



"Research Article"

10.71737/ipm.2025.1105762



The effect of urban transportation infrastructures on the behavior of choosing a private car based on the system dynamics approach

Shahhosseini¹, Reza Radfar (Ph.D)^{*2}, Abbas Toloie-Eshlaghy(Ph.D)³ Ladan

Abstract

People's travel behavior is manifested by choosing one of the travel methods and is influenced by various factors, travel by private car lead to problems, therefore, policy making to change the travel behavior of citizens from traveling by private car to travel by buses is important and the purpose of this research. So that, the present study examines the travel behavior of Tehran citizens in a system dynamics simulation model. So, after identifying the main variables affecting the way of travel through library studies and interviews with experts, the hypotheses of the model were determined, and then by drawing the cause and effect diagram and the state and flow of the model, the relevant mathematical equations were determined and validated. The model was tested. In the following, policies related to the three variables of the number of BRT buses, access to BRT buses and parking capacity were implemented in the form of several scenarios, the results showed that increasing the rate of parking construction does not have favorable results. Also, the increase in the number of BRT bus fleet cannot have an effective role either in the current situation or simultaneously with the conditions of reducing or increasing the rate of parking construction. Reducing the rate of parking alone has favorable results. Also, increasing the number of BRT stations has favorable results, and the implementation of this scenario at the same time as the scenario of reducing the rate of parking is the best scenario among the scenarios.

Keywords: Public transportation, car-oriented, travel behavior, design, system dynamics model

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

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. toloie@srbiau.ac.ir

1. Introduction

The use of private cars has become a major issue for cities around the world due to its externalities, mainly in congestion and environmental pollution. Achieving sustainability in transportation and continuing economic development requires the behavior of 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 increasing. The current statistical situation indicates the importance of the efforts of planners and policy makers in this area; In fact, travel planning seeks to create a balance between travel supply and demand, the first of which depends on the capacity of the transportation network and the second on the amount of travel produced by travelers. 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 (parking capacity, access to BRT stations and BRT fleet). has studied the competitive behavior between choose of private cars and BRT buses in Tehran.

2. Literature review

In recent years, different studies have been conducted in relation to the influencing factors 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 for travel in an urban area in the Netherlands using an activity-based travel demand model. The results showed the improvement of public transportation services and the small transportation network, increases the potential of displacement hubs in terms of making displacement more stable. Also, limiting parking capacity and increasing parking costs in city centers is especially useful for reducing the use of vehicles. 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 and his colleagues (2020) used system dynamics modeling to evaluate transportation demand management policies in the center of Isfahan city. In this research, incentive and restriction policies were investigated in the central commercial area of Isfahan city. 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 showed that completing the metro network development, BRT network development, improving bicycle facilities, road pricing, increasing parking

prices, improving bus services, improving taxi services, even and odd policy and encouraging car sharing are among the most effective policies in the center of the Isfahan.

3. Method

The present study aims to provide a dynamic simulation model of the travel behavior of Tehran citizens with the help of modeling tools, in order to conduct a more detailed analysis of the citizens' behaviors in choosing the travel method and its consequences, and to help improve the behavioral anomalies by the policy makers in the field of transportation. In this research, the research method used in terms of purpose was descriptive, modeling. Also, the variables describing the behavior of choosing the travel method were identified based on the research literature and experts' opinions, and were simulated in a system dynamics model that allows the examination of different policies over time. This research was conducted in Tehran city and the data collected in Tehran city transportation organization regarding the share of Tehran citizens traveling by private car and BRT bus during the period of 2011 to 2021 was used. Since the system dynamics method consists of 5 steps, the model presented in this research was based on its steps. The first step in this process is to identify the problem and its boundaries, in this step, the reference variable and its past behavior are also examined, according to this step, the number of private cars was identified as the main issue and problem that this research follows to reduce it, the second step is to create dynamic hypotheses. In this step, the main variables affecting the problem are examined and the boundary of the model is determined. In this regard, after reviewing the research literature and studying its background, a semi-structured questionnaire was used to get the experts' opinions in such a way that the experts were asked the main questions at the beginning, and during the question and answer process, new questions were asked according to the conditions. They were asked during of the meeting, and by using the opinions of subject matter experts, research variables were collected and completed in the next stages. Using the theoretical foundations of research and experts' opinions, and with the understanding of the problem, cause and effect circles were designed and gradually a complete diagram of cause and effect circles was created so that in the end a simple picture of the real world was formed. In this regard, one of the influential factors in the formation of the undesirable behavior of choosing a private car is the high attractiveness of the private car. After hypothesizing, key variables in the form of independent variables include (parking capacity, number of BRT bus fleet and number of BRT bus stations) and dependent variable (the number of private cars used per day) and how they affect each other were investigated and thus the cause and effect circles were drawn. The next step is to simulate the model in the relevant software, when the main hypotheses and the system boundary are

formed, the model will be able to be implemented, then by entering the mathematical equations and identifying the accumulation, rate and auxiliary variables, the accumulation-flow diagram is presented. Finally, the model was simulated and implemented. By analyzing the changes in the behavior of the model in the past and comparing it with what actually happened in the past, the validation of the model was done to validate the prediction of the behavior of the model in the future in order to implement the last step. In this research, the status of the error index and the coefficient of determination of 97% indicate the validity of the model for predicting the future behavior of the model. Also, one of the other measures required to validate the sensitivity analysis model is 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 are performed and had acceptable results.

4. Result

After simulating and examining the behavior of the model components in the desired thirty-year period, the values of the different variables of the model were changed and their effects were analyzed on the main desired variable, which 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 bus 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 trend of the number of private cars has increased significantly with the increase in the rate of parking construction. In the case of the second scenario or the reduction of the parking construction rate, the results indicated that the trend of the number of private cars will increase at a slower rate than the current situation with the reduction of the parking construction rate. In the third scenario, increasing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate at the same time after simulation, 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 cars. Of course, the increasing slope of the number of private cars in case of simultaneous application of the changes did not change significantly compared to when only the parking rate was increased. In relation to the fourth scenario or the increase in the purchase rate of BRT buses, the simulation results showed that the trend of the number of private cars in the conditions of increasing the purchase rate of BRT buses is not different from the existing conditions, and this means that with the increase in the purchase rate of BRT buses, the number of private cars It is still increasing with the same slope of the existing conditions. In connection with the fifth scenario, or reducing the parking rate and increasing the BRT bus purchase rate

at the same time after applying the changes in the simulation, 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 with the slope is less than the existing conditions. In the sixth scenario or increasing the number of BRT stations, the results also showed that with the increase in the number of BRT stations, the trend of the number of private cars has increased with a lower slope than before the addition of the number of BRT stations. Also, in connection with the seventh scenario, or increasing the rate of parking construction and increasing the number of BRT bus stations at the same time, after performing the simulation, it was observed that the simultaneous application of increasing the rate of parking construction and increasing the number of BRT stations has led to an increase in the number of private cars. In this case, the increasing trend of the number of private cars compared to the time when only the rate of parking construction increases did not change significantly and a slight improvement was made. In the eighth scenario, it was observed that reducing the rate of parking construction and increasing the number of BRT bus stations at the same time after applying the changes in the simulation. The slope is lower than the existing conditions, which resulted in the best results compared to the other seven scenarios.

5. Discuss

The practical results of the current research show that in the current situation, we need to improve access to the BRT buses stations more than we need to increase the BRT bus fleet. Also, buying a BRT bus and building a parking at the same time cannot improve the reduction of the number of private cars. This issue is important for city planners because the simultaneous application of the two policies of building a parking and buying a BRT bus will not improve the behavior of choosing a BRT bus. as long as the time of searching for parking is reduced due to the construction of the parking and the car is still attractive, buying a BRT bus will not help to change the behavior of choosing a private car. In the end, it is mentioned that the practical results obtained show 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 do not develop car infrastructure. Helping the managers of different areas of the municipality to observe the effects of independent policies is one of the other practical results of this research, because the results of the model showed that contradictory decisions can lead to the loss of desirable results and the imposition of heavy costs.



10.71737/jpm.2026.1105762



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 اشلفی^۳

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 قبیل 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 اثرگذار 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 موثری 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.

کلمات 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

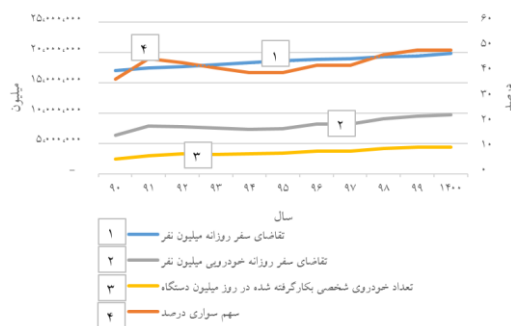
^۲ ستاد دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده

مسئول) r.radfar@srbiau.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران tolioe@srbiau.ac.ir

مقدمه

استفاده از خودروهای شخصی به دلیل اثرات خارجی آن، عمدتاً در ازدحام و آلودگی محیطی، به یک مسئله 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 بدست 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 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 بکارگرفته می شود. همچنین مطابق اطلاعات آورده شده در شکل ۱، سال به سال تقاضای سفرهای روزانه، سهم سواری، تقاضای سفر روزانه خودرویی و تعداد خودروی شخصی بکارگرفته شده در روز میلیون دستگاه، سهم سواری درصد.



شکل ۱. نمودار مرجع

Figure 1: Reference chart

وضعیت آماری موجود حاکی از اهمیت اهتمام برنامه ریزان و سیاست گذاران این حوزه است؛ زیرا انتخاب شیوه سفر بر پایه موقعیت اجتماعی، اقتصادی و محیطی است و این شیوه سفرهای مختلف، هزینه های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی متفاوتی را ایجاد می نماید (گریزی و ون دن برق، ۲۰۰۸). در حقیقت برنامه ریزی سفر به دنبال ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضای سفر است که اولی به ظرفیت های شبکه حمل و نقل و دومی به میزان تولید سفر توسط مسافران بستگی دارد. شناخت تقاضای سفر به برنامه ریزان این

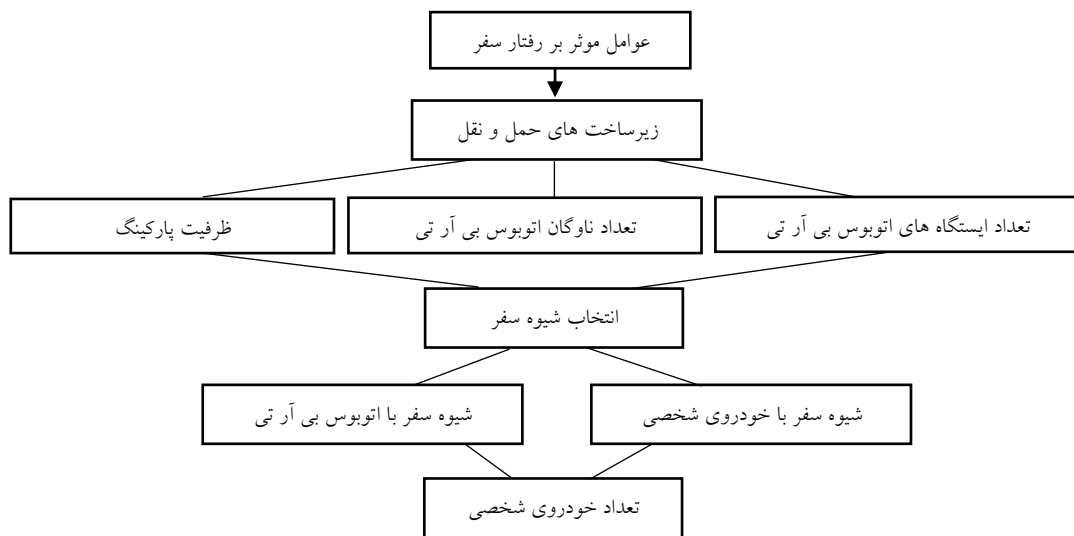
حوزه کمک می‌نماید متناسب با تقاضای واقعی زیرساخت‌های لازم را توسعه دهند و یا از حداکثر ظرفیت شبکه حمل و نقلی موجود بهره‌برداری نمایند. به طور کل سفر نتیجه‌ای از رفتار انتخاب فرد است، رفتار سفر عمدتاً بر موضوعاتی مانند چه زمان، کجا و چگونه افراد سفر می‌نمایند، متمرکز می‌باشد. درک فاکتورهای اثرگذار بر 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 (آکسسن و همکاران، ۱۹۹۳). امروزه در شهرهای مدرن، سیاست‌های مدیریت تقاضای سفر راه‌حل‌های مؤثرتری برای کاهش ترافیک وسایل نقلیه نسبت به توسعه زیرساخت‌های راه‌سازی و حمل و نقل 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 مشکل ترشدن 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 اطلاع‌رسانی، یکپارچه‌سازی 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 (گولیاس، 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.

شود. در حالی که شهرها در هر لحظه از زمان تغییر می نمایند. این مساله یکی از ضعف های این مدل ها می باشد (هوریچ، ۱۹۹۴). با استفاده از روش پویایی های سیستم می توان نه تنها تاثیر مستقیم، بلکه اثرات غیرمستقیم ناشی از متغیرهای مختلف چه متغیرهای درونزای مدل و چه متغیرهای برون زا را شبیه سازی کرد. همچنین با توجه به استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی در مدل سازی دینامیکی، می توان تاثیر سیاست ها را در یک بازه بزرگ مشاهده نمود (هوریچ، ۱۹۹۴). از طرفی سیاست گذاران لازم است به اجرای توأمان سیاست ها توجه داشته باشند. اگرچه پژوهش های اخیر حاکی از پرداختن به رویکرد مجموعه ای از سیاست ها و بررسی ترکیبی از سیاستهای مدیریتی حوزه حمل و نقل بر شیوه انتخاب سفر شهروندان در زمان های مختلف بوده است (حبیبیان و کرمانشاه، ۱۳۹۱). اکنون، بررسی تاثیر مجموعه ای از سیاست ها بر شرایط حمل و نقل جامعه در بلند مدت، با در نظر گرفتن تاثیرات ثانویه سیاستها بر عواملی مانند ویژگی های اجتماعی-اقتصادی، ایجاد و توزیع سفر به عنوان موضوعی جدید مطرح است. به دلایلی چون کمبود تکنولوژی و هزینه بسیار برورسانی آن، هزینه بسیار تغییرعادات سفر شهروندان و توجه به عوامل سیاسی، به طور متعارف سیاست های مدیریتی حمل و نقل در فاصله های زمانی بلندمدتی پایدار است، بنابراین ضرورت اتخاذ سیاستهای کارآمدتر برپایه مدلهای دقیق دیده می شود (استادی جعفری و حبیبیان، ۱۳۹۳). در سال های اخیر مطالعات متفاوتی در رابطه با فاکتورهای اثرگذار بر تصمیم گیری در خصوص انتخاب شیوه سفر صورت گرفته است. ژو و همکارانش (۲۰۲۳) به بررسی سیاست های 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. نتایج نشان داد که معرفی هاب های جابجایی (هاب هایی در سطح همسایگی که در آن شیوه های 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 اشتراک های «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 می یابد. علاوه بر این، بهبود خدمات حمل و نقل عمومی و شبکه حمل و نقل کوچک، پتانسیل هاب های جابجایی را از نظر پایدارتر کردن جابجایی بیشتر می کند. همچنین محدود کردن ظرفیت پارکینگ و افزایش هزینه های پارکینگ در مراکز شهر به ویژه برای کاهش استفاده از وسایل نقلیه مفید است و منجر به بهبود جریان ترافیک می شود. اندرو و همکارانش (۲۰۲۲) به ارزیابی عملیاتی سیستم حمل و نقل سریع اتوبوس بی آر تی در شهر دارالسلام پرداختند. در این مطالعه زمان به عنوان یک معیار ارزیابی عملکرد مورد توجه قرار گرفت و یک رویکرد مدل سازی سلسله مراتبی بیزی و آزمون فرضیه بیزی برای مقایسه عملکرد عملیاتی بی آر تی در برابر اتوبوس های غیر بی آر تی 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 قابل‌توجهی 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 آبی 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 متناسب 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 تاثیر یکپارچه قابل توجهی بر کاهش انتشار و جلوگیری از آسیب به سلامت عمومی خواهد داشت. خسروی و همکارانش (۲۰۲۰) از مدل سازی دینامیک سیستم برای ارزیابی سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل و نقل در مرکز شهر اصفهان استفاده نمودند. در این تحقیق سیاست‌های تشویقی و محدود سازی 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 موثرترین سیاست ها در مرکز شهر اصفهان است. در میان سیاست های ترکیبی، تکمیل توسعه شبکه مترو به طور همزمان با قیمت گذاری محدوده ترافیکی موثرترین 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 ایستگاه های بی آر تی در منطقه مورد مطالعه در بانجارماسین، اندونزی تأثیر می گذارد، پرداختند و سپس مدلی بر اساس معیارهای معنادار ارائه نمودند. در این مطالعه، دسترسی به سیستم با استفاده از روش ترکیبی اندازه گیری و با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی^۱ مدل سازی شد که رویکردی نسبتاً جدید است. نتایج نشان داد که هفت معیار بر سطح دسترسی به ایستگاه های بی آر تی تأثیر می گذارد. معیارهای فضایی برای دسترسی به مکان های توقف بی آر تی در مدل ارائه شده شامل فاصله توقف ها تا تقاطع جاده، شاخص آنتروپی کاربری ترکیبی، تراکم جمعیت و ارزش زمین است. بر این اساس در پژوهش حاضر اثر سیاست های مرتبط با ظرفیت پارکینگ، تعداد اتوبوس بی آر تی و بهبود دسترسی به اتوبوس بی آر تی 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 می باشد. از آنجا که رفتار انتخاب شیوه سفر با خودرو تحت تأثیر متغیرهای مختلفی است که بر یکدیگر به صورت مستقیم و غیر مستقیم تأثیر می گذارند و از طرفی در طول زمان این رفتار تغییر می کند لازم است تأثیر مستقیم و غیرمستقیم ناشی از متغیرهای مختلف چه متغیرهای درونزای مدل و چه متغیرهای برون زا را در یک مدل پویایی سیستم شبیه سازی کرد. همچنین با توجه به استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی در مدل سازی دینامیکی، می توان تأثیر سیاست ها را در یک بازه زمانی بزرگ مشاهده نمود. با توجه به مطالعات صورت گرفته در خصوص عوامل موثر بر انتخاب شیوه سفر خودروی شخصی و انتخاب شیوه سفر حمل و نقل عمومی با سامانه اتوبوس تندرو (بی آر تی)، از جمله ضعف ها و کمبودها در مطالعات پیشین عدم توجه به پیاده سازی همزمان سناریوهای مرتبط با ظرفیت پارکینگ، دسترسی به ایستگاه های بی آر تی و ناوگان بی آر تی در یک مدل پویایی سیستم و بررسی اثر آنها بر انتخاب شیوه سفر خودروی شخصی و انتخاب شیوه سفر حمل و نقل عمومی با سامانه اتوبوس تندرو (بی آر تی) است، بنابراین، این مقاله به طور مشخص با کمک یک مدل پویایی سیستم به بررسی اثر بلند مدت و توامان سیاست های عرضه سفر (ظرفیت پارکینگ، دسترسی به ایستگاه های بی آر تی و ناوگان بی آر تی) بر رفتار رقابتی میان انتخاب خودروی شخصی و اتوبوس بی آر تی در شهر تهران پرداخته است. مدل مفهومی در شکل ۲ ارائه شده است.

^۱Geographically Weighted Regression



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 می باشد. 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 سیاست های مختلف در طول زمان را دارد، شبیه سازی می گردد.

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در شهرستان تهران انجام شده است. مطالعه حاضر در پی ارائه یک مدل شبیه سازی 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 ناهنجاری های رفتاری توسط سیاست گذاران حوزه حمل و نقل انجام پذیرد.

داده ها

در مطالعه حاضر، از داده‌های جمع آوری شده در سازمان حمل و نقل شهر تهران در خصوص سهم سفر شهروندان تهرانی با خودروی شخصی و اتوبوس بی‌آر تی در طی دوره زمانی سال های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰

استفاده شده است. داده‌ها شامل ظرفیت پارکینگ، نرخ ساخت پارکینگ، تعداد خودروهای شخصی، تعداد اتوبوس های بی‌آرتی، تعداد ایستگاه های 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 بکار گرفته شده در روز است.

مراحل پویایی‌شناسی سیستم‌ها

در این پژوهش از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. فرایند پویایی‌شناسی سیستم، از طریق گام های مشخص و مذکور در ادامه سعی در حل یک مساله در قالب مدل یکپارچه و پویا دارد. یک مدل سیستم پویا توانایی تحلیل یک سیستم پیچیده با متغیرهای چندگانه که در طول زمان تغییر می نماید و نشان می دهد چگونه یک سیستم از اجرای سیاست های مختلف تاثیر می پذیرد، را دارد (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 مساله و مرزهای آن است، در این گام همچنین متغیر مرجع و رفتار گذشته آن مورد بررسی قرار می گیرد، تعداد خودروهای شخصی به عنوان منشاء اصلی وجود آلاینده های موجود در هوا، مسئله اصلی و مشکلی است که این پژوهش بر آن تمرکز داشته و به دنبال کاهش آن می باشد، 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 می باشد، 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 تاثیر گذار بر رفتار سفر شهروندان تهرانی با خودروی شخصی و استفاده بیشتر از حمل نقل عمومی است. گام دوم ایجاد فرضیه‌های پویا می باشد در این گام لازم است، متغیر های اصلی تاثیر گذار بر مسئله مورد بررسی قرار گرفته و مرز مدل را مشخص نماییم. از جمله عوامل تاثیر گذار در شکل گیری 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 می یابد، 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 ایستگاه های حمل و نقل عمومی و مدت زمان توقف در ایستگاه ها 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 مسئله حاصل گردیده است حلقه های علی معلولی را طراحی نموده و به تدریج

نمودار کاملی از حلقه‌های علت و معلولی ایجاد می‌نمائیم 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 اعتبار سنجی 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^۱ 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 سوالات اصلی از خبرگان پرسیده شد و در جریان پرسش و پاسخ، سوالات 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 مساله 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 اتوبوس‌بی‌آرتی و تعداد ایستگاه اتوبوس‌بی‌آرتی) و متغیر وابسته (تعداد خودروی شخصی بکارگرفته 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، اعتبار سنجی 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 بکارگرفته شده در روز، واقعی و شبیه سازی

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

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

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 سرنشین آن بدست آمده است. وضعیت شاخص خطا و ضریب تعیین^۱ ۹۷ صدم، حاکی از اعتبار مدل برای پیش بینی رفتار آتی مدل است. همچنین از دیگر اقدامات لازم برای اعتبارسنجی مدل تحلیل حساسیت های صورت گرفته در قالب پیاده سازی سناریوهای مختلف است که نتایج آن به انتخاب سناریوی برتر منجر خواهد شد. این نتایج در بخش نتایج شبیه سازی پژوهش ارائه گردیده است. سایر تست های اعتبار سنجی اعم از آزمون ارزیابی ساختاری، آزمون کیفیت مرز سیستم، آزمون سازگاری ابعادی، آزمون منطق معادلات، آزمون پیش بینی رفتار مدل انجام شد و نتایج قابل قبولی داشت.

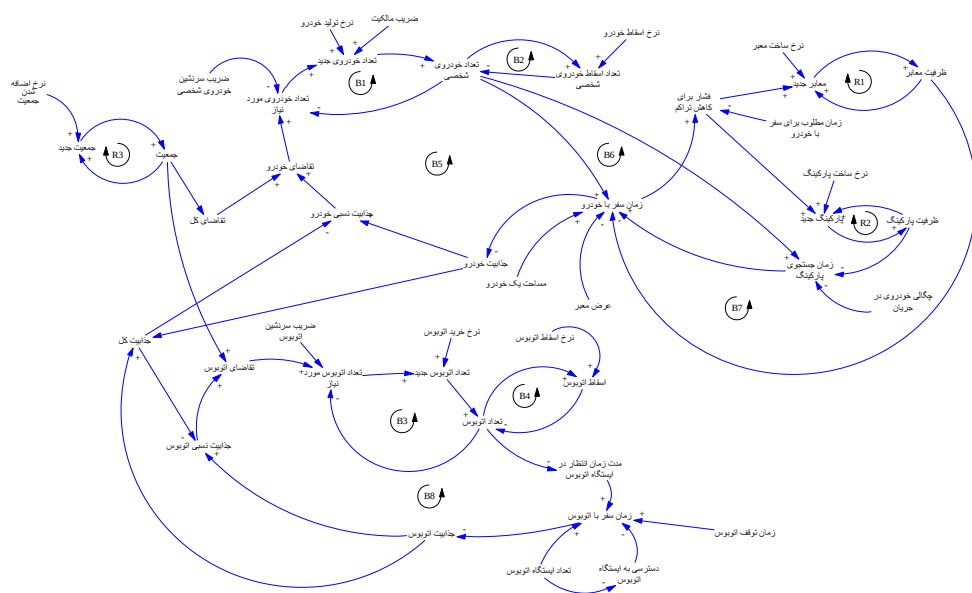
یافته ها

R-squared correlation^۱

مدل مفهومی در قالب نمودار حلقه‌های علی معلولی بدست آمده از ادبیات تحقیق، به رابطه علی و معلولی بین متغیرهای مربوط به عوامل ایجاد رفتار و همچنین رفتارهای سفر و نتیجتاً به پیامدهای این رفتارها خواهد پرداخت که همان فرضیه‌های دینامیکی تحقیق است و در ادامه با کمک نظر خبرگان تکمیل گردیده و مدل نهایی پیشنهاد می‌گردد. در ادامه مدل مفهومی، نمودار انباشت و جریان و نتایج سناریوها ارائه می‌گردد.

ایجاد فرضیه پویا و نمودار علت و معلولی

در این پژوهش در پی بررسی رفتار سفر شهروندان و مطالعه تحقیقات پیشین، متغیرهای کلیدی مشخص و سپس فرضیات مدل به صورت حلقه‌های علی و معلولی ترسیم شد و تجمیع آن‌ها در شکل ۳ ارائه گردید.



شکل ۳. حلقه‌های کلی علت و معلول مدل

Figure 3: General loops of cause and effect model

بعد از ایجاد مدل مفهومی، نوبت ایجاد نمودارهای انباشت-جریان است. با تفکیک متغیرهای مهم به متغیرهای حالت، نرخ و کمکی این نمودار طراحی می شود. بعد از طراحی نمودار جریان، نوبت ورود داده ها و فرمول های ریاضی به نرم افزار و اجرای شبیه سازی مدل است (الهی، ۱۳۹۲). فرمول های ریاضی در ارتباط با هر متغیر است. فرمول های مربوط به متغیرهای حالت، انتگرال جمع جبری متغیرهای نرخ هستند که به طور اتومات توسط نرم افزارها وارد می شوند، در خصوص متغیرهای نرخ و کمکی لازم است فرمول های ریاضی مربوطه مشخص شود. سپس، ثابت های عددی و مقدار ابتدائی متغیرهای حالت مشخص می گردد. ارتباط میان متغیرها با استفاده از روش های مرور ادبیات، مطالعه رفتار آمار گذشته، نظر خبرگان ترسیم می گردد (الهی، ۱۳۹۲). بر این مبنا نمودارهای انباشت جریان برای هر یک از متغیرها در شکل ۴ تدوین گردید.

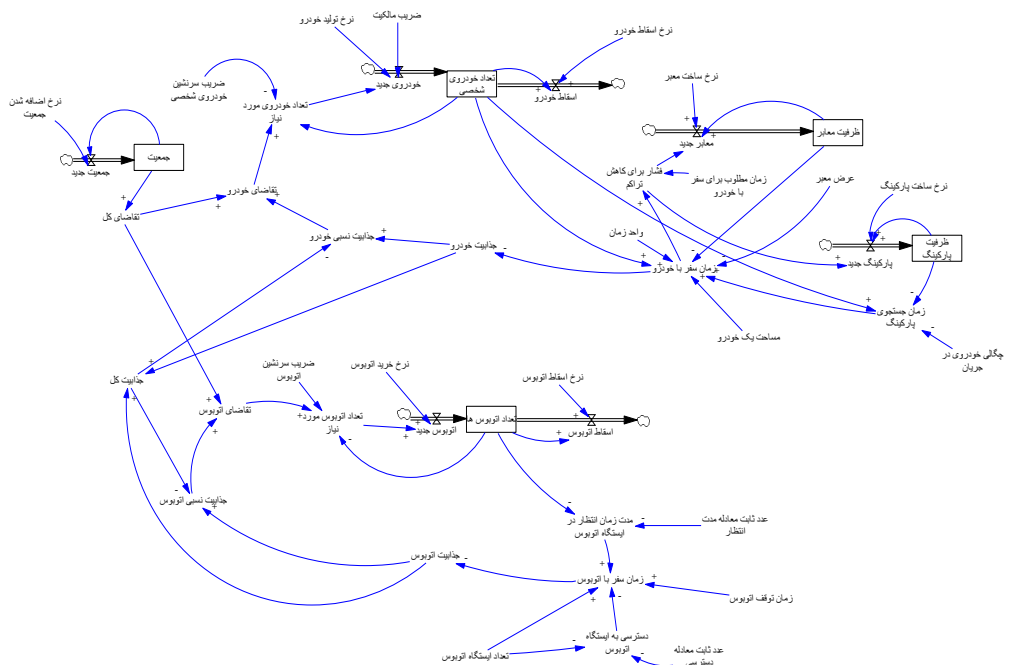


Figure 4: Stock-flow model of research model

روش جمع‌آوری داده‌ها

جمع‌آوری داده‌های پژوهش یکی از گام‌های مهم پژوهش است. در گام جمع‌آوری 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 جمع‌آوری داده‌های موردنیاز این پژوهش عمدتاً از گزیده‌آمار و اطلاعات حمل و نقل و ترافیک تهران و سایر دستگاه‌های مرتبط استفاده شد. داده‌های بدست آمده با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ونسیم 7.3.5 مدل سازی 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 نیمه ساختار یافته 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

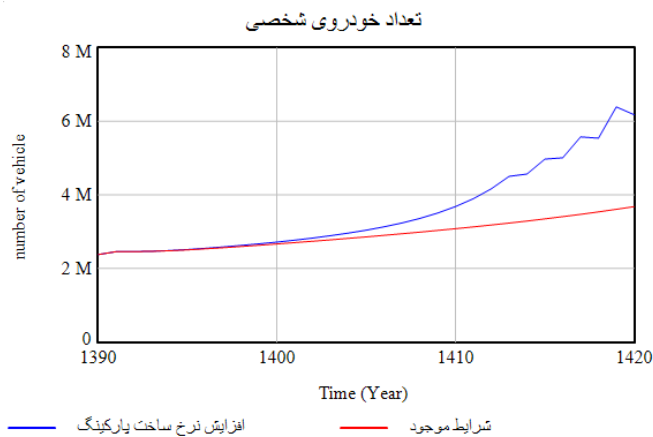
به دنبال بهبود رفتار سفر شهروندان تهرانی نیازمند یک مدل شبیه‌سازی می‌باشیم که در قالب آن امکان بررسی سیاست‌ها و سناریوهای مختلف وجود داشته باشد و از آنجاکه روش پویایی سیستم امکان ارائه یک مدل جامع به جهت سیاست‌گذاری در حوزه حمل و نقل و ترافیک را دارا می‌باشد لذا در این پژوهش از یک مدل پویایی سیستم برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد و از ابزار نرم‌افزار 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 موردنظر، به تغییر مقادیر متغیرهای مختلف مدل و تحلیل تأثیر آن‌ها بر روی متغیر اصلی مورد نظر که تعداد خودروی شخصی بکار 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

خروجی های 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 هم راستا بوده و حاکی از آنست با افزایش عرضه پارکینگ ابتدا جذابیت خودروی شخصی افزایش یافته و رفتار انتخاب شیوه سفر با خودرو تقویت می گردد از اینرو تعداد خودروی شخصی افزایش می یابد ولی در ادامه به دلیل افزایش تراکم خودرو و طولانی تر شدن زمان سفر با خودرو، جذابیت خودروی شخصی کمتر شده و همانطور که نمودار ۴ نشان می دهد مجدداً تعداد خودروی شخصی کاهش می یابد لذا افزایش نرخ ساخت پارکینگ به عنوان یک سناریو مناسب توصیه نمی شود. این سناریو در شکل ۵ ارائه شده است.

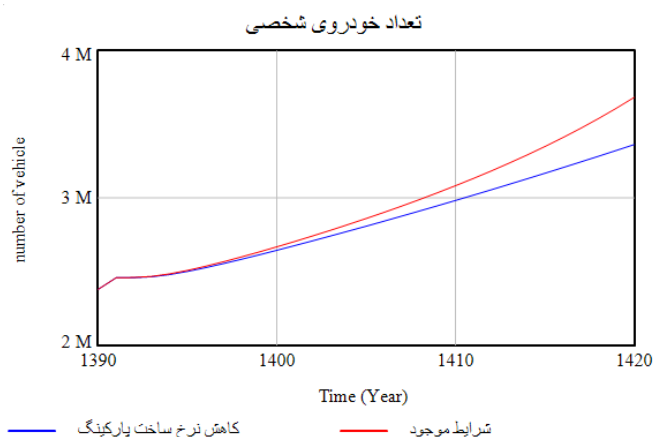


شکل ۵. تعداد خودروی شخصی بکار گرفته شده در روز در حالت افزایش نرخ ساخت پارکینگ

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

سناریوی دوم: کاهش نرخ ساخت پارکینگ

خروجی های نرم افزار ونسیم نشان داد، روند تعداد خودروی شخصی با کاهش نرخ ساخت پارکینگ، با سرعت کمتری نسبت به وضع موجود افزایش می یابد. شرایط به نحوی است که با توجه به اثر گذاری سایر عوامل مانند ساخت معبر، سیاست کاهش نرخ ساخت پارکینگ تا سال های نزدیک به سال ۱۴۰۰ امکان تغییر در تعداد خودروی شخصی نسبت به وضع موجود را نداشته است ولی در بلند مدت در سال های بعد از سال ۱۴۰۰ نسبت به شرایط موجود، سیاست کاهش نرخ ساخت پارکینگ موثر واقع شده است. لذا کاهش نرخ ساخت پارکینگ به عنوان یک سناریو مناسب توصیه می شود. این روند در شکل ۶ نشان داده شده است.

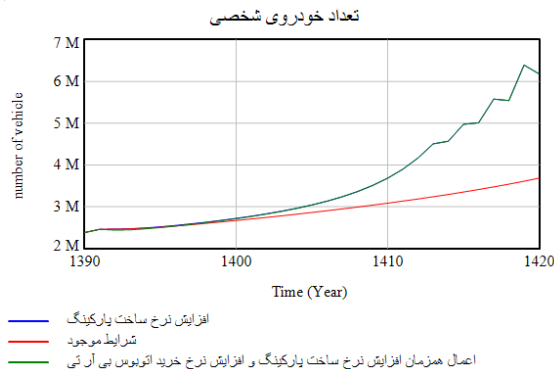


شکل ۶. تعداد خودروی شخصی بکار گرفته شده در روز در حالت کاهش نرخ ساخت پارکینگ

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 بی آر تی به صورت همزمان پس از انجام شبیه سازی مشاهده گردید اعمال همزمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی منجر به افزایش روند تعداد خودروی شخصی می گردد. البته شیب افزایشی روند تعداد خودروی شخصی در صورت اعمال همزمان تغییرات نسبت به زمانی که فقط نرخ ساخت پارکینگ افزایش می یابد تغییر خاصی ننموده است. به نحوی که نتایج سناریوی اول و سوم مشابه هم می باشد. لذا اعمال همزمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی نتایج مطلوبی در پی ندارد. به

عبارتی با افزایش نرخ ساخت پارکینگ جذابیت خودروی شخصی به میزان زیادی افزایش می یابد به صورتی که حتی با افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی، هم امکان رقابت اتوبوس بی آر تی با خودروی شخصی وجود ندارد و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی در تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی آر تی بی تاثیر است. این سناریو در شکل ۷ ارائه شده است.

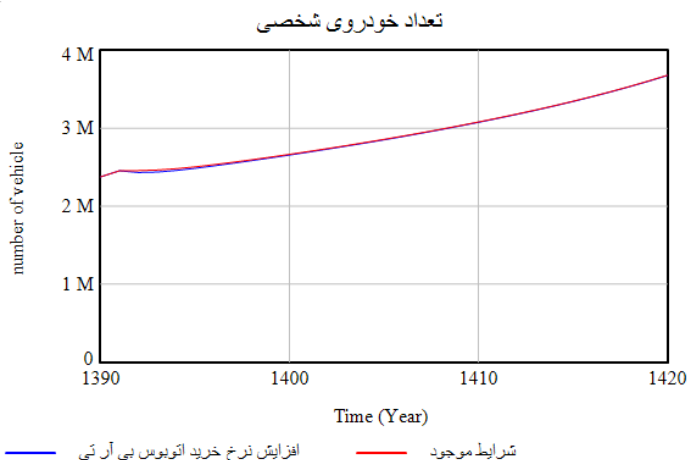


شکل ۷. تعداد خودروی شخصی بکار گرفته شده در روز در حالت اعمال همزمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی

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 بی آر تی

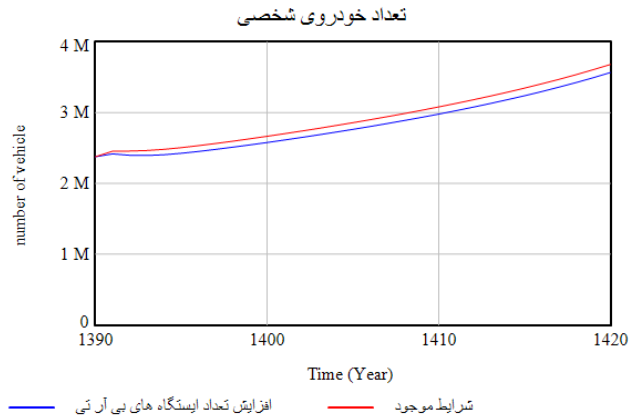
خروجی های شبیه سازی نشان داد، روند تعداد خودروی شخصی در شرایط افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی تفاوتی با شرایط موجود ندارد و این بدان معنی است که با افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی، تعداد خودروی شخصی هم چنان با همان شیب شرایط موجود، افزایشی است. به عبارت دیگر تا زمانی که در شرایط موجود، پارکینگ ساخته می شود حتی اگر اتوبوس بی آر تی خریداری شود، به دلیل اینکه هنوز خودرو جذاب است امکان رقابت اتوبوس بی آر تی با خودروی شخصی وجود ندارد لذا در وضعیت ساخت پارکینگ با نرخ ساخت شرایط موجود، افزایش نرخ خرید اتوبوس به عنوان یک سناریو مناسب توصیه نمی گردد. این سناریو در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. تعداد خودروی شخصی بکار 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 شبیه سازی، 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 می گردد. 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 می تواند 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 ملاحظه ای ندارد. بدین ترتیب کاهش نرخ ساخت پارکینگ به تنهایی در تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی آر تی موثر است. لذا سناریوی اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی به عنوان یک سناریوی موثر توصیه نمی گردد. این سناریو در شکل ۹ ارائه شده است.

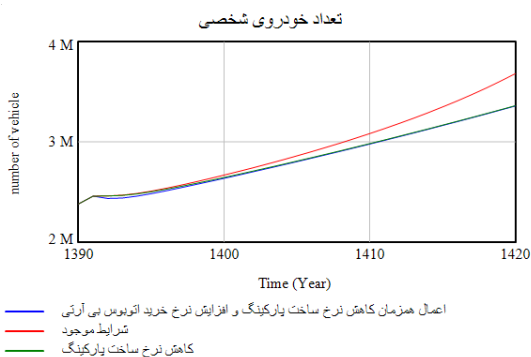


شکل ۹. تعداد خودروی شخصی بکار گرفته شده در روز در حالت اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش نرخ خرید اتوبوس بی آر تی

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 ایستگاه های بی آر تی

پس از اعمال تغییرات در شبیه سازی، مشاهده شد، با افزایش تعداد ایستگاه های بی آر تی روند تعداد خودروی شخصی با شیب کمتری نسبت به قبل از اضافه شدن در تعداد ایستگاه های بی آر تی افزایش خواهد یافت. لذا افزایش تعداد ایستگاه های بی آر تی به عنوان یک سناریو مناسب توصیه می گردد. این سناریو در شکل ۱۰ ارائه شده است.

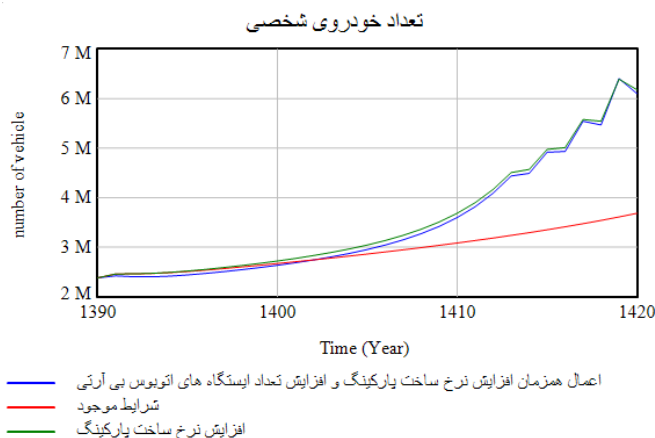


شکل ۱۰. تعداد خودروی شخصی بکار گرفته شده در روز در حالت افزایش تعداد ایستگاه های بی آر تی

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 بی‌تاثیر است. این سناریو در شکل ۱۱ ارائه شده است.

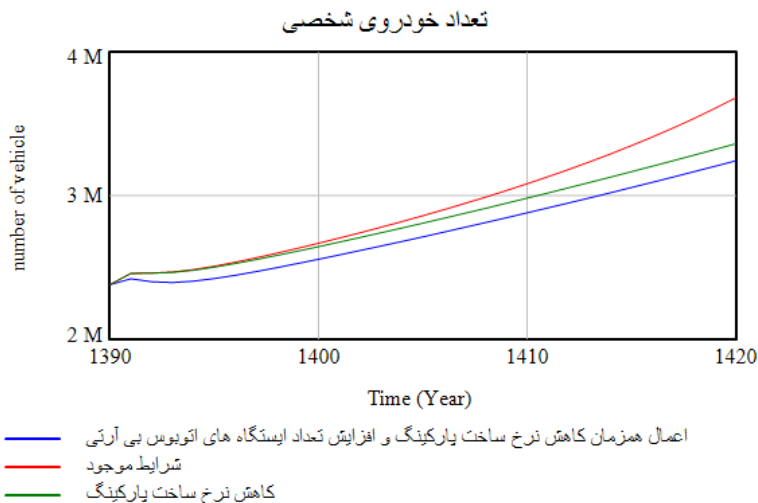


شکل ۱۱. تعداد خودروی شخصی بکار گرفته شده در روز در حالت اعمال همزمان افزایش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی

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 ایستگاه های اتوبوس بی آر تی به صورت همزمان

پس از اعمال تغییرات در شبیه سازی، مشاهده شد، اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه های اتوبوس بی آر تی منجر به افزایش روند تعداد خودروی شخصی با شیب کمتری نسبت به شرایط موجود می گردد. از طرف دیگر اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه های اتوبوس بی آر تی در مقایسه با سناریوی صرفاً کاهش نرخ ساخت پارکینگ نتایج بهتری نشان می دهد. لذا اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه های اتوبوس بی آر تی نتایج مطلوبی در پی دارد. به عبارتی با کاهش نرخ ساخت پارکینگ جذابیت خودروی شخصی کاهش می یابد و با افزایش تعداد ایستگاه های اتوبوس بی آر تی، امکان رقابت اتوبوس بی آر تی با خودروی شخصی فراهم می گردد. به بیان دیگر افزایش تعداد ایستگاه های اتوبوس بی آر تی در تغییر شیوه سفر از خودروی شخصی به اتوبوس بی آر تی در شرایط کاهش نرخ ساخت پارکینگ موثر است. این سناریو در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۱۲. تعداد خودروی شخصی بکار گرفته شده در روز در حالت اعمال همزمان کاهش نرخ ساخت پارکینگ و افزایش تعداد ایستگاه های اتوبوس بی آر تی

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

نتیجه‌گیری

موضوع خودرو محوری به دلیل پیامدهای آن از قبیل آلودگی هوا و ترافیک مورد توجه پژوهشگران و برنامه ریزان 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 بودجه ریزی می‌تواند برای برنامه ریزان شهری حائز اهمیت باشد.

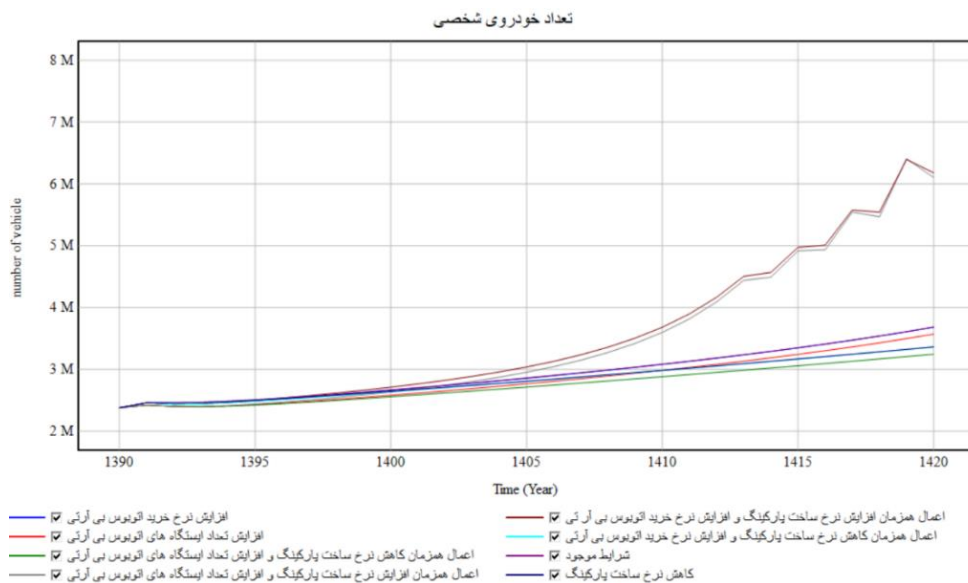
در پژوهش حاضر، با انجام شبیه‌سازی و تغییر مقادیر متغیرها، رفتار متغیر تعداد خودروی شخصی مورد بررسی قرار گرفت و سپس نسبت به شناسایی متغیرهای اصلی از قبیل: ظرفیت پارکینگ، تعداد اتوبوس بی‌آرتی و تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بی‌آرتی اقدام گردید. سپس هشت سناریو در جهت فهم رفتار انتخاب خودروی شخصی نسبت به اتوبوس 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 بکارگرفته 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 بی آر تی نمی نماید. در مقابل کاهش نرخ ساخت پارکینگ همزمان با افزایش تعداد ایستگاه های اتوبوس بی آر تی در سناریوی هشتم در بین سناریوهای حاضر بهترین نتایج را به دنبال دارد، زیرا علاوه بر کاهش جذابیت خودروی شخصی در اثر مهار پارکینگ سازی، افزایش تعداد ایستگاه های بی آر تی به دلیل آنکه دسترسی بیشتری ایجاد می نماید مطلوبیت سفر با اتوبوس بی آر تی را افزایش داده و در نهایت کاهش سرعت در روند افزایشی تعداد خودروی شخصی را به دنبال خواهد داشت. نتایج کاربردی پژوهش حاضر نشان می دهد در شرایط حاضر بیشتر از آنکه نیازمند افزایش ناوگان اتوبوس بی آر تی باشیم نیازمند بهبود دسترسی به استفاده از اتوبوس بی آر تی می باشیم. همچنین خرید اتوبوس بی آر تی و ساخت پارکینگ به صورت همزمان نمی تواند 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 بی آر تی بهبودی در رفتار انتخاب اتوبوس بی آر تی ایجاد نمی نماید و تا زمانی که به واسطه ساخت پارکینگ زمان جستجوی پارکینگ کاهش پیدا نموده و خودرو همچنان جذاب است خرید اتوبوس بی آر تی کمکی به تغییر رفتار انتخاب خودروی شخصی نمی نماید این مهم می تواند در زمان

تخصیص بودجه برای برنامه ریزان شهری مورد توجه قرار گیرد. نتایج کاربردی بدست آمده نشان می‌دهد انتخاب شیوه سفر اتوبوس بی‌آرتی در مقایسه با خودروی شخصی تنها زمانی امکان پذیر است که علاوه بر تقویت زیرساخت های اتوبوس بی‌آرتی، از توسعه زیرساخت های خودرویی صرف نظر نمایم. کمک به مدیران حوزه های مختلف شهرداری برای مشاهده آثار سیاست گذاری های مستقل از یکدیگر از دیگر نتایج کاربردی پژوهش حاضر است، زیرا نتایج مدل نشان داد تصمیم گیری های متناقض می‌تواند منجر به از بین رفتن نتایج مطلوب و تحمیل هزینه های سنگین گردد. در شکل ۱۳ و جدول ۲ نتایج سناریوها با یکدیگر مقایسه شده است.

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

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



در پایان پیشنهاد می شود در کنار متغیرهای مرتبط با زیرساخت های حمل و نقل شهری، متغیرهای دیگری از جنس ویژگی های فردی مانند نگرش، درآمد، سن و از این قبیل به مدل اضافه گردد و تاثیر آنها بر رفتار انتخاب خودروی شخصی و اتوبوس بی آر تی بررسی

جدول ۲. مقایسه سناریوها براساس شاخص تعداد خودروی شخصی بکار 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

سناریو	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	وضع فعلی
scenario	1	2	3	4	5	6	7	8	current
تعداد number	6180760	3362890	6178390	3680860	3359840	3569750	6101690	3243870	3683830

شود.

همچنین از محدودیت های پژوهش حاضر، می توان محدود بودن مدل به داده ها و معادلات بدست آمده از آن برای شهر تهران را نام برد، با تغییر در مقادیر و برخی معادلات، بکارگیری 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 منافع 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, spring [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, 100020. <https://doi.org/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. <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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.126>
- Cherchi, E., (۲۰۱۹). Our IATBR: ۴۵ years contributing to travel behavior research in Mapping the Travel Behavior Genome. K.G.a.A.W.D. Goulias, Editor. Elsevier, ۱۷-۲۸. <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, 161-177. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. (201۲). 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. [https://doi.org/10.1016/0161-8938\(94\)90037-X](https://doi.org/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, 2671. 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, 100506. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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.
<https://doi.org/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. <https://doi.org/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, 102976. <https://doi.org/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, 2285. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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, 100945. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.100945>