله	بله	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD25	CD35	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD25	CD45	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD35	BD45	بله	بله	بله	بله	بله	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD35	CD25	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD35	CD35	بله	بله	بله	بله	بله	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD35	CD45	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD45	CD25	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD45	CD35	بله	بله	بله	بله	بله	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
BD45	CD45	بله	بله	بله	بله	بله	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
CD25	CD35	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
CD25	CD45	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر
CD35	CD45	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر

جدول ۷. رتبه‌بندی سناریوها از لحاظ مقادیر کمتر شاخص‌های ارزیابی

رتبه	سناریوها	میانگین مقادیر شاخص‌های ارزیابی سناریوها				
		CO_2	NO_X	CO	HC	DLYD
۱	CD25	۱۴۲۴/۷۶۱۸	۹/۹۷۲۱	۲۷/۹۵۳۵	۲/۵۴۷۱	۱۵۵/۳۸۷۷
۲	BD25	۱۴۳۵/۹۳۶۸	۱۰/۰۵۱۷	۲۸/۱۷۷۳	۲/۵۶۰۷	۱۵۷/۷۱۲۰
۳	CD35	۱۷۳۱/۵۰۰۱	۱۲/۱۲۵۴	۳۳/۹۵۵۵	۳/۰۲۲۷	۲۰۰/۱۴۱۲
۴	BD35	۱۷۴۹/۴۵۱۸	۱۲/۲۵۲۴	۳۴/۳۱۰۸	۳/۰۴۵۵	۲۰۳/۲۸۶۱
۵	CD45	۲۰۵۴/۲۰۴۰	۱۴/۳۹۰۴	۴۰/۲۶۸۸	۳/۵۲۳۱	۲۴۷/۰۳۷۸
۶	BD45	۲۰۶۶/۷۵۶۸	۱۴/۴۷۹۴	۴۰/۵۱۷۵	۳/۵۳۷۱	۲۴۹/۳۰۳۵



شکل ۵. مقادیر شاخص‌های ارزیابی در سناریوها

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از ارائه‌ی این مقاله، تعیین طرح هندسی بهینه و زمان‌بندی مناسب برای تقاطع‌ها با هدف کاهش تاخیرهای خودروها و کمینه کردن مقادیر شاخص‌های آلودگی در محیط‌های ترافیکی است. در این مقاله، به منظور ارزیابی اثرات مختلف طرح‌های هندسی و زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی، ۶ سناریو مختلف مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. برای دستیابی به این هدف، ابتدا عوامل تاثیرگذار بر مقادیر آلودگی و تاخیرهای خودروها شناسایی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. با استفاده از این تجزیه و تحلیل‌ها، نتایج حاکی از اهمیت تغییر زمان سبز در تقاطع‌ها و اضافه‌کردن خطوط چپ‌گرد اختصاصی به رویکردهای غربی و شرقی برای بهبود کارایی و کاهش آلودگی هوا و تاخیرها در ترافیک به دست آمده است.

جدول ۸. خلاصه‌ی نتایج تحلیل حساسیت ناشی از متغیرهای تاثیرگذار

سناریو	درصد افزایش				
	CO_2	NO_X	CO	HC	DLYD
عدم وجود خط چپ‌گرد اختصاصی در رویکردهای غربی و شرقی	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۵	۱/۵
عدم وجود خط چپ‌گرد اختصاصی در رویکردهای غربی و شرقی و افزایش ۱۰ثانیه زمان سبز هر رویکرد	۲۲/۷	۲۲/۸	۲۲/۷	۱۹/۵	۳۰/۸
عدم وجود خط چپ‌گرد اختصاصی در رویکردهای غربی و شرقی و افزایش ۲۰ثانیه زمان سبز هر رویکرد	۴۵	۴۵/۱	۴۴/۹	۳۸/۸	۶۰/۴
افزایش ۱۰ ثانیه زمان سبز هر رویکرد	۲۱/۵	۲۱/۶	۲۱/۴	۱۸/۶	۲۸/۸
افزایش ۲۰ ثانیه زمان سبز هر رویکرد	۴۴/۱	۴۴/۳	۴۴	۳۸/۳	۵۸/۹

با توجه به نتایج تحلیل‌ها، سناریوی CD25 به عنوان برتر انتخاب می‌شود. این سناریو با انتخاب مقدار بهینه زمان سبز و اضافه‌کردن خط چپ‌گرد اختصاصی به رویکردهای غربی و شرقی، بهبود چشمگیری در کارایی ترافیک و کاهش آلودگی هوا و تاخیرها به همراه دارد. این نتایج تایید می‌کنند که مدیریت بهینه زمان سبز و استفاده از ابزارهای ترافیکی مناسب، می‌تواند به بهبود مسائل محیطی و ترافیکی منجر شود.

به طور خلاصه، این مطالعه به بررسی تأثیرگذاری برخی عوامل مختلف بر عملکرد ترافیک و آلودگی هوا پرداخته است. این نتایج به مدیران و تصمیم‌گیران شهری کمک می‌کند تا سیاست‌ها و تغییرات مناسبی را در ترافیک (در این‌جا زمان‌بندی و طرح هندسی) اجرا کنند، تا به واسطه کاهش تاخیر و آلودگی، در کیفیت زندگی و محیط زیست شهروندان بهبودی حاصل شود.

References

[1] Azadi, M., Dezianian, S., Navi, A., Salmani, A., Qaraati, T., & Faraji, A. (2022). *Development of a Driving Cycle Based on Data Recorded from an Electric-*

gasoline Hybrid Vehicle on Two Routes in Tehran City with K-means Algorithm (In Persian). Karafan Journal, 19(1), 629–652. https://doi.org/10.48301/kssa.2022.315133.1840

[2] Mohammad Zadeh, M., Dadashi, A., & Azadi, M. (2024). *Designing a Driving Cycle in the City of Semnan with Data Collection Using Chasing Vehicles and Clustering with the K-means Algorithm (In Persian)*. Karafan Journal, 21(3), 183–207. https://doi.org/10.48301/kssa.2024.431197.2792

[3] Asgari, M., & Boroujerdian, A. m. (2024). *Investigating the Effect of Signalized Intersections on the Safe Design of Urban Road Networks (In Persian)*. Karafan Journal, 21(1), 569–588. https://doi.org/10.48301/kssa.2024.432877.2798

[4] Yousefi, S., Rassafi, A. A., & Mirbaha, B. (2016). *Optimization of traffic signal timing based on reduction in environmental impacts (In Persian)* [M.Sc. Thesis, Imam Khomeini International University]. Imam Khomeini International University. www.ikiu.ac.ir

[5] Railsback, S. F., & Grimm, V. (2019). *Agent-based and individual-based modeling: A practical introduction*. Princeton University Press. https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691190822/agent-based-and-individual-based-modeling?srsltid=AfmBOoor2I-IUqBZtIv72MTmR0myI2icTmHOeJ4V3yFQwLfgI2DqUyVE

[6] Tesfatsion, L., & Judd, K. L. (Eds.). (2006). *Handbook of computational economics: agent-based computational economics*. Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02039-3.

[7] Akhondi, M., & Mesgari, M. S. (2023). *Agent-based Modelling for Backup Aircraft Site Selection to Decrease Flight Delay Time (Case Study: Qeshm Airlines) (In Persian)*. Karafan Journal, 20(1), 453–476. https://doi.org/10.48301/kssa.2022.334125.2047

[8] Bazzan, A. L. C., & Klügl, F. (2009). *Multi-agent systems for traffic and transportation engineering*. IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-60566-226-8

[9] Macal, C. M., & North, M. J. (2010). *Tutorial on agent-based modeling and simulation*. Journal of Simulation, 4, 151–162. https://doi.org/https://doi.org/10.1057/jos.2010.3

[10] Bonabeau, E. (2002). *Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems*. Proceedings of the national academy of sciences, 99(suppl_3), 7280–7287. https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.082080899

[11] Waddell, P. (2002). *UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning*. Journal of the American planning association, 68(3), 297–314. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01944360208976274

[12] Batty, M. (2009). *Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. MIT Press.

[13] Zhuge, C., & Shao, C. (2018). *Agent-based modelling of locating public transport facilities for conventional and electric vehicles*. Networks and

Spatial Economics, 18, 875–908. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11067-018-9412-3

[14] Wei, H., Zheng, G., Gayah, V., & Li, Z. (2019). *A survey on traffic signal control methods* (1904.08117). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.08117

[15] Rodríguez, R. A., Virguez, E. A., Rodríguez, P. A., & Behrentz, E. (2016). *Influence of driving patterns on vehicle emissions: A case study for Latin American cities*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 43, 192–206. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.008

[16] Eskandari, R., Rassafi, A. A., & Behnood, H. R. (2020). *Modelling noise in an urban intersection (A case study) (In Persian)* [Original Research]. Modares Civil Engineering journal, 20(3), 69–78. https://doi.org/http://mcej.modares.ac.ir/article-16-35615-fa.html

[17] Wilensky, U. (1999). *NetLogo* In Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. http://ccl.northwestern.edu/netlogo/

[18] Chandler, B. E., Myers, M. C., Atkinson, J. E., Bryer, T. E., Retting, R., Smithline, J., Trim, J., Wojtkiewicz, P., Thomas, G. B., Venglar, S. P., Sunkari, S., Malone, B. J., & Izadpanah, P. (2013). *Signalized intersections informational guide*. https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/2022-06/fhwasa13027.pdf

[19] Elefteriadou, L. A. (2016). *New trb publication: The highway capacity manual: A guide for multimodal mobility analysis*. TR News(306), 16–21. https://doi.org/https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews306toc.pdf

[20] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. The National Academies Press. https://doi.org/https://doi.org/10.17226/26432

[21] Bosch GmbH, R. (2018). *Automotive Handbook*. Robert Bosch. https://www.wiley.com/en-us/Automotive+Handbook%2C+11th+Edition-p-9781119911906

[22] IBM Corp. (2019). *IBM SPSS Statistics for Windows*. In (Version 26.0) IBM Corp. https://www.ibm.com/products/spss-statistics