



"Research Article"



10.71737/jpm.2025.1105762

The Effect of Urban Transportation Infrastructures on Private Car Use: A System Dynamics Approach

Ladan Shahhosseini¹, Reza Radfar^{*2}, Abbas Toloie-Eshlaghy³

(Received:2024.03.25 - Accepted:2024.07.30)

Abstract

People's travel behavior is reflected in their choice of transportation modes and is influenced by various factors. Travelling by private car often leads to numerous problems. Therefore, policymaking to shift citizens' travel behavior from private car use to public bus transportation is important. Hence, the purpose of this research is to examine the travel behavior of Tehran's residents using a system dynamics simulation model. Accordingly, after identifying the main variables affecting travel behavior through library studies and expert interviews, the hypotheses of the model were formulated. Subsequently, by drawing the cause-and-effect diagram and the stock and flow model, the relevant mathematical equations were derived and validated, and the model was then tested for accuracy and reliability. Subsequently, policies related to the three variables of the number of BRT buses, access to BRT buses and parking capacity were implemented through several scenarios. The results revealed that increasing the rate of parking construction does not lead to favorable results. Moreover, the increase in the number of BRT bus fleet alone cannot have an effective role either under current conditions or when combined with the scenarios involving reducing or increasing parking construction rates. Reducing the rate of parking alone has favorable results. Similarly, increasing the number of BRT stations yields positive results. Moreover, implementing both scenarios simultaneously- reducing the rate of parking development and expanding BRT stations- represents the most effective scenario among those analyzed.

Key Words:

public transportation, car-oriented, travel behavior, system dynamics model

1. Ph.D. Candidate, Department of Industrial management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Professor of Economic and Management Faculty, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*. Corresponding Author: r.radfar@srbiau.ac.ir

3. Professor of Economic and Management Faculty, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

1. Introduction

The use of private cars has become a major challenge for cities worldwide due to its negative externalities, such as traffic congestion and environmental pollution. Achieving sustainability in transportation and continuing economic development requires reducing the use of private cars and increasing dependence on public transportation. In Tehran, according to the obtained statistics, the demand for daily trips, the share of rides, the demand for daily car trips and the number of private cars used per day are all increasing. The current statistical situation indicates the important role of planners and policy makers in this area. In fact, travel planning seeks to create a balance between travel supply and demand, where the first depends on the capacity of the transportation network and the second on the amount of travel needs of users. Knowing the travel demand helps the planners of this area to develop the necessary infrastructure according to the actual demand or to use the maximum capacity of the existing transportation network. Understanding the factors affecting the choice of public transport travel method is very necessary for the purpose of transport planning. Therefore, this article specifically examines the long-term effect of travel supply policies (i.e., parking capacity, access to BRT stations and fleet) on the competitive behavior between choosing private cars and BRT buses in Tehran.

2. Literature review

In recent years, numerous studies have been conducted to investigate the factors influencing on the decision-making regarding the choice of travel method. Zhou and his colleagues (2023) investigated the necessary policies to reduce the use of private vehicles in an urban area in the Netherlands using an activity-based travel demand model. The results indicate that the improvement of public transportation services and small transportation network increase the potential of displacement hubs in terms of stabilizing travel displacement patterns. Also, limiting parking capacity and increasing parking costs in city centers are especially useful strategies for reducing car use. McSlan and Sperry (2023) investigated the relationship between parking requirements and car ownership in Swedish municipalities. The results of this study showed that reducing

parking minimums can be an effective policy to reduce car ownership. Khosravi et al. (2020) used system dynamics modeling to evaluate transportation demand management policies in the center of Isfahan. In this research, incentive and restriction policies were investigated in the central commercial area of Isfahan. Effective transportation policies were implemented for ten years and were ranked based on three indicators of air pollution, energy consumption and traffic flow. The results revealed that completing the metro network, developing the BRT network, improving bicycle facilities, implementing road pricing, increasing parking fees, improving bus and taxi services, enforcing the even and odd policy, and encouraging car sharing are among the most effective policies in the center of Isfahan.

3. Method

The present study aims to provide a dynamic simulation model of Tehran residents' travel behavior using advanced modeling tools, in order to conduct a more detailed analysis of the residents' travel mode choices and their consequences, thereby helping policymakers improve the behavioral anomalies in the transportation sector. In this research, the method used was descriptive and modeling in its purpose. Additionally, the variables influencing travel mode choice were identified through a review of the research literature and experts' opinions. These variables were then incorporated into a system dynamics model, enabling simulation and examination of different policies over time. This research was conducted in Tehran, using the data collected from the Tehran City Transportation Organization on the share of Tehran residents' trips made by private cars and BRT buses between 2011 to 2021. Since the system dynamics method consists of five steps, the model presented in this research was structured accordingly.

The first step in this process was to identify the problem and its boundaries. In this step, the reference variable and its past behavior were also examined. Based on this analysis, the number of private cars was identified as the main issue that this research aims to reduce. The second step focused on formulating dynamic hypotheses. In this step, the main variables affecting the problem were examined and the boundaries of the

model were determined. In this regard, after reviewing the research literature and examining previous studies, a semi-structured questionnaire was used to get the experts' opinions. The experts were first asked the main questions, and during the interview, additional questions were posed as needed, based on the flow of the discussion. Through this process and using the opinions of subject matter experts, the research variables were identified and refined for use in the next stages. Drawing on the theoretical foundations of research and experts' opinions, and based on a clear understanding of the problem, cause-and-effect loops were designed and gradually a complete diagram of cause-and-effect loops was created, ultimately providing a simplified representation of the real-world system. In this regard, one of the influential factors contributing to the undesirable behavior of choosing a private car is its high level of attractiveness.

After formulating the hypotheses, the key variables were identified including parking capacity, number of BRT buses and number of BRT stations as the independent variables and the number of private cars used per day as the dependent variable. Then, how these variables affect each other were investigated and the cause-and-effect loops were drawn. The next step was to simulate the model in the relevant software. Once the main hypotheses and the system boundaries were formed, the model could be implemented. By entering the mathematical equations and identifying the stock, flow and auxiliary variables, the stock-flow diagram was then developed. Finally, the model was simulated and implemented. By analyzing the changes in the behavior of the model over time and comparing it with what actually happened in the past, the validation of the model was done to validate its ability to predict future behavior. In this research, the status of the error index and the coefficient of determination of 97% confirmed the validity of the model for predicting the future behavior of the model. Also, another required measure to validate the model was to analyze its sensitivity in the implementation of different scenarios. Other validation tests, including the structural evaluation test, system boundary adequacy test, dimensional consistency test, equation logic test, and model behavior prediction test were also performed and had acceptable results.

4. Result

After simulating and examining the behavior of the model components over the desired thirty-year period, the values of the different variables of the model were adjusted and their effects were analyzed on the main variable, that is, the number of private cars used per day. In addition, the time step of model 1 and the time unit of the year were defined. By changing the values of parking construction rate, BRT bus purchase rate and the number of BRT stations, eight scenarios were compiled. The outputs of Vensim software regarding the first scenario or the increase in the rate of parking construction showed that the number of private cars has increased significantly with the increase in the rate of parking construction. In the second scenario which involves the reduction of the parking construction rate, the results indicated that the number of private cars will increase at a slower rate compared to the current situation. In the third scenario, that is, increasing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate at the same time, it was observed that the simultaneous application of increasing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate leads to an increase in the number of private car use. Notably, the increasing slope of the number of private cars in case of simultaneous application of the changes did not change significantly compared to the scenario in which only the parking construction rate was increased. In relation to the fourth scenario, addressing the increase in the purchase rate of BRT buses, the simulation results showed that the number of private cars after increasing the purchase rate of BRT buses was not different from the existing conditions, which means that with the increase in the purchase rate of BRT buses, the number of private cars will still be increasing with the same slope of the existing conditions. Regarding the fifth scenario, that is, reducing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate at the same time, it was observed that the simultaneous application of reducing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate led to an increase in the number of private cars but at a slower rate than under the existing conditions. In the sixth scenario regarding the increase in the number of BRT stations, the results also showed that with the increase in the number of BRT stations, the number of private cars increased but at a

slower rate. Moreover, as regards to the seventh scenario, or increasing the rate of parking construction and the number of BRT bus stations at the same time, after performing the simulation, it was observed that simultaneous increase in the rate of parking construction as well as the number of BRT stations leads to an increase in the use of private cars. In this case, the increasing trend in the number of private cars, compared to the situation where only the rate of parking construction was increased, did not change significantly, showing a slight improvement. In the eighth scenario, the simulation results after reducing the rate of parking construction and increasing the number of BRT bus stations at the same time indicated a lower slope than under the existing conditions, leading to the best performance compared to the other seven scenarios.

5. Discussion

The practical findings of the current research show that, under current situation, improving access to the BRT bus stations is more critical than expanding the BRT bus fleet. Additionally, simultaneously purchasing BRT buses and building new parking facilities cannot contribute to the reduction of private car use. This finding is important for urban planners as the simultaneous implementation of these two policies fails to encourage a shift toward BRT use. As long as the time of searching for parking decreases due to the construction of new parking construction and private cars remain attractive, merely buying BRT buses will not significantly change travel behavior toward public transportation. Finally, the practical findings reveal that choosing the BRT bus travel mode compared to a private car is only possible when, in addition to strengthening the BRT bus infrastructure, we overlook expanding car infrastructure. Helping the managers of different areas of the municipality to observe the effects of independent policies is another practical finding of this research since the results showed that contradictory decisions can lead to the loss of desirable results and the imposition of heavy costs.

Conflict of interests: none



10.71737/jpm.2025.1105762

(مقاله پژوهشی)



تأثیر زیرساخت‌های حمل و نقل شهری بر رفتار انتخاب خودروی شخصی مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم

لادن شاه حسینی^۱، رضا رادفر^{۲*}، عباس طلوعی اشلقی^۳

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۶-پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹)

چکیده

رفتار سفر افراد با انتخاب یکی از شیوه‌های سفر نمود پیدا می‌کند و تحت تأثیر عوامل مختلفی است. عواملی که منجر به انتخاب شیوه سفر با خودروی شخصی می‌گردد منجر به بروز مشکلاتی می‌شود لذا سیاست‌گذاری جهت تغییر رفتار سفر شهروندان از سفر با خودروی شخصی و تشویق آنان برای سفر با حمل و نقل عمومی از جمله اتوبوس مهم و هدف این پژوهش است. جهت تحقق این هدف، پژوهش حاضر به بررسی رفتار سفر شهروندان تهرانی در یک مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم می‌پردازد. در این راستا، پس از شناسایی متغیرهای اصلی اثر گذار بر شیوه سفر شهروندان از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با خبرگان، فرضیه‌های مدل مشخص گردید و سپس با ترسیم نمودار علت و معلولی و حالت و جریان مدل، معادلات ریاضی مربوطه مشخص و اعتبار مدل تست گردید. در ادامه، سیاست‌های مرتبط با سه متغیر تعداد اتوبوس بی‌آرتی، دسترسی به اتوبوس بی‌آرتی و ظرفیت پارکینگ در قالب چند سناریو اجرا شد. نتایج نشان داد افزایش نرخ ساخت پارکینگ نتایج مطلوبی ندارد. همچنین افزایش تعداد ناوگان اتوبوس بی‌آرتی چه در شرایط جاری و چه هم‌زمان با شرایط کاهش یا افزایش نرخ ساخت پارکینگ نمی‌تواند نقش مؤثری داشته باشد. از طرفی کاهش نرخ ساخت پارکینگ به تنهایی نتایج مطلوبی در پی دارد. همچنین افزایش تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی نسبت به شرایط موجود نتایج مطلوبی دارد و اجرای این سناریو هم‌زمان با سناریوی کاهش نرخ ساخت پارکینگ بهترین سناریو در بین سناریوها است.

واژه‌های کلیدی:

حمل و نقل عمومی، خودرو محوری، رفتار سفر، طراحی، مدل پویایی سیستم

۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

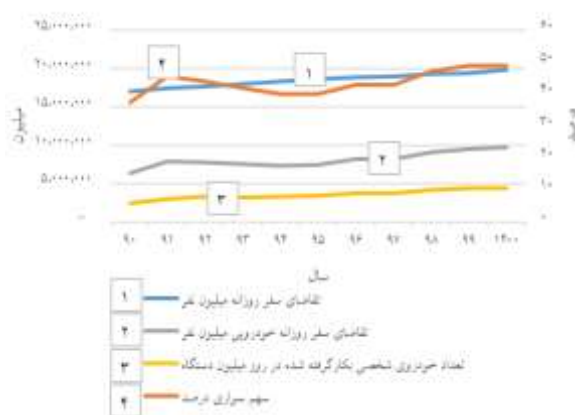
۲. استاد گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* نویسنده مسؤول: r.radfar@srbiau.ac.ir

۳. استاد گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران toloie@srbiau.ac.ir

مقدمه

استفاده از خودروهای شخصی به دلیل اثرات خارجی آن، عمدتاً در ازدحام و آلودگی محیطی، به یک مسأله اصلی برای شهرهای سراسر جهان تبدیل شده است (ریزی و مازا، ۲۰۱۷). رسیدن به پایداری در حمل و نقل و ادامه توسعه اقتصادی نیازمند رفتار کاهش استفاده از خودرو شخصی و افزایش وابستگی بیشتر به حمل و نقل عمومی است (چیو و همکاران، ۲۰۱۵). در تهران بر اساس آمار به‌دست آمده از گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل و ترافیک تهران سال ۱۴۰۰ تقاضای سفرهای روزانه در شهر تهران در حدود ۱۹/۸ میلیون نفر و سهم استفاده از خودروی شخصی اعم از سواری و وانت در این سال حدود ۴۹ درصد، سهم تاکسی ۱۸ درصد، استفاده از حمل و نقل همگانی اعم از اتوبوس و مترو حدود ۱۹ درصد و سایر موارد حدود ۱۴ درصد است. با احتساب سهم خودروی شخصی در این سال و با اعمال ضریب متوسط سفر و ضریب سرنشین برای هر خودرو، حدود ۴/۴ میلیون خودروی شخصی در روز در سال ۱۴۰۰ به‌کارگرفته می‌شود. همچنین مطابق اطلاعات آورده شده در شکل ۱، سال به سال تقاضای سفرهای روزانه، سهم سواری، تقاضای سفر روزانه خودرویی و تعداد خودروی شخصی به‌کارگرفته شده در روز میلون دستگاد.



شکل ۱. نمودار مرجع

Figure 1: Reference chart

وضعیت آماری موجود، حاکی از اهمیت اهتمام برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران این حوزه است؛ زیرا انتخاب شیوه سفر بر پایه موقعیت اجتماعی، اقتصادی و محیطی است و این شیوه سفرهای مختلف، هزینه‌های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی متفاوتی را ایجاد می‌نماید (گریزی و ون دن

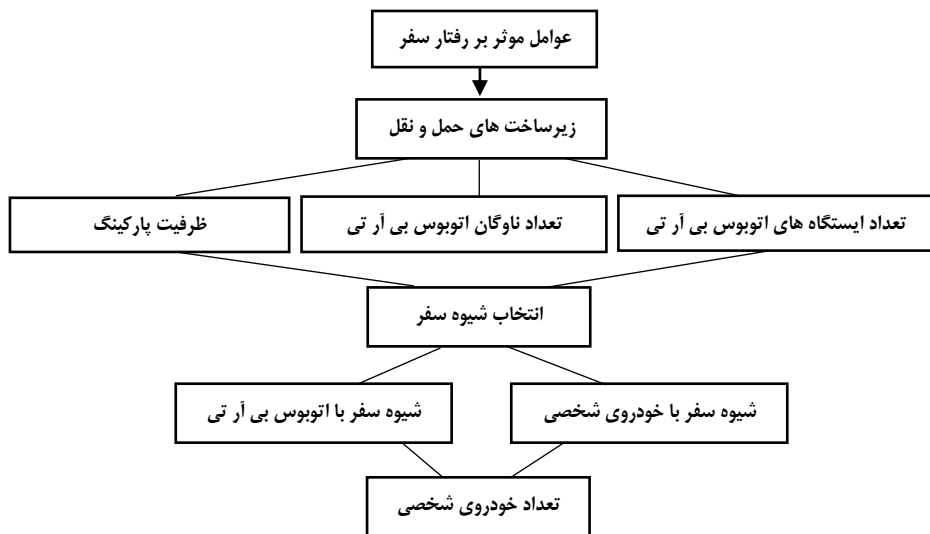
برق، ۲۰۰۸). در حقیقت برنامه‌ریزی سفر به دنبال ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضای سفر است که اولی به ظرفیت‌های شبکه حمل و نقل و دومی به میزان تولید سفر توسط مسافران بستگی دارد. شناخت تقاضای سفر به برنامه‌ریزان این حوزه کمک می‌نماید متناسب با تقاضای واقعی زیرساخت‌های لازم را توسعه دهند و یا از حداکثر ظرفیت شبکه حمل و نقلی موجود بهره برداری نمایند. به طور کلی، سفر نتیجه‌ای از رفتار انتخاب فرد است، رفتار سفر عمدتاً بر موضوعاتی مانند چه زمان، کجا و چگونه افراد سفر می‌نمایند، متمرکز می‌باشد. درک فاکتورهای اثرگذار بر انتخاب شیوه سفر حمل و نقل عمومی به منظور برنامه‌ریزی حمل و نقل بسیار ضروری است (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۶). قابلیت دسترسی بواسطه یک شیوه، احتمالاً به استفاده بیشتر از آن شیوه منجر خواهد شد (راج مانی و همکارانش، ۲۰۰۳). بیشتر مطالعات نشان داد که قابلیت دسترسی با مالکیت خودرو به طور منفی مرتبط می‌باشد (کوکلمن، ۲۰۰۸). از آنجا که رابطه بین استفاده از خودرو و در دسترس بودن پارکینگ قبلاً مورد تحقیق قرار گرفته است (لیو و همکاران، ۲۰۱۶؛ بین و همکاران، ۲۰۱۸)، مشخص شد حداقل الزامات پارکینگ در دسترس بودن پارکینگ را افزایش می‌دهد (کیمپتون و همکاران، ۲۰۲۱). تحقیقات اخیر شروع به پیوند دادن الزامات پارکینگ به میزان پارکینگی که واقعاً ساخته می‌شود، نموده است (گبه و همکاران، ۲۰۲۰؛ کیمپتون و همکاران، ۲۰۲۱). اصلاح پارکینگ به طور فزاینده‌ای به عنوان یک استراتژی برای کاهش مالکیت و استفاده از خودرو در نظر گرفته می‌شود. (مک اسلان و اسپری، ۲۰۲۳). زمان یافتن پارکینگ حدوداً ۴۰ درصد مدت زمان سفر است (آکسان و همکاران، ۱۹۹۳). امروزه در شهرهای مدرن، سیاست‌های مدیریت تقاضای سفر راه‌حل‌های مؤثرتری برای کاهش ترافیک وسایل نقلیه نسبت به توسعه زیرساخت‌های راه‌سازی و حمل‌ونقل خصوصی است (خسروی و همکاران، ۲۰۲۰). مدیریت تقاضای سفر به هر عمل یا مجموعه‌ای از اعمال که با هدف تأثیر گذاشتن بر رفتار سفر مردم صورت گیرد، به گونه‌ای که سبب کاهش تراکم ترافیک، ارائه گزینه‌های تحرک جایگزین، بهبود دسترسی به حمل و نقل عمومی، شیوه‌های حمل و نقل غیرموتوری و مشکل‌ترشدن سفر با وسایل نقلیه شخصی شود، گفته می‌شود (ریواسلاتا، ۲۰۱۳). یکی از رایج‌ترین روش‌های مدیریت عرضه حمل و نقل، توسعه حمل و نقل عمومی است (احمدوند و همکاران، ۱۳۹۶). برخی از کارهایی که موجب تقویت حمل و نقل عمومی می‌گردد، عبارتند از: اطلاع رسانی، یکپارچه سازی حمل و نقل عمومی، بالابردن جذابیت سیستم حمل و نقل عمومی، سامانه اتوبوس تندرو و ایجاد خطوط ویژه (نادران و چوپانی، ۱۳۹۰). در این سیستم پیچیده، درک، مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتارهای فردی یا خانوار یکی از مشکلات کلیدی پژوهشی عصر حاضر است (چرچی و آر، ۲۰۱۹). مطالعه رفتار سفر عمدتاً به تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی تقاضای سفر می‌پردازد و براساس نظریه‌ها و روش‌های تحلیلی از رشته‌های علمی مختلف

است (گولیا، ۲۰۱۶). مدل‌های سیستم دینامیک اثرات متقابل فاکتورهای متفاوت را در مدت زمان مشخص لحاظ می‌نماید و در قیاس با مدل‌های استاتیکی، اثرات بلند مدت را بهتر نمایش می‌دهد (استادی جعفری و رصافی، ۱۳۹۱). مدل‌سازی‌های مربوط به مسائل مدیریت شهری، بیشتر ایستا بوده و زمان در آنها در نظر گرفته نمی‌شود. در حالی که شهرها در هر لحظه از زمان تغییر می‌نمایند. این مسأله یکی از ضعف‌های این مدل‌ها می‌باشد (هوریج، ۱۹۹۴). با استفاده از روش پویایی‌های سیستم می‌توان نه تنها تأثیر مستقیم، بلکه اثرات غیرمستقیم ناشی از متغیرهای مختلف چه متغیرهای درون‌زای مدل و چه متغیرهای برون‌زا را شبیه‌سازی کرد. همچنین با توجه به استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی در مدل‌سازی دینامیکی، می‌توان تأثیر سیاست‌ها را در یک بازه بزرگ مشاهده نمود (هوریج، ۱۹۹۴). از طرفی سیاست‌گذاران لازم است به اجرای توأمان سیاست‌ها توجه داشته باشند. اگرچه پژوهش‌های اخیر حاکی از پرداختن به رویکرد مجموعه‌ای از سیاست‌ها و بررسی ترکیبی از سیاست‌های مدیریتی حوزه حمل و نقل بر شیوه انتخاب سفر شهروندان در زمان‌های مختلف بوده است (حبیبیان و کرمانشاه، ۱۳۹۱). اکنون، بررسی تأثیر مجموعه‌ای از سیاست‌ها بر شرایط حمل و نقل جامعه در بلندمدت، با در نظر گرفتن تأثیرات ثانویه سیاست‌ها بر عواملی مانند ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی، ایجاد و توزیع سفر به عنوان موضوعی جدید مطرح است. به دلایلی چون کمبود تکنولوژی و هزینه بسیار بروزرسانی آن، هزینه بسیار تغییرات سفر شهروندان و توجه به عوامل سیاسی، به طور متعارف سیاست‌های مدیریتی حمل و نقل در فاصله‌های زمانی بلندمدتی پایدار است، بنابراین ضرورت اتخاذ سیاست‌های کارآمدتر برپایه مدل‌های دقیق دیده می‌شود (استادی جعفری و حبیبیان، ۱۳۹۳). در سال‌های اخیر مطالعات متفاوتی در رابطه با فاکتورهای اثرگذار بر تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب شیوه سفر صورت گرفته است. ژو و همکارانش (۲۰۲۳) به بررسی سیاست‌های لازم جهت کاهش میزان استفاده از وسایل نقلیه شخصی برای سفر در یک منطقه شهری در هلند با استفاده از مدل تقاضای سفر مبتنی بر فعالیت پرداختند. در این راستا هفت سناریو بررسی گردید و نتایج نشان داد که معرفی‌های جابجایی (هاب‌هایی در سطح همسایگی که در آن شیوه‌های سفر پایدار به هم مرتبط هستند)، به تنهایی تأثیر محدودی دارد. با این حال، با ترکیب این امر با اشتراک گذاری خودرو یا دوچرخه برای عموم به صورت اشتراک‌های «جابجایی به عنوان خدمت»، این امکان وجود دارد که تعداد سفرهای خودرو را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، در حالی که تعداد سفرهای انجام شده توسط یک دوچرخه الکترونیکی (به اشتراک گذاشته شده) نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بهبود خدمات حمل و نقل عمومی و شبکه حمل و نقل کوچک، پتانسیل‌های جابجایی را از نظر پایداریتر کردن جابجایی بیشتر می‌کند. همچنین محدود کردن ظرفیت پارکینگ و افزایش هزینه‌های پارکینگ در مراکز شهر

به ویژه برای کاهش استفاده از وسایل نقلیه مفید است و منجر به بهبود جریان ترافیک می‌شود. اندرو و همکارانش (۲۰۲۲) به ارزیابی عملیاتی سیستم حمل و نقل سریع اتوبوس بی‌آرتی در شهر دارالسلام پرداختند؛ در این مطالعه، زمان به عنوان یک معیار ارزیابی عملکرد مورد توجه قرار گرفت و یک رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی بیزی و آزمون فرضیه بیزی برای مقایسه عملکرد عملیاتی بی‌آرتی در برابر اتوبوس‌های غیر بی‌آرتی و خودروهای خصوصی استفاده شد. این مطالعه همچنین عوامل مؤثر بر زمان سفر سه شیوه حمل و نقلی را بررسی کرد. یافته‌ها نشان داد، زمان سفر پیش‌بینی‌شده برای بی‌آرتی در بازه معتبر بیزی ۹۵٪ با میانگین ۱۶ دقیقه کمترین مقدار بود. سفرهای اتوبوس غیر بی‌آرتی با ۲۸ دقیقه بیشترین زمان سفر را داشتند و پس از آن سفر با خودروی شخصی با میانگین زمان سفر ۱۸ دقیقه، نشان داد که اتوبوس‌های بی‌آرتی زمان سفر را بهبود می‌بخشد. نتایج نشان داد، عواملی مانند تأخیر، زمان روز، تعداد توقف‌ها و جهت سفر به طور قابل توجهی بر تغییر زمان سفر در طول مسیرهای مطالعه تأثیر می‌گذارد. مک اسلان و اسپری (۲۰۲۳) به بررسی رابطه بین الزامات پارکینگ و مالکیت خودرو در خصوص شهرداری‌های کشور سوئد پرداختند. در این راستا معیارهای مختلف پارکینگ (فضای پارکینگ در هر آپارتمان و فضاهای پارکینگ در هر متراژ ساختمان) و تنوع بین اندازه‌ها و طبقه بندی‌های مختلف شهرداری‌ها را بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که در تمام شهرداری‌ها، یک رابطه مثبت بین حداقل الزامات پارکینگ و مالکیت خودرو وجود دارد، همچنین اندازه شهر عامل مهمی در نرخ مالکیت خودرو است، به نحوی که در میان شهرداری‌های با اندازه مشابه، حداقل الزامات پارکینگ با نرخ‌های بالاتر مالکیت خودرو مرتبط است. نتایج این مطالعه نشان داد که کاهش حداقل‌های پارکینگ می‌تواند یک سیاست مؤثر برای کاهش مالکیت خودرو باشد، البته این تغییرات تنها بر توسعه جدید تأثیر می‌گذارد و تغییر کاربری مکان‌های پارکینگ در مناطق مسکونی موجود ممکن است سیاستی به همان اندازه مؤثر برای مهار مالکیت خودرو باشد. یانگ و همکارانش (۲۰۲۱) یک مدل تحلیلی یکپارچه از تخمین مزایای آتی زیست محیطی بواسطه محدودیت خرید وسایل نقلیه و سیاست ارتقای وسایل نقلیه با انرژی جدید در شهر پکن ارائه نمودند به نحوی که مصرف انرژی و مزایای زیست محیطی سلامتی را تا سال ۲۰۳۰ تخمین می‌زند. نتایج نشان داد سیاست بلندپروازانه محدود سازی وسایل نقلیه و ارتقای وسایل نقلیه با انرژی جدید به صورت مؤثری دی اکسید کربن را کاهش می‌دهد. همچنین زیان اقتصادی ناشی از بیماری‌های مختلف منتسب به $PM_{2.5}$ ، CO ، NOX و HC نسبت به سناریوی مرجع در سال ۲۰۳۰ به ترتیب ۶۵ درصد، ۶۱ درصد، ۱۹ درصد و ۵۷ درصد کمتر خواهد بود. لذا، سیاست محدودیت وسایل نقلیه تأثیر یکپارچه قابل توجهی بر کاهش انتشار و جلوگیری از آسیب به سلامت عمومی خواهد داشت. خسروی و همکارانش (۲۰۲۰) از مدل‌سازی دینامیک سیستم

برای ارزیابی سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل و نقل در مرکز شهر اصفهان استفاده نمودند؛ در این تحقیق سیاست‌های تشویقی و محدودسازی در منطقه تجاری مرکزی شهر اصفهان بررسی شدند. سیاست‌های مؤثر حمل‌ونقل به مدت ده سال اجرا شدند و بر اساس سه شاخص آلودگی هوا، مصرف انرژی و جریان ترافیک رتبه‌بندی گردیدند. نتایج نشان داد به ترتیب تکمیل توسعه شبکه مترو، توسعه شبکه بی‌آرتی، بهبود امکانات دوچرخه، قیمت گذاری راه، افزایش قیمت پارکینگ، بهبود خدمات اتوبوسرانی، بهبود خدمات تاکسی، سیاست زوج و فرد و تشویق به اشتراک گذاری خودرو از مؤثرترین سیاست‌ها در مرکز شهر اصفهان است. در میان سیاست‌های ترکیبی، تکمیل توسعه شبکه مترو به طور هم‌زمان با قیمت‌گذاری محدوده ترافیکی مؤثرترین سیاست ترکیبی برای کاهش آلودگی هوا و مصرف انرژی و افزایش جریان ترافیک بوده است. سپوترا و اف رادام (۲۰۲۳) به تجزیه و تحلیل معیارهایی که بر سطح دسترسی به ایستگاه‌های بی‌آرتی در منطقه مورد مطالعه در بانجاماسین، اندونزی تأثیر می‌گذارد، پرداختند و سپس مدلی بر اساس معیارهای معنادار ارائه نمودند؛ در این مطالعه، دسترسی به سیستم با استفاده از روش ترکیبی اندازه‌گیری و با استفاده از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی^۱ مدل‌سازی شد که رویکردی نسبتاً جدید است. نتایج نشان داد که هفت معیار بر سطح دسترسی به ایستگاه‌های بی‌آرتی تأثیر می‌گذارد. معیارهای فضایی برای دسترسی به مکان‌های توقف بی‌آرتی در مدل ارائه شده شامل فاصله توقف‌ها تا تقاطع جاده، شاخص آنتروپی کاربری ترکیبی، تراکم جمعیت و ارزش زمین است. بر این اساس در پژوهش حاضر اثر سیاست‌های مرتبط با ظرفیت پارکینگ، تعداد اتوبوس بی‌آرتی و بهبود دسترسی به اتوبوس بی‌آرتی بر رفتار سفر شهروندان تهرانی از منظر انتخاب شیوه سفر با خودروی شخصی یا حمل و نقل عمومی در یک مدل پویایی سیستم مورد نظر می‌باشد. از آنجا که رفتار انتخاب شیوه سفر با خودرو تحت تأثیر متغیرهای مختلفی است که بر یکدیگر به صورت مستقیم و غیرمستقیم تأثیر می‌گذارند و از طرفی در طول زمان این رفتار تغییر می‌کند لازم است تأثیر مستقیم و غیرمستقیم ناشی از متغیرهای مختلف چه متغیرهای درون‌زای مدل و چه متغیرهای برون‌زا را در یک مدل پویایی سیستم شبیه‌سازی کرد. همچنین با توجه به استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در مدل‌سازی دینامیکی، می‌توان تأثیر سیاست‌ها را در یک بازه زمانی بزرگ مشاهده نمود. با توجه به مطالعات صورت گرفته در خصوص عوامل مؤثر بر انتخاب شیوه سفر خودروی شخصی و انتخاب شیوه سفر حمل و نقل عمومی با سامانه اتوبوس تندرو (بی‌آرتی)، از جمله ضعف‌ها و کمبودها در مطالعات پیشین، عدم توجه به پیاده‌سازی هم‌زمان

سناریوهای مرتبط با ظرفیت پارکینگ، دسترسی به ایستگاه‌های بی‌آرتی و ناوگان بی‌آرتی در یک مدل پویایی سیستم و بررسی اثر آنها برانتخاب شیوه سفر خودروی شخصی و انتخاب شیوه سفر حمل و نقل عمومی با سامانه اتوبوس تندرو (بی‌آرتی) است، بنابراین، این مقاله به طور مشخص با کمک یک مدل پویایی سیستم به بررسی اثر بلند مدت و توأمان سیاست‌های عرضه سفر(ظرفیت پارکینگ، دسترسی به ایستگاه‌های بی‌آرتی و ناوگان بی‌آرتی) بر رفتار رقابتی میان انتخاب خودروی شخصی و اتوبوس بی‌آرتی در شهر تهران پرداخته است. مدل مفهومی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: مدل مفهومی پژوهش

Figure 2: Conceptual model of research

ابزار و روش

روش تحقیق به کار برده شده از نظر هدف از نوع توصیفی، مدل‌سازی می‌باشد. متغیرهای توصیف کننده رفتار انتخاب شیوه سفر بر اساس ادبیات تحقیق و نظرات خبرگان شناسایی شده و در یک مدل پویایی سیستم که امکان بررسی سیاست‌های مختلف در طول زمان را دارد، شبیه‌سازی می‌گردد.

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در شهرستان تهران انجام شده است. مطالعه حاضر در پی ارائه یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی رفتار سفر شهروندان تهرانی با کمک ابزار مدل‌سازی است تا تحلیلی دقیق‌تر از

رفتارهای شهروندان در انتخاب شیوه سفر و پیامدهای آن و کمک به بهبود ناهنجاری‌های رفتاری توسط سیاست‌گذاران حوزه حمل و نقل انجام پذیرد.

داده‌ها

در مطالعه حاضر، از داده‌های جمع‌آوری شده در سازمان حمل و نقل شهر تهران در خصوص سهم سفر شهروندان تهرانی با خودروی شخصی و اتوبوس بی‌آرتی در طی دوره زمانی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ استفاده شده است. داده‌ها شامل ظرفیت پارکینگ، نرخ ساخت پارکینگ، تعداد خودروهای شخصی، تعداد اتوبوس‌های بی‌آرتی، تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی، مدت زمان دسترسی به ایستگاه اتوبوس بی‌آرتی، مدت زمان انتظار در ایستگاه اتوبوس بی‌آرتی و ... است. متغیر هدف (وابسته) در پژوهش حاضر تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز است.

مراحل پویایی‌شناسی سیستم‌ها

در این پژوهش از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. فرایند پویایی‌شناسی سیستم، از طریق گام‌های مشخص و مذکور در ادامه سعی در حل یک مسأله در قالب مدل یکپارچه و پویا دارد. یک مدل سیستم پویا توانایی تحلیل یک سیستم پیچیده با متغیرهای چندانگانه را دارد که در طول زمان تغییر می‌نماید و نشان می‌دهد چگونه یک سیستم از اجرای سیاست‌های مختلف تأثیر می‌پذیرد (چنگ و همکاران، ۲۰۱۵). روش پویایی سیستم از ۵ مرحله تشکیل گردیده است که مدل ارائه شده در این پژوهش بر اساس گام‌های مذکور پیش خواهد رفت. اولین گام در این فرایند شناسایی مسأله و مرزهای آن است، در این گام همچنین متغیر مرجع و رفتار گذشته آن مورد بررسی قرار می‌گیرد، تعداد خودروهای شخصی به عنوان منشأ اصلی وجود آلاینده‌های موجود در هوا، مسأله اصلی و مشکلی است که این پژوهش بر آن تمرکز داشته و به دنبال کاهش آن می‌باشد، از آنجا که براساس گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل و ترافیک تهران سال ۱۴۰۰، سهم سفرهای شهروندان تهرانی با خودروهای شخصی اعم از سواری و وانت در این سال حدود ۴۹ درصد است لذا رفتار نامطلوبی که به صورت خاص مورد توجه این پژوهش می‌باشد، رفتار استفاده از خودروی شخصی توسط شهروندان و به عبارتی تعداد زیاد خودروی شخصی در سطح شهر است. در اینجا کاهش تعداد خودرو به عنوان یک رویکرد اصلی از ابعاد مختلف مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت، پژوهش حاضر در پی بیان عوامل تأثیرگذار بر رفتار سفر شهروندان تهرانی با خودروی شخصی و استفاده بیشتر از حمل و نقل عمومی است. گام دوم ایجاد فرضیه‌های پویا می‌باشد؛ در این گام لازم است، متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر مسأله مورد بررسی قرار گرفته و مرز مدل را مشخص نماییم. از جمله عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری رفتار نامطلوب انتخاب خودروی شخصی، جذابیت زیاد خودروی شخصی

است که یکی از عوامل اثرگذار بر آن، زمان سفر است به نحوی که با کاهش زمان سفر، جذابیت خودروی شخصی افزایش می‌یابد. در حال حاضر براساس نظر خبرگان، متوسط زمان سفر با خودروی شخصی کمتر از متوسط زمان سفر با حمل و نقل عمومی با احتساب مدت زمان دسترسی به ایستگاه‌های حمل و نقل عمومی و مدت زمان توقف در ایستگاه‌ها است از طرفی به دلیل عدم دسترسی آسان و سریع به حمل و نقل عمومی و کمبود ناوگان حمل و نقل عمومی اقبال جامعه به سمت خودروی شخصی است. اینک با درکی که در مورد مسأله حاصل گردیده است حلقه‌های علی معلولی را طراحی نموده و به تدریج نمودار کاملی از حلقه‌های علت و معلولی ایجاد می‌نماییم تا در پایان تصویری ساده از دنیای واقعی شکل گیرد گام بعدی شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار مربوطه می‌باشد؛ زمانی که فرضیه‌های اصلی و مرز سیستم تشکیل شد، مدل قابلیت اجرایی خواهد داشت. گام پایانی آزمون مدل و اعتبارسنجی آن است، در این مرحله مقایسه رفتارهای شبیه‌سازی مدل با رفتارهای دنیای واقعی صورت می‌گیرد.

ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش از ابزار نرم‌افزاری ونسیم جهت تجزیه و تحلیل اطلاعات و بررسی سناریوهای مرتبط با رفتار سفر و انتخاب خودروی شخصی توسط شهروندان تهرانی استفاده شده است.

شناسایی متغیرهای مدل

فرایند مدل‌سازی با گردآوری متغیرهای انباشت، جریان و متغیرهای کمکی شروع می‌شود. در این راستا بعد از انجام مروری بر ادبیات تحقیق و مطالعه پیشینه آن، به منظور دریافت نظرات خبرگان از طریق پرسش‌نامه نیمه ساختاریافته اقدام شد به نحوی که در ابتدا سؤالات اصلی از خبرگان پرسیده شد و در جریان پرسش و پاسخ، سؤالات جدیدی مطابق با شرایط پیشرفت جلسه از ایشان پرسش گردید و با بهره‌گیری از نظرات خبرگان و کارشناسان موضوع، متغیرهای تحقیق جمع‌آوری شد و در مراحل بعدی، تکمیل گردید.

فرایند الگوسازی سیستم دینامیک

فرایند الگوسازی با بیان مسأله شروع می‌شود با استفاده از مبانی نظری تحقیق و نظرات خبرگان، فرضیه‌های علت و معلولی تدوین می‌گردد. پس از فرضیه‌سازی، متغیرهای کلیدی در قالب

متغیرهای مستقل شامل (ظرفیت پارکینگ، تعداد ناوگان اتوبوس بی‌آرتی و تعداد ایستگاه اتوبوس بی‌آرتی) و متغیر وابسته (تعداد خودروی شخصی به‌کارگرفته در روز) و چگونگی اثرگذاری آنان بر یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته و سپس با طراحی مدل مفهومی حلقه‌های علی و معلولی ایجاد می‌گردد. در ادامه با وارد کردن معادلات ریاضی و تشخیص متغیرهای انباشت، نرخ و کمکی، نمودار انباشت-جریان ارائه می‌گردد. در نهایت شبیه‌سازی و اجرای مدل صورت می‌پذیرد. با تجزیه و تحلیل روند تغییرات رفتار مدل در گذشته و مقایسه آن با آنچه در واقعیت در گذشته اتفاق افتاده است، اعتبارسنجی مدل جهت صحت‌گذاری پیش‌بینی رفتار مدل در آینده انجام می‌گردد. نتایج این مقایسه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه تعداد خودروی شخصی به‌کارگرفته شده در روز، واقعی و شبیه‌سازی

Table 1: Comparison of the number of private cars used per day, real and simulated

خطا Error	واقعی Real	شبیه‌سازی Simulated	سال Year
0.00	2,378,730	2,378,730	1390
-0.17	2,947,612	2,457,300	1391
-0.24	3,237,625	2,459,490	1392
-0.21	3,135,000	2,467,060	1393
-0.25	3,327,273	2,483,960	1394
-0.26	3,381,818	2,507,550	1395
-0.31	3,694,091	2,535,430	1396
-0.31	3,713,636	2,566,090	1397
-0.37	4,123,182	2,598,660	1398
-0.39	4,320,909	2,632,700	1399
-0.40	4,410,000	2,667,950	1400

در جدول ۱، تعداد خودروهای شخصی واقعی، بر اساس تعداد سفرهای روزانه و سهم خودروی شخصی آورده شده در گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل شهری تهران در هر سال، متوسط سفر یک خودروی شخصی و ضریب سرانشین آن به‌دست آمده است. وضعیت شاخص خطا و ضریب تعیین^{۹۷} صدم، حاکی از اعتبار مدل برای پیش‌بینی رفتار آتی مدل است. همچنین از دیگر اقدامات لازم برای اعتبارسنجی مدل تحلیل حساسیت‌های صورت گرفته در قالب پیاده‌سازی سناریوهای

یافته‌ها

ایجاد فرضیه پویا و نمودار علت و معلولی

[illegible]

(۲۲۱)

بعد از ایجاد مدل مفهومی، نوبت ایجاد نمودارهای انباشت-جریان است. با تفکیک متغیرهای مهم به متغیرهای حالت، نرخ و کمکی این نمودار طراحی می‌شود. بعد از طراحی نمودار جریان، نوبت ورود داده‌ها و فرمول‌های ریاضی به نرم افزار و اجرای شبیه‌سازی مدل است (الهی، ۱۳۹۲). فرمول‌های ریاضی در ارتباط با هر متغیر است. فرمول‌های مربوط به متغیرهای حالت، انتگرال جمع جبری متغیرهای نرخ هستند که به طور اتومات توسط نرم افزارها وارد می‌شوند، در خصوص متغیرهای نرخ و کمکی لازم است فرمول‌های ریاضی مربوطه مشخص شود. سپس، ثابت‌های عددی و مقدار ابتدایی متغیرهای حالت مشخص می‌گردد. ارتباط میان متغیرها با استفاده از روش‌های مرور ادبیات، مطالعه رفتار آمار گذشته، نظر خبرگان ترسیم می‌گردد (الهی، ۱۳۹۲). بر این مینا نمودارهای انباشت جریان برای هر یک از متغیرها در شکل ۴ تدوین گردید.

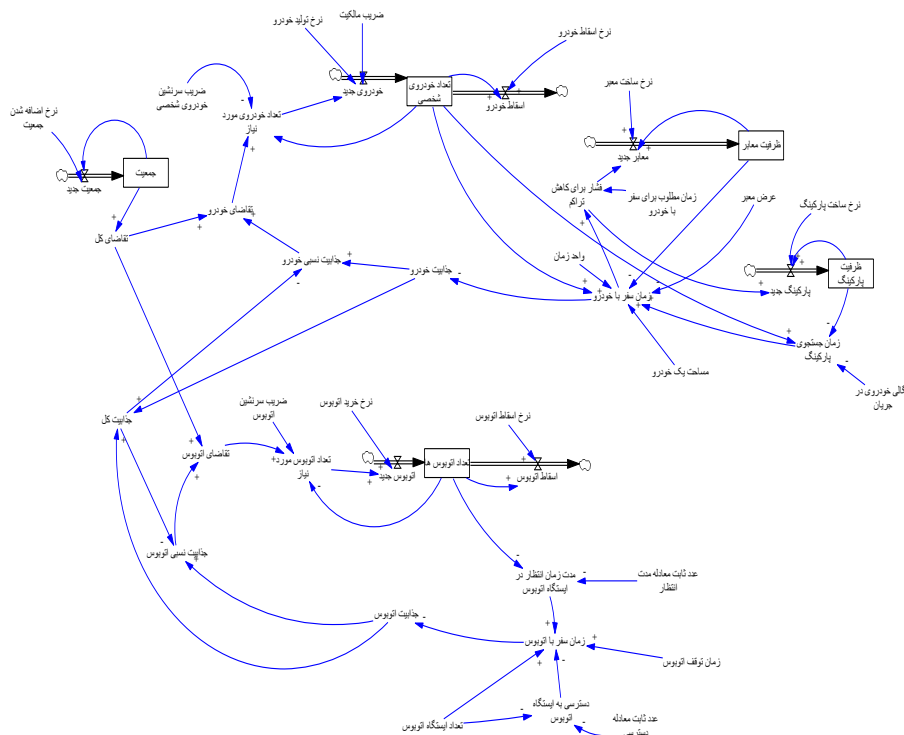


Figure 4: Stock-flow model of research model

روش جمع آوری داده‌ها

جمع آوری داده‌های پژوهش یکی از گام‌های مهم پژوهش است. در گام جمع آوری داده‌ها پژوهشگر یافته‌های میدانی و کتابخانه‌ای را جمع‌آوری می‌نماید. این پژوهش به‌منظور شناخت متغیرها و روابط بین آن‌ها از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با خبرگان حوزه حمل و نقل شهرداری تهران استفاده نمود. برای جمع آوری داده‌های مورد نیاز این پژوهش عمدتاً از گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل و ترافیک تهران و سایر دستگاه‌های مرتبط استفاده شد. داده‌های به‌دست آمده با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ونسیم ۷,۳,۵ مدل‌سازی شد.

چگونگی بررسی جامعه آماری، انتخاب حجم نمونه و شیوه نمونه‌گیری

در این تحقیق نظرات خبرگان در حوزه حمل و نقل شهرداری تهران از طریق پرسش‌نامه نیمه‌ساختاریافته دریافت گردید. بخش اصلی اطلاعات مورد نظر از بانک‌های اطلاعاتی موجود در سازمان حمل و نقل ترافیک شهر تهران جمع‌آوری و تحلیل شده است.

روش‌ها و ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها

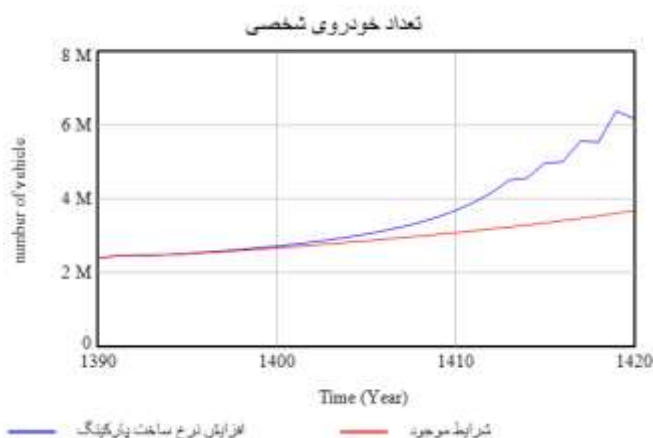
به دنبال بهبود رفتار شهروندان تهرانی نیازمند یک مدل شبیه‌سازی می‌باشیم که در قالب آن امکان بررسی سیاست‌ها و سناریوهای مختلف وجود داشته باشد و از آنجاکه روش پویایی سیستم امکان ارائه یک مدل جامع به جهت سیاست‌گذاری در حوزه حمل و نقل و ترافیک را دارا می‌باشد لذا در این پژوهش از یک مدل پویایی سیستم برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد و از ابزار نرم افزار ونسیم که در طراحی و پیاده‌سازی مدل‌های پویایی سیستم موفق بوده است به عنوان ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها در این پژوهش استفاده گردید.

نتایج شبیه‌سازی پژوهش

پس از انجام شبیه‌سازی و بررسی رفتار اجزای مدل در بازه زمانی سی ساله مورد نظر، به تغییر مقادیر متغیرهای مختلف مدل و تحلیل تأثیر آن‌ها بر روی متغیر اصلی مورد نظر که تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز است، پرداخته می‌شود. ضمناً گام زمانی مدل ۱ و واحد زمان سال تعریف شده است. با تغییر مقادیر نرخ ساخت پارکینگ، نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی و تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی، هشت سناریو تدوین گردید و تأثیرگذاری آن‌ها بر رفتار سفر و نهایتاً کاهش تعداد خودرو بررسی شد.

سناریوی اول: افزایش نرخ ساخت پارکینگ

خروجی‌های نرم افزار ونسیم نشان داد، روند تعداد خودروی شخصی با افزایش نرخ ساخت پارکینگ افزایش قابل توجهی پیدا نموده است. با توجه به اثر عرضه بر تقاضا این خروجی با مطالعات قبلی هم‌راستا بوده و حاکی از آنست با افزایش عرضه پارکینگ ابتدا جذابیت خودروی شخصی افزایش یافته و رفتار انتخاب شیوه سفر با خودرو تقویت می‌گردد از این‌رو تعداد خودروی شخصی افزایش می‌یابد ولی در ادامه به دلیل افزایش تراکم خودرو و طولانی‌تر شدن زمان سفر با خودرو، جذابیت خودروی شخصی کمتر شده و همانطور که نمودار ۴ نشان می‌دهد مجدداً تعداد خودروی شخصی کاهش می‌یابد لذا افزایش نرخ ساخت پارکینگ به‌عنوان یک سناریو مناسب توصیه نمی‌شود. این سناریو در شکل ۵ ارائه شده است.



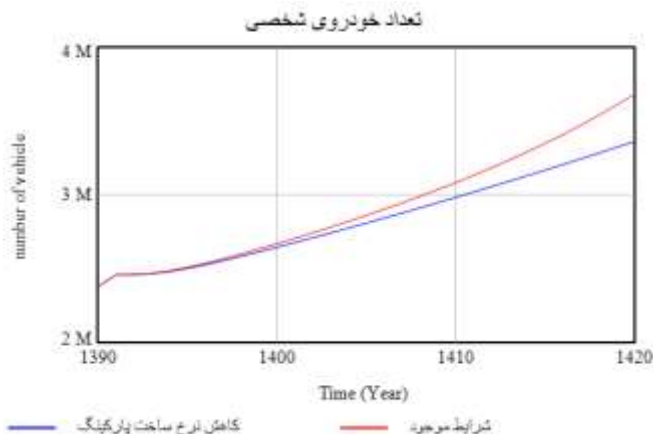
شکل ۵. تعداد خودروی شخصی به‌کار گرفته شده در روز در حالت افزایش نرخ ساخت پارکینگ

Figure 5: The number of private cars used per day in the case of increasing the parking rate

سناریوی دوم: کاهش نرخ ساخت پارکینگ

خروجی‌های نرم افزار ونسیم نشان داد، روند تعداد خودروی شخصی با کاهش نرخ ساخت پارکینگ، با سرعت کمتری نسبت به وضع موجود افزایش می‌یابد. شرایط به نحوی است که با توجه به اثرگذاری سایر عوامل مانند ساخت معبر، سیاست کاهش نرخ ساخت پارکینگ تا سال‌های نزدیک به سال ۱۴۰۰ امکان تغییر در تعداد خودروی شخصی نسبت به وضع موجود را نداشته است ولی در بلندمدت در سال‌های بعد از سال ۱۴۰۰ نسبت به شرایط موجود، سیاست کاهش نرخ ساخت

پارکینگ مؤثر واقع شده است. لذا کاهش نرخ ساخت پارکینگ به عنوان یک سناریو مناسب توصیه می‌شود. این روند در شکل ۶ نشان داده شده است.

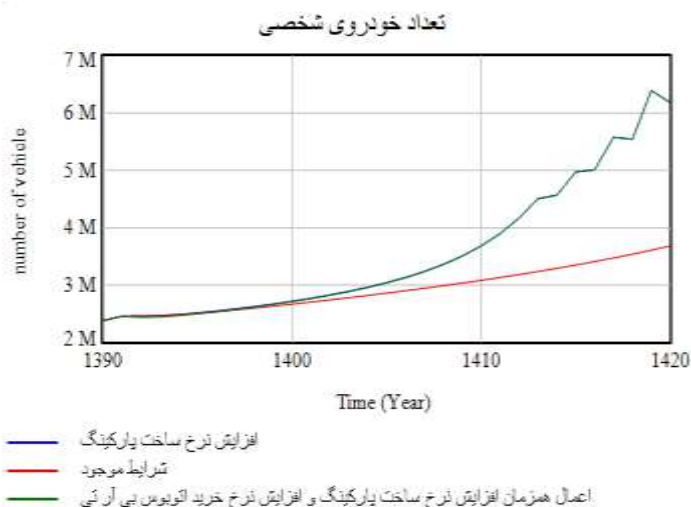


شکل ۶. تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در حالت کاهش نرخ ساخت پارکینگ

Figure 6: The number of private cars used per day in the case of decreasing the parking rate

سناریو سوم: افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی به صورت هم‌زمان

پس از انجام شبیه‌سازی مشاهده گردید اعمال هم‌زمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی منجر به افزایش روند تعداد خودروی شخصی می‌گردد. البته شیب افزایشی روند تعداد خودروی شخصی در صورت اعمال هم‌زمان تغییرات نسبت به زمانی که فقط نرخ ساخت پارکینگ افزایش می‌یابد تغییر خاصی ننموده است. به نحوی که نتایج سناریوی اول و سوم مشابه هم می‌باشد. لذا اعمال هم‌زمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی نتایج مطلوبی در پی ندارد. به عبارتی با افزایش نرخ ساخت پارکینگ، جذابیت خودروی شخصی به میزان زیادی افزایش می‌یابد به صورتی که حتی با افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی هم امکان رقابت اتوبوس بی‌آرتی با خودروی شخصی وجود ندارد و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی در تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی‌آرتی بی تأثیر است. این سناریو در شکل ۷ ارائه شده است.

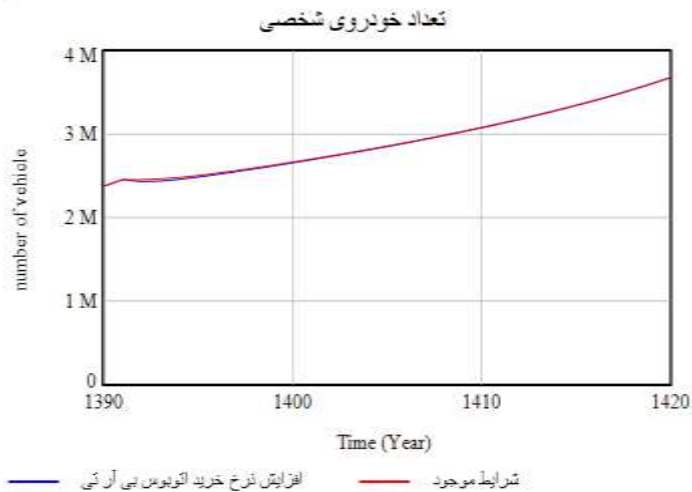


شکل ۷. تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در حالت اعمال همزمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی

Figure 7: The number of private cars used per day in the case of simultaneous application of increasing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate

سناریو چهارم: افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی

خروجی‌های شبیه‌سازی نشان داد، روند تعداد خودروی شخصی در شرایط افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی تفاوتی با شرایط موجود ندارد و این بدان معنی است که با افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی، تعداد خودروی شخصی هم چنان با همان شیب شرایط موجود، افزایشی است؛ به عبارت دیگر تا زمانی که در شرایط موجود، پارکینگ ساخته می‌شود حتی اگر اتوبوس بی‌آرتی خریداری شود، به دلیل اینکه هنوز خودرو جذاب است امکان رقابت اتوبوس بی‌آرتی با خودروی شخصی وجود ندارد لذا در وضعیت ساخت پارکینگ با نرخ ساخت شرایط موجود، افزایش نرخ خرید اتوبوس به‌عنوان یک سناریو مناسب توصیه نمی‌گردد. این سناریو در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در حالت افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی
 Figure 8: The number of private cars used per day in the case of increasing the BRT bus purchase rate

سناریو پنجم: کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی به صورت همزمان پس از اعمال تغییرات در شبیه‌سازی، مشاهده شد: اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی منجر به افزایش روند تعداد خودروی شخصی با شیب کمتری نسبت به شرایط موجود می‌گردد. از طرفی در مقایسه با شرایط صرفاً کاهش نرخ ساخت پارکینگ، سناریوی اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی تا سال ۱۴۰۰ می‌تواند وضعیت بهتری ایجاد نماید و بعد از سال ۱۴۰۰ این دو سناریو نتایج نسبتاً مشابهی دارد؛ به عبارتی در شرایط کاهش نرخ ساخت پارکینگ، افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی، اثر قابل ملاحظه‌ای ندارد. بدین ترتیب کاهش نرخ ساخت پارکینگ به تنهایی در تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی آر تی مؤثر است. لذا سناریوی اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی به عنوان یک سناریوی مؤثر توصیه نمی‌گردد. این سناریو در شکل ۹ ارائه شده است.

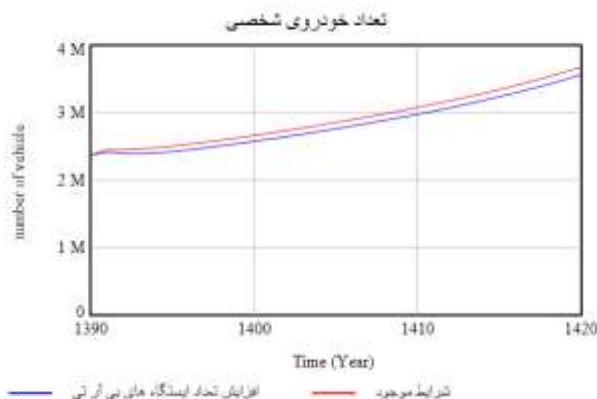


شکل ۹. تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در حالت اعمال هم‌زمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی

Figure 9: The number of private cars used per day in the case of simultaneous application of decreasing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate

سناریو ششم: افزایش تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی

پس از اعمال تغییرات در شبیه‌سازی، مشاهده شد: با افزایش تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی روند تعداد خودروی شخصی با شیب کمتری نسبت به قبل از اضافه شدن در تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی افزایش خواهد یافت. لذا افزایش تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی به‌عنوان یک سناریو مناسب توصیه می‌گردد. این سناریو در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰. تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در حالت افزایش تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی

Figure 10: The number of private cars used per day in the case of increasing the number of BRT bus stations

سناریو هفتم: افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی به صورت هم‌زمان

پس از انجام شبیه‌سازی مشاهده گردید اعمال هم‌زمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی منجر به افزایش روند تعداد خودروی شخصی می‌گردد. در این حالت شیب افزایشی روند تعداد خودروی شخصی نسبت به زمانی که فقط نرخ ساخت پارکینگ افزایش می‌یابد تغییر خاصی ننموده است و بهبود کمی ایجاد شده است. به نحوی که نتایج سناریوی اول و هفتم مشابه هم می‌باشد. همچنین نسبت به شرایط موجود نیز در سال‌های نزدیک به سال ۱۴۰۰ بهبود اندکی حاصل شده و در ادامه با سرعت بیشتری نسبت به شرایط موجود، روند تعداد خودروی شخصی افزایش یافته است. لذا اعمال هم‌زمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی نتایج مطلوبی در پی ندارد؛ به عبارتی با افزایش نرخ ساخت پارکینگ جذابیت خودروی شخصی به میزان زیادی افزایش می‌یابد به صورتی که حتی با افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس

بی‌آرتی هم امکان رقابت اتوبوس بی‌آرتی با خودروی شخصی وجود ندارد و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی در تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی‌آرتی بی‌تأثیر است. این سناریو در شکل ۱۱ ارائه شده است.

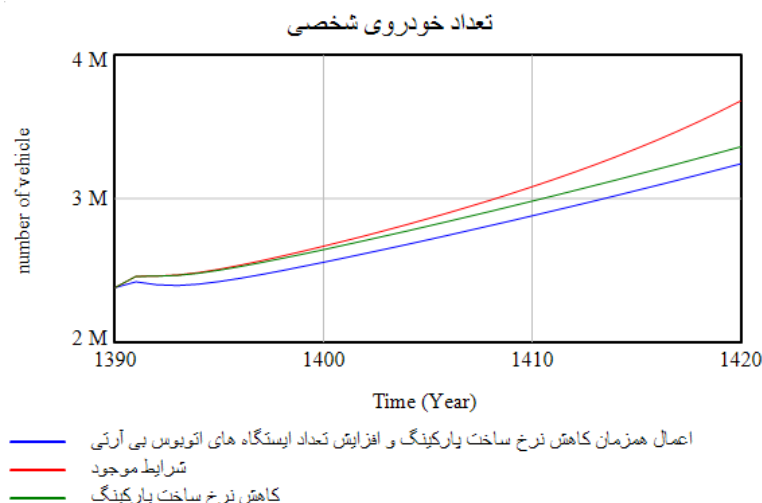


شکل ۱۱. تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در حالت اعمال هم‌زمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی

Figure 11: The number of private cars used per day in the case of simultaneous application of increasing the parking rate and increasing the number of BRT bus stations

سناریو هشتم: کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی به صورت هم‌زمان

پس از اعمال تغییرات در شبیه‌سازی، مشاهده شد که اعمال هم‌زمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی منجر به افزایش روند تعداد خودروی شخصی با شیب کمتری نسبت به شرایط موجود می‌گردد. از طرف دیگر اعمال هم‌زمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی در مقایسه با سناریوی صرفاً کاهش نرخ ساخت پارکینگ نتایج بهتری نشان می‌دهد. لذا اعمال هم‌زمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی نتایج مطلوبی در پی دارد؛ به عبارتی با کاهش نرخ ساخت پارکینگ، جذابیت خودروی شخصی کاهش می‌یابد و با افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی، امکان رقابت اتوبوس بی‌آرتی با خودروی شخصی فراهم می‌گردد؛ به بیان دیگر افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی در تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی‌آرتی در شرایط کاهش نرخ ساخت پارکینگ مؤثر است. این سناریو در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۱۲. تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در حالت اعمال هم‌زمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی

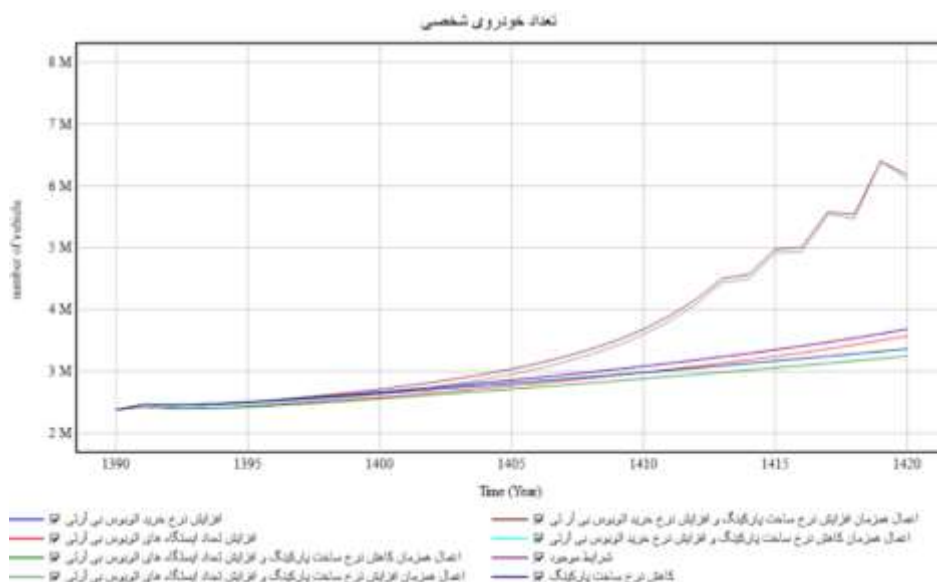
Figure 12: The number of private cars used per day in the case of simultaneous application of decreasing the parking rate and increasing the number of BRT bus stations

نتیجه گیری

موضوع خودرو محوری به دلیل پیامدهای آن از قبیل آلودگی هوا و ترافیک مورد توجه پژوهشگران و برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است. این مقاله به بررسی عوامل اثرگذار بر موضوع خودرو محوری یا به تعبیری بررسی عوامل اثرگذار بر رفتار انتخاب خودروی شخصی در یک مدل پویایی سیستم پرداخت. شناسایی متغیرهای اثرگذار که هریک در قالب سیاست‌هایی معرفی می‌شود با توجه به محدودیت منابع مالی در زمان بودجه‌ریزی می‌تواند برای برنامه‌ریزان شهری حائز اهمیت باشد.

در پژوهش حاضر، با انجام شبیه‌سازی و تغییر مقادیر متغیرها، رفتار متغیر تعداد خودروی شخصی مورد بررسی قرار گرفت و سپس نسبت به شناسایی متغیرهای اصلی از قبیل ظرفیت پارکینگ، تعداد اتوبوس بی‌آرتی و تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی اقدام گردید. سپس هشت سناریو در جهت فهم رفتار انتخاب خودروی شخصی نسبت به اتوبوس بی‌آرتی در شهر تهران طراحی شد. نتایج حاکی از آن بود، زمانی که نرخ ساخت پارکینگ افزایش می‌یابد متغیر تعداد خودروی شخصی افزایش قابل توجهی پیدا خواهد کرد و زمانی که نرخ ساخت پارکینگ و نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی هم‌زمان افزایش می‌یابد نسبت به زمانی که فقط نرخ ساخت پارکینگ افزایش می‌یابد مجدداً نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. از طرفی اجرای سناریوی دوم یا کاهش نرخ ساخت پارکینگ به تنهایی منجر به کاهش سرعت در روند افزایشی تعداد خودروی شخصی به کارگرفته شده می‌گردد همچنین افزایش نرخ خرید اتوبوس بی‌آرتی نسبت به شرایط موجود تغییری در روند افزایشی تعداد خودروی شخصی ایجاد نمی‌نماید. علاوه بر این زمانی که تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی افزایش می‌یابد شیب نمودار روند افزایشی تعداد خودروهای شخصی کاهش خواهد یافت، همچنین افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی در شرایط افزایش نرخ ساخت پارکینگ کمکی به تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی‌آرتی نمی‌نماید. در مقابل کاهش نرخ ساخت پارکینگ هم‌زمان با افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی در سناریوی هشتم در بین سناریوهای حاضر بهترین نتایج را به دنبال دارد، زیرا علاوه بر کاهش جذابیت خودروی شخصی در اثر مهار پارکینگ‌سازی، افزایش تعداد ایستگاه‌های بی‌آرتی به دلیل آنکه دسترسی بیشتری ایجاد می‌نماید مطلوبیت سفر با اتوبوس بی‌آرتی را افزایش داده و در نهایت کاهش سرعت در روند افزایشی تعداد خودروی شخصی را به دنبال خواهد داشت. نتایج کاربردی پژوهش حاضر نشان می‌دهد در شرایط حاضر بیشتر از آنکه نیازمند افزایش ناوگان اتوبوس بی‌آرتی باشیم نیازمند بهبود دسترسی به استفاده از اتوبوس بی‌آرتی می‌باشیم. همچنین خرید اتوبوس بی‌آرتی و ساخت پارکینگ به صورت هم‌زمان

نمی‌تواند بهبودی در کاهش تعداد خودروی شخصی ایجاد نماید. این موضوع برای برنامه ریزان شهر از این جهت مهم است که اعمال هم‌زمان دو سیاست ساخت پارکینگ و خرید اتوبوس بی‌آرتی بهبودی در رفتار انتخاب اتوبوس بی‌آرتی ایجاد نمی‌نماید و تا زمانی که به واسطه ساخت پارکینگ زمان جستجوی پارکینگ کاهش پیدا نموده و خودرو همچنان جذاب است خرید اتوبوس بی‌آرتی کمکی به تغییر رفتار انتخاب خودروی شخصی نمی‌نماید این مهم می‌تواند در زمان تخصیص بودجه برای برنامه ریزان شهری مورد توجه قرار گیرد. نتایج کاربردی به‌دست آمده نشان می‌دهد انتخاب شیوه سفر اتوبوس بی‌آرتی در مقایسه با خودروی شخصی تنها زمانی امکان پذیر است که علاوه بر تقویت زیرساخت‌های اتوبوس بی‌آرتی، از توسعه زیرساخت‌های خودرویی صرف‌نظر نمائیم. کمک به مدیران حوزه‌های مختلف شهرداری برای مشاهده آثار سیاست‌گذاری‌های مستقل از یکدیگر از دیگر نتایج کاربردی پژوهش حاضر است، زیرا نتایج مدل نشان داد تصمیم‌گیری‌های متناقض می‌تواند منجر به از بین رفتن نتایج مطلوب و تحمیل هزینه‌های سنگین گردد. در شکل ۱۳ و جدول ۲ نتایج سناریوها با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۳. مقایسه تعداد خودروی شخصی به‌کار گرفته شده در روز در سناریوهای مختلف

Figure 13: Comparison of the number of private cars used per day in different scenarios

جدول ۲. مقایسه سناریوها براساس شاخص تعداد خودروی شخصی به کار گرفته شده در روز در افق سال ۱۴۲۰

Table 2: Comparison of scenarios based on the index of the number of private cars used per day in the horizon of 1420

وضع فعلی current	هشتم ۸	هفتم ۷	ششم ۶	پنجم ۵	چهارم ۴	سوم ۳	دوم ۲	اول ۱	سناریو scenario
3683830	3243870	6101690	3569750	3359840	3680860	6178390	3362890	6180760	تعداد number

در پایان پیشنهاد می‌شود در کنار متغیرهای مرتبط با زیرساخت‌های حمل و نقل شهری، متغیرهای دیگری از جنس ویژگی‌های فردی مانند نگرش، درآمد، سن و از این قبیل به مدل اضافه گردد و تأثیر آنها بر رفتار انتخاب خودروی شخصی و اتوبوس بی‌آرتی بررسی شود. همچنین از محدودیت‌های پژوهش حاضر، می‌توان محدود بودن مدل به داده‌ها و معادلات به‌دست آمده از آن برای شهر تهران را نام برد، با تغییر در مقادیر و برخی معادلات، به‌کارگیری مدل برای شهرهای دیگر امکان پذیر خواهد شد. علاوه بر این محدودیت عدم دسترسی آسان به آمار و اطلاعات مرتبط با پژوهش و نظرات خبرگان این حوزه بود که با تلاش فراوان مرتفع گردید.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

References

- Ahmadvand, A.M., Mohammadiani, Z., & Khodadadi Abiazani, Hadith. (2016). Urban transportation system modeling using the system dynamics approach: policies to reduce traffic. *Rahor scientific and promotional quarterly*, year 14, number 37, 1-28. [In Persian]. magiran.com/p2105402
- Andrew, L., Edes Kitali, A., Sando, Th., & Musagasa, J. (2022). Operational evaluation of the bus rapid transit system: Case study of Dar es Salaam city. *Journal of Public Transportation*, 24(6), 1-8. **doi:10.1016/j.jpubtr.2022.100020**
- Axhausen, K.W., Polak, J. & Boltze, M. (1993). Effectiveness of parking guidance and information systems: Recent evidence from Nottingham and Frankfurt/Main. *Transport Studies Unit, Oxford University-Publications*, 1-7. <https://www.researchgate.net/publication/238101931>
- Cheng, Y.-H., et al., (2015). Urban transportation energy and carbon dioxide emission reduction Strategies. *Applied Energy*, 157(1), 953-973. **doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.126**
- Cherchi, E., (2019). Our IATBR: 45 years contributing to travel behavior research in Mapping the Travel Behavior Genome. K.G.a.A.W.D. Goulias, Editor. Elsevier, 17-28. <https://www.everand.com/book/432661558/Mapping-the-Travel-Behavior-Genome>
- Chiou, Y.C., Jou, R.C., & Yang, C.H. (2015). Factors Affecting Public Transportation Usage Rate: Geographically Weighted Regression. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78(1), 161-177. **doi:10.1016/j.tra.2015.05.016**
- Elahi, M. (2012). Dynamic analysis of factors affecting the development of the wire and cable industry in Iran. Master's thesis. Faculty of Engineering. Yazd University [In Persian]. <https://elmnet.ir/doc/10641940-26471>
- Gabbe, C.J., Pierce, G., & Clowers, G. (2020). Parking policy: The effects of residential minimum parking requirements in Seattle. *Land Use Pol*, 91, 104053. **doi:10.1016/j.landusepol.2019.104053**
- Grazi, F., & Van den Bergh, J.C. (2008). Spatial Organization, Transport and Climate Change: Comparing Instruments of Spatial Planning and Policy. *Ecological Economics*, 67(4), 630-639. **doi:10.1016/j.ecolecon.2008.01.014**
- Habibiyan, M., & Kermanshah, M. (2012). Evaluation of the contribution of transportation management policies on the choice of alternative methods of personal riding in daily business trips. *Transportation*

- Engineering Quarterly, 3(3), 181-197[In Persian].
<https://civilica.com/doc/244927>
- Horridge, M. (1994). A computable general equilibrium model of urban transport demand. *Journal of policy modeling*, 16, 427-457.
doi:10.1016/0161-8938(94)90037-X
- Khosravi, Sh., Haghshenas, H., & Salehi, v. (2020). Macro-Scale Evaluation of Urban Transportation Demand Management Policies in CBD by Using System Dynamics Case Study: Isfahan CBD. *Transportation Research Procedia*, 48(1), 2671-2689. **doi:10.1016/j.trpro.2020.08.246**
- Kimpton, A., Pojani, D., Ryan, C., Ouyang, L., Sipe, N., & Corcoran, J. (2021). Contemporary parking policy, practice, and outcomes in three large Australian cities, *Progress in planning*, 153, 1-25.
doi:10.1016/j.progress.2020.100506
- Lin, J., Kang, J., Khanna, N., Shi, L., Zhao, X., & Liao, J. (2018). Scenario analysis of urban GHG peak and mitigation co-benefits: A case study of Xiamen City, China. *Journal of Cleaner Production*, 171, 972-983.
doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.040
- Liu, Q., Wang, J., Chen, P., & Xiao, Z. (2016). How does parking interplay with the built environment and affect automobile commuting in high-density cities? A case study in China. *Urban Stud*, 54, 3299-3317.
doi:10.1177/0042098016667040
- McAslan, D., & Sprei, F. (2023). Minimum parking requirements and car ownership: An analysis of Swedish municipalities. *Transport Policy*, 135, 45-58. **doi:10.1016/j.tranpol.2023.03.003**
- Ostadi Jafari, M., & Rasafi, A.A. (2013). Environmental model of urban transportation planning using dynamic system models. *Scientific research quarterly of environmental science and technology*, 14(54), 11 - 28 [In Persian]. <https://sid.ir/paper/486515/fa>
- Ostadi Jafari, M., & Habibian, M. (2013). Long-term evaluation of the combined effect of transportation demand management policies using the system dynamics model (case study: Mashhad metropolis). *Transportation Engineering*, 6th year, 1st issue, [In Persian].
<https://civilica.com/doc/489352>
- Rivasplata, C. R. (2013). Congestion pricing for Latin America: Prospects and constraints. *Research in Transportation Economics*, 40(1): 56-65 **doi: 10.1016/j.retrec.2012.06.037**
- Rizzi, L.I., & Maza., C. (2017). The external costs of private versus public road transport in the Metropolitan Area of Santiago, Chile. *Transportation*

- Research Part A: Policy and Practice, 98, 123–140. **doi:10.1016/j.tra.2017.02.002**
- Saputra, H.Y., & F. Radam, I. (2023). Accessibility model of BRT stop locations using Geographically Weighted regression (GWR): A case study in Banjarmasin, Indonesia. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(3), 779-792. **doi:10.1016/j.ijtst.2022.07.002**
- Yang, X., Lin, W., Gong, R., Zhu, M., & Springer, C. (2021). Transport decarbonization in big cities: An integrated environmental co-benefit analysis of vehicles purchases quota-limit and new energy vehicles promotion policy in Beijing. *Sustainable Cities and Society*, 71(5), 102976. **doi:10.1016/j.scs.2021.102976**
- Yin, C., Shao, C., & Wang, X. (2018). Built Environment and Parking Availability: Impacts on Car Ownership and Use. *Sustainability*, 10(7), 1-15. **doi:10.3390/su10072285**
- Zheng, Z., Washington, S., Hyland, P., Sloan, K. & Liu, Y. (2016). Preference Heterogeneity in Mode Choice Based on a Nationwide Survey With a Focus on Urban Rail. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 91, 178-194. **doi:10.1016/j.tra.2016.06.032**
- Zhou, H., Dorsman, J.L., Mandjes, M., & Snelder, M. (2023). Sustainable mobility strategies and their impact: a case study using a multimodal activity based model. *Case Studies on Transport Policy*, 11, 1-19. **doi:10.1016/j.cstp.2022.100945**