Designing a Dynamic Model of the Impact of Infrastructure and Technology on the Traffic Flow of Tehran Metropolis*

Original Article

Seyyed Jafar Tashakori Hashemi[1], Abbas Toloui Ashlaghi[2], Shahriar Effendizadeh[3], Reza Radfar[4]**

1- Ph.D. candidate of Industrial Strategy, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran, Iran
2- Professor in Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, Islamic Azad University, Science and Research Unit, Tehran, Iran
3- Professor in Transportation Planning Department, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
4- Professor, Management and Economics Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 2024-04-12
Revised: 2024-05-31
Accepted: 2024-06-15

Keywords
Behavior
Car
Driving
Dynamic Model
Road
Technology
Traffic

ABSTRACT

Introduction

Driving behavior refers to a set of actions and reactions that are relatively stable, visible, measured, and predicted by humans in the field of traffic and the use of transportation systems, which are caused by external stimuli, either software or hardware, on how they and other road users move. It affects and can have positive or negative effects on the flow of traffic. In this research, attention has been turned from a linear view of the problem to a non-linear and multifactorial view. This research seeks to investigate driving behavior using simulation based on the dynamic system approach. The main goal of the article is to present a practical model resulting from the design of driving behavior in Tehran city in interaction with road and technology elements.

Materials and Methods

In order to achieve this goal, while studying the literature and background of the subject and reviewing the available documents and data, the most important driving behavior variables were collected and based on this, the dynamic hypotheses of the model were identified and selected. In the following, cause and effect diagrams and accumulation-flow diagrams were drawn and mathematical functions related to the relationship of model variables were extracted. In this research, the opinions of experts in different executive departments were used in the form of semi-open interviews. The main part of the required data has been collected and analyzed from the existing data banks in the traffic related units of Tehran. At the end, after testing the dynamic model using Vansim software, different scenarios were proposed to apply the model. The results of the selected scenarios show improvement in variables related to driving behavior in the short term and its reduction in the long term.

Findings

The results of the implementation of the dynamic model created for two sets of scenarios, one set has two scenarios (including the variables of economic growth and productivity) and the second

* This article is taken from the doctoral thesis of the first author entitled "Designing a dynamic model of traffic behavior in Tehran city" under the guidance of Dr. Abbas Toloui Ashlaghi and the advice of Dr. Shahryar Rafandizadeh at the Faculty of Management and Economics, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Branch.

** Corresponding author: toloie@gmail.com

set has three scenarios (including the variables of investment speed in technology, depreciation speed technology and the speed of technology growth), determined and showed that the greatest impact on the growth rate of automobile technology is affected by the increase in investment in this field; The effectiveness of preventive technology depends more than any variable on the speed of technology development, and in the matter of accidents, although all the changes in the mentioned situations are important and lead to a reduction in accidents, other analyzes showed that this reduction will decrease over time. And its changes will be close to zero (it will not be equal to zero, but it is close to it) and it is necessary to compensate for this by using other variables such as police authority.

Conclusion

The results obtained can be expressed as follows: First, the promotion of order, which can be considered as a function of attention to safety and the promotion of public culture, and can be achieved as a result of the increase in national income per capita, is an effective factor on reducing accidents; Secondly, the promotion of preventive technologies will play a significant role in increasing driving safety and thus reducing accidents, and thirdly, increasing the capacity of roads cannot play an effective role in reducing the rate of accidents and sometimes it will have the opposite result.

Based on this and relying on the introduced model and the findings derived from its implementation, it can be suggested that the more the investment in automobile technology increases, the more products will improve, its effectiveness and growth. Also, the speed of growth of automobile technology can further strengthen the preventive role of technology. It seems that even if the country has a significant growth in its income, it will not be possible to solve the traffic problem through the development of urban infrastructure.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

COPYRIGHTS

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Takshari Hashemi S. J. Toloui Ashlaghi A. Effendizadeh Sh. Designing a Dynamic Model of the Impact of Infrastructure and Technology on the Traffic Flow of Tehran Metropolis. Urban Economics and Planning Vol 5(1):120-136. [In Persian]

DOI: 10.22034/UEP.2024.452118.1477

طراحی مدل دینامیکی تأثیر زیرساخت و فناوری بر جریان ترافیک کلان‌شهر تهران*

مقاله پژوهشی

سید جعفر تشکری هاشمی[۱]؛ عباس طلوعی اشلقی[۲]؛ شهریار افندی‌زاده[۳]؛ رضا رادفر[۴]**

۱- دانشجوی دکتری استراتژی صنعتی گروه مدیریت صنعتی، دانشکدهٔ مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی دانشکدهٔ مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۳- استاد، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
٤- استاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

کلمات کلیدی

ترافیک
جاده
خودرو
رفتار رانندگی
طراحی
فناوری
مدل دینامیکی

چکیده

مقدمه

رفتار رانندگی به مجموعه‌ای از کنش‌ها و واکنش‌های نسبتاً پایدار، قابل رؤیت، سنجش و پیش‌بینی انسان‌ها در عرصهٔ ترافیک و استفاده از سامانه‌های حمل‌ونقل گفته می‌شود که بر اثر محرک‌های بیرونی اعم از نرم‌افزاری و یا سخت‌افزاری بر چگونگی آمدوشد آنان و سایر کاربران راه تأثیر گذاشته و می‌تواند آثار مثبت و یا مخرب بر جریان ترافیک داشته باشد. در این پژوهش توجه از نگاه خطی به مسئله، به نگاه غیرخطی و چندعامله معطوف شده است. این پژوهش به دنبال بررسی رفتار رانندگی با استفاده از شبیه‌سازی بر اساس رویکرد سیستم داینامیک است. هدف اصلی مقاله، ارائهٔ مدل کاربردی ناشی از طراحی رفتار رانندگی در شهر تهران در تعامل با عنصر راه و فناوری است.

مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به این هدف، ضمن مطالعهٔ ادبیات و پیشینهٔ موضوع و بررسی مستندات و داده‌های موجود ابتدا مهم‌ترین متغیرهای رفتار رانندگی جمع‌آوری و بر این اساس فرضیه‌های پویایی مدل شناسایی و انتخاب شد. در ادامه نمودارهای علت و معلولی و انباشت- جریان ترسیم و توابع ریاضی مربوط به ارتباط متغیرهای مدل استخراج شد. در این پژوهش از نظرت خبرگان در بخش‌های مختلف اجرایی در قالب مصاحبهٔ نیمه‌باز استفاده شد. بخش اصلی از داده‌های مورد نیاز از بانک‌های داده‌ای موجود در واحدهای مرتبط با ترافیک شهر تهران جمع‌آوری و تحلیل شده است. در پایان پس از آزمون مدل پویا با استفاده از نرم‌افزار ونسیم، سناریوهای مختلف برای کاربردی کردن مدل پیشنهاد شد. نتایج سناریوهای منتخب بهبود در متغیرهای مربوط به رفتار رانندگی در کوتاه‌مدت و کاهش آن در بلندمدت را نشان می‌دهد.

یافته‌ها

نتایج حاصل از اجرای مدل داینامیک ایجادشده برای دو مجموعه سناریو که یک مجموعه دارای دو سناریو (شامل متغیرهای سرعت رشد اقتصادی و بهره‌وری) و مجموعهٔ دوم دارای سه سناریو (شامل متغیرهای سرعت سرمایه‌گذاری در تکنولوژی، سرعت استهلاک تکنولوژی و سرعت رشد تکنولوژی) بوده است، تعیین کرد و نشان داد بیشترین تأثیر در نرخ رشد تکنولوژی خودرو متأثر از افزایش

* این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکترای نویسندهٔ نخست با عنوان «طراحی مدل دینامیکی رفتار ترافیکی در شهر تهران» به راهنمایی دکتر عباس طلوعی اشلقی و مشاورهٔ دکتر شهریار افندی‌زاده در دانشکدهٔ مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران است.

** نویسندهٔ مسئول: toloie@gmail.com

سـرمایه‌گذاری در ایـن حوزه اسـت؛ اثربخشـی تکنولـوژی پیشـگیرانه بیش از هر متغیری وابسـته به سـرعت رشـد تکنولوژی اسـت و در موضوع تصادفـات، گرچه همـهٔ تغییـرات در وضعیت‌هـای یادشـده حائـز اهمیت هسـتند و بـه کاهش منجر می‌شـوند، امـا سـایر تحلیل‌هـا نشـان داد این کاهش طـی زمان کمتر خواهد شـد و تغییـرات آن بـه صفـر نزدیک خواهد شـد (معادل صفـر نخواهد بـود، ولی به آن نزدیـک اسـت) و لازم اسـت بـا اسـتفاده از متغیرهـای دیگـری همچـون اقتـدار پلیس این موضوع جبران شود.

نتیجه‌گیری

نتایـج حاصلـه را می‌تـوان چنیـن بیان کـرد که نخسـت، ارتقای نظم کـه می‌تواند بـه عنـوان تابعـی از توجـه بـه ایمنـی و ارتقـای فرهنـگ عمومـی در نظـر گرفته شـود و بـر اثـر افزایـش سـرانهٔ درآمـد ملـی قابـل حصـول خواهـد بـود، عاملـی اثرگـذار بـر کاهـش تصادفـات اسـت؛ دوم، ارتقـای تکنولوژی‌هـای پیشـگیرانه، نقـش شـایانی در افزایـش ایمنی رانندگـی و در نتیجـه، کاهش تصادفـات خواهد داشـت و سـوم، افزایـش ظرفیـت معابـر نمی‌توانـد نقـش مؤثـری در کاهش نرخ تصادفات ایفا کند و حتی گاهی نتیجهٔ عکس خواهد داشت.

بـر همیـن اسـاس و با تکیـه بر مـدل معرفی‌شـده و یافته‌های مسـتخرج از اجرای آن، می‌تـوان پیشـنهاد کـرد که هرچـه افزایش سـرمایه‌گذاری در فنـاوری خودرو هرچه بیشـتر باشـد شـاهد بهبود بیشـتر محصولات، اثربخشـی و رشـد بیشـتر آن خواهیـم بود. همچنین سـرعت رشـد تکنولوژی خـودرو می‌تواند نقش پیشـگیرانه بـودن فنـاوری را هرچـه بیشـتر تقویـت کنـد. بـه نظـر می‌رسـد حتی اگر کشـور دارای رشـد چشـمگیر در درآمدهـای خـود باشـد، حـل مشـکل ترافیـک از طریق توسعهٔ زیرساخت شهری امکان‌پذیر نخواهد بود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مقدمه

ترافیک یا شدآمد، پدیده‌ای آشنا و عجین‌شده با زندگی بشر است. بیش از یک قرن است که با ورود خودرو و توسعهٔ معابر، جابه‌جایی انسان و بار، سهولت در رفت و آمد، کاهش هزینه‌ها، دسترسی راحت و سرعت در کار را به دنبال داشته است، اما این یک طرف سکه است، سمت دیگر آن تراکم ترافیک، اتلاف وقت، آلودگی هوا و خسارت‌ها و تلفات است. هرچند رشد فناوری‌های خودرو و جاده در کوتاه‌مدت کمک شایانی به کاهش معضلات استفاده از خودرو داشته و تکنولوژی‌های نوین در تلاش برای کاهش پیامدهای نامطلوب ناشی از کارکرد خودرو هستند، اما همچنان مسئلهٔ اول و دغدغهٔ اصلی شهروندان به‌خصوص در شهرهای بزرگ و پرجمعیت، آلودگی هوا، اتلاف وقت در ترافیک، خسارت‌های جانی و مالی تصادفات و معضلات رفتاری رانندگان و عابران است. براساس گزارش سازمان بهداشت جهانی صدمات و خسارت‌های ناشی از تصادفات جاده‌ای در زمرهٔ یکی از چهار عنصر اصلی (بیماری‌های قلبی و عروقی، سوانح، سرطان و بیماری‌های غیر عفونی) است که سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند [۱]. در مطالعهٔ دیگری که در برزیل انجام شد، حوادث ترافیکی به عنوان دومین علت مهم مرگ‌ومیر افراد ۱۵ تا ۳۹ ساله معرفی شده است [۲]. حوادث ترافیکی به مثابه نوک کوه یخ است که پیامدهای ناگوار اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی بخش زیرین آن است و آثاری بلندمدت بر پیکرهٔ جامعه خواهد داشت. حوادث ترافیکی نه فقط به دلیل آسیب‌های جسمی یا ضرر و زیان مادی، بلکه همچنین به دلیل تأثیرات روانی که پس از حادثه به جا می‌گذارد مانند افسردگی، اضطراب و استرس پس از سانحه حائز اهمیت است [۳ و ۴].

تصادفات جاده‌ای بالاترین هزینه‌ها را به جامعه و اقتصاد حتی در مقایسه با خسارت‌های آلودگی هوا وارد می‌کند [۵]. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی روزانه با مرگ بیش از ۳۷۰۰ نفر و آسیب‌دیدگی ۵۵ تا ۱۳۷ هزار نفر در تصادفات جاده‌ای در سراسر جهان، ضرر و زیان اقتصادی قابل ملاحظه‌ای که حدود ۳ درصد تولید ناخالص ملی کشورها است وارد می‌شود. این رقم در برخی کشورها به ۵ درصد هم می‌رسد [۶]. در سال ۲۰۲۴ گزارش امیدوارکننده‌ای توسط این سازمان منتشر شد که تلفات سالانه به ۱/۱۹ میلیون نفر کاهش یافته و در برخی کشورهای در حال توسعه نرخ کاهش ۵۰ را نشان می‌دهد. طبق این مطالعه، تصادفات علت اصلی مرگ افراد ۵ تا ۲۹ ساله است و از هر ۱۰ نفر فوتی ۹ نفر در کشورهای کم‌درآمد یا با درآمد متوسط اتفاق می‌افتد و این در حالی است که کشور ما به لحاظ آمار کشته‌شدگان تصادفات با ۲۰/۵ کشته در هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت، مقام هفتاد و دوم در میان ۱۹۰ کشور را دارد (سازمان بهداشت جهانی ۲۰۲۰). به بیانی، ۱۱۸ کشور جهان وضعیت ایمنی بهتری نسبت به ما دارند. این موضوع نشان‌دهندهٔ نیاز حیاتی کشور به شناخت ریشه‌ای این بحران و اقدام فوری برای کاهش مرگ‌ومیر و تبعات ناشی از آن است. اگر تجزیه‌وتحلیل درست از وقایع ترافیکی و اقدامات مناسب برای کنترل شرایط صورت نپذیرد، درنهایت نه تنها تصادفات و جراحت‌های ناشی از تصادفات رانندگی کاهش نخواهد یافت، بلکه این روند همچنان افزایشی خواهد بود. در این پژوهش به بررسی دلایل وقوع حوادث رانندگی خواهیم پرداخت. با امعان نظر به اینکه تصمیم‌گیری در امر ترافیک دارای متولیان متعدد بوده و هر یک فقط به آثار و نتایج عملکردی خود توجه می‌کنند، این پژوهش به فهم بهتر اولویت‌ها در بهبود حمل‌ونقل و «ضرورت مدیریت یکپارچهٔ ترافیکی» در شهرها کمک می‌کند و می‌تواند نسبت به نزدیک کردن دیدگاه‌های دستگاه‌های مسئول و شکل‌گیری مدیریت یکپارچه، حداقل در موضوع ترافیک کمک کند. شناخت متغیرها و روابط میان متغیرهای اثرگذار بر تصادفات ترافیکی که خود نیز بر یکدیگر اثرگذارند در یک مدل پویایی سیستم امکان‌پذیر است. حمل‌ونقل، سیستمی پویا است که مؤلفه‌های زیادی در آن دخیل هستند [۷] لذا استفاده از روش‌های سنتی برای تحلیل مشکلات ترافیک شهری به دلایل متعدد از جمله توسعهٔ مداوم شهرها، تغییرات ترافیک شهری، تأثیرات مختلف کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت ازدحام ترافیک، دسترسی به داده‌های محدود و غیره چالش‌برانگیز خواهد بود. از این‌رو استفاده از پویایی سیستم می‌تواند راهی مناسب برای اجتناب از این مشکلات باشد. حمل‌ونقل شهری، سیستماتیک، یکپارچه و پیچیده است. پیچیدگی به دلیل پدیده‌ای به عنوان «یک علت و چندین اثر» و «یک اثر و چندین علت» است. علاوه بر این، اقتصاد، جمعیت، محیط، انرژی و مسائل دیگر به عدم خطی بودن سیستم منجر می‌شود. لذا برای حل این مشکل باید یک مدل دینامیکی با ابزارهایی همچون ساختار سیستم، حلقهٔ علّی، نمودار جریان، بازخورد، به کار گرفته شود، زیرا می‌تواند یک تحلیل کیفی و کمی از تشکیل تراکم ترافیک ارائه دهد [۸]. با این توضیحات پژوهشگر به دنبال پاسخ‌گویی به این سؤال است که مدل دینامیکی مناسب برای بررسی تأثیر زیرساخت (از جمله ایجاد و افزایش ظرفیت معابر) و فناوری (نظیر تکنولوژی خودرو و تکنولوژی‌های پیگیرانه) بر جریان ترافیک کلان‌شهر تهران کدام است؟ در همین راستا در ادامهٔ پژوهش، پس از بررسی مبانی نظری، روش تحقیق ارائه و مدل معرفی شده و با اجرای سناریوهایی اقدام به بررسی اثر هر یک از متغیرها شده است.

مبانی نظری تحقیق

رفتار، برآیند عوامل فردی، موقعیتی و محیطی و برخی عملکردهای متقابل احتمالی فرد و محیط است. فرد به عنوان یک مؤلفهٔ انسانی است، در حالی که موقعیت و یا محیط تحت عنوان عوامل مربوط به وسیلهٔ نقلیه، محیط و جاده در ترافیک در نظر گرفته می‌شود. انسان (به عنوان استفاده‌کننده از جاده) همچنین در یک محیط چندسطحی پیچیدهٔ اجتماعی، فرهنگی و فنی ترافیک قرار دارد. بنابراین، هر پیامدی، نظیر تصادف، نتیجه‌ای از عوامل انسانی (نظیر استفاده‌کننده از جاده)، محیط و کنش‌های متقابل احتمالی عامل انسان و محیط است [۲۰]. تعامل میان این مؤلفه‌ها (فرد، موقعیت و محیط) موجب شکل‌گیری رفتار رانندگی (نظیر تخلفات از قانون و تصادفات)، پیامدهای شخصی (نظیر سلامت، وضعیت روانی و خستگی) و روابط متقابل بین فردی (نظیر رفتارهای تهاجمی و قضاوت‌های دربارهٔ دیگران) می‌شود [۲۱].

طبق یافته‌های علمی، ترافیک از سه عنصر اصلی شامل: انسان، راه و خودرو تشکیل می‌شود. تصادفات ناشی از ضعف و نقص عملکرد هر یک از این عوامل است. بنابراین برای شناخت و حل معضلات ترافیکی توجه خود را باید معطوف به این سه عنصر بکنیم. تلاش‌های زیادی برای شناسایی و تجزیه‌وتحلیل عوامل مؤثر بر تصادفات جاده‌ای و شدت آن انجام شده که از آن میان محیط زیست و عوامل جاده‌ای [۲۲]، ویژگی‌های فنی و ساختاری خودرو [۲۳ و ۲۴] و عوامل انسانی [۲۵- ۲۹] به طور گسترده‌ای با مبحث ایمنی جاده‌ای مرتبط شناخته شده‌اند [۲۵]. طبق مطالعات دیگری، ایمنی ترافیک به ارتباطات پیچیده و یکپارچه میان روانشناسی رانندهٔ خودرو، ترافیک، وسیلهٔ نقلیه، محیط و زیرساخت‌های راه وابسته است [۳۰ و ۳۱]. در تحقیق دیگری بیان شده که محیط و راه از عوامل پیچیده‌ای تشکیل شده‌اند که در این میان مسیر، ترافیک، محدوده و شرایط آب‌وهوایی مهم‌ترین آن‌ها هستند [۳۲]. بررسی دو فاکتور محیط و جاده در مکان‌ها و زمان‌های مختلف و تأثیر آن در پراکنش و میزان وقوع تصادفات حادثه خیز به‌ویژه در جاده‌های بین شهری می‌تواند نقش مؤثری در مدل‌سازی تصادفات داشته باشد [۹]. در خصوص نقش عمل خودرو در وقوع تصادفات هم باید گفت که علی‌رغم توسعهٔ تکنولوژی و افزایش ایمنی خودرو در حوادث و همچنین به‌شدت هوشمند شدن خودروها، اما الگوی وایلد به نتیجهٔ شگفت‌انگیزی دست یازیده است و آن اینکه اکثر فناوری‌های مربوط به ایمنی ایجادشده در خودروها، بر ایمنی واقعی راننده اثر محدود یا کوتاه‌مدتی خواهند داشت. از آنجا که این پیشرفت‌های فناورانه احتمال درک خطر را کاهش می‌دهند، سبب می‌شود راننده به جهت حفظ همان مقدار شانس خطر مورد نظر خود مجال خطر بیشتری را به طور مثال با سرعت غیر مجاز، تجربه کند. معرفی وسایل نقلیهٔ جدید و کارآمد با موتور جدید، پویایی ترافیک را تغییر داده است. غالباً ترافیک ترکیبی از وسایل نقلیه با سرعت‌های مختلف از خیلی کند تا خیلی سریع را نشان می‌دهد. اختلاف سرعت قابل توجه در نهایت به افزایش نرخ تصادف منجر می‌شود.

این اثر زمانی که حجم ترافیک زیاد باشد و شامل بخش بزرگی از وسایل نقلیهٔ کندتر باشد، بیشتر است. این واقعیت، همراه با کمبودهای هندسی، روسازی و وضعیت کنارگذر به طور کل بر ایمنی بزرگراه ها تأثیر می‌گذارد. گزارش وضعیت جهانی ایمنی راه، تصادفات جاده‌ای را به عنوان یک عامل مهم مرگ‌ومیر در سطح جهانی نشان می‌دهد [۱۲].

در سال‌های اخیر مطالعات متفاوتی در رابطه با فاکتورهای اثرگذار بر تصادفات صورت گرفته است. لی و همکاران [۹] با تمرکز بر هنگ‌کنگ به عنوان مورد مطالعاتی، طی دورهٔ زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵، نقش چهار متغیر توضیحی مرتبط با شرایط اقتصادی اجتماعی، یعنی افزایش تولید ناخالص داخلی، رشد جمعیت، توسعهٔ زیرساخت‌های جاده‌ای و رشد مالکیت خودرو شخصی را بر تعداد حوادث جاده‌ای بررسی و مطالعه کردند. نتایج آماری به‌دست‌آمده وجود نوعی رابطهٔ بلندمدت بین چهار متغیر اقتصادی اجتماعی GDP، رشد جمعیت، طول شبکهٔ جاده‌ای و مالکیت خودروی شخصی و کثرت بروز تصادفات جاده‌ای را در هنگ‌کنگ تأیید کردند. نتایج نشان داد افزایش جمعیت به طور خاص باعث بالا رفتن شمار حوادث جاده‌ای در بلندمدت می‌شود، در حالی که افزایش تعداد خودروهای شخصی دارای مجوز با بروز حوادث جاده‌ای بیشتری، هم در کوتاه‌مدت و هم در بلندمدت در ارتباط است. سان و همکاران [۱۰] در مقاله‌ای با عنوان «تجزیه‌وتحلیل تلفات تصادفات تحت تأثیر چندین عامل اقتصادی بر اساس داده‌های مربوط به ترافیک از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶» در کشور چین به بررسی عوامل اقتصادی شامل تعداد مراکز درمانی جدید، سرمایه‌گذاری در حوزهٔ سلامت، سرمایه‌گذاری در حوزهٔ حمل‌ونقل و درآمد سرانه پرداختند و داده‌های تصادفات رانندگی در ۳۱ استان و شهرداری را جمع‌آوری و برآورد کردند. یافته‌ها نشان داد سرمایه‌گذاری در حوزهٔ سلامت، سرمایه‌گذاری در حوزهٔ حمل‌ونقل و درآمد سرانه با تعداد تلفات تصادفات رانندگی همبستگی منفی دارد. سرمایه‌گذاری در حوزهٔ سلامت و سرمایه‌گذاری در حوزهٔ حمل‌ونقل تأثیر زیادی بر تعداد تلفات تصادفات جاده‌ای دارد. نتایج بیانگر آن بود که توسعهٔ اقتصادی تأثیر مثبتی بر بهبود شرایط ترافیکی دارد، اما افزایش تعداد مراکز درمانی جدید باعث کاهش تلفات تصادفات نمی‌شود.

رایدر و همکاران [۱۱] در مقاله ای با عنوان «پیشگیری از تصادفات رانندگی با سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری در خودرو تأثیر هشدارهای نقاط حادثه‌خیز بر رفتار راننده»، به بررسی اثر سیستم‌های پشتیبانی تصمیم داخل خودرو بر رفتار رانندگی و اجتناب از برخورد پرداختند. در نهایت، نتایج نشان داد هشدارهای داخل وسیلهٔ نقلیه در مورد نقاط حادثه‌خیز بهبود قابل توجهی در رفتار راننده طی زمان دارد. علاوه بر این، شواهد نشان داد شخصیت یک فرد نقش کلیدی در اثربخشی سیستم‌های پشتیبانی تصمیم داخل خودرو دارد.

بسو و ساها [۱۲] در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی عوامل خطر برای تصادفات جاده‌ای تحت ترافیک مختلط: مطالعهٔ موردی در بزرگراه‌های هند» به ارزیابی عوامل خطر برای تصادفات بزرگراهی در شرایط ترافیکی مختلط پرداختند. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد نرخ تصادف در بزرگراه‌های چندخطه نسبتاً کمتر است. با این حال، شدت هر تصادف در چنین راهی نسبتاً زیاد است. قابل ذکر است که فرکانس تصادف در چنین راه‌هایی در ساعات روشنایی روز به دلیل حرکت ترافیکی یک‌طرفه مبتنی بر خط کمتر است. این موضوع کاملاً طی شب برعکس است، زمانی که رانندگان در مواجهه با حوادث احتمالی ترافیک ناتوان هستند و در نتیجه خطر تصادف را افزایش می‌دهند. از سوی دیگر، اکثر تصادفات در بزرگراه‌های دو خطه به دلیل مانورهای رانندگی ناایمن است. این مطالعه همچنین مشاهده کرد که دسترسی‌های مکرر به گذرگاه‌های میانی بین تقاطع‌ها و کیفیت نامناسب کنار گذر، امکان اصلاح خطاهای رانندگی را کاهش داده و در نتیجه خطر تصادف را افزایش می‌دهد.

تاماکلو و همکارانش [۱۳] در پژوهشی با عنوان «بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادف اتوبوس/ مینی‌بوس در کشور در حال توسعه با توجه به زمان، روسازی و شرایط نور» با استفاده از مدل لاجیت به بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر شدت تصادفات اتوبوس / مینی‌بوس در غنا در ترکیب‌های مختلف شرایط روسازی، نور و روزهای هفته و آخر هفته پرداختند. نتایج نشان داد تحت ترکیب‌های مختلف روسازی، شرایط نور، روزهای هفته یا آخر هفته، عوامل خطرساز مانند از بغل چسباندن به خودروی کناری، حضور در میانهٔ راه رفت و برگشت و سبقت، بر شدت تصادفات اتوبوس و مینی‌بوس اثرات متفاوت قابل توجهی دارد.

کریست [۱۴] در مقاله‌ای با عنوان «شبیه‌سازی تأثیر نسبی عوامل تایر، وسیلهٔ نقلیه و راننده بر میزان تصادفات از جلو» با روش شبیه‌سازی برخورد رو به جلو مونت کارلو شرایط یک تصادف خیس از عقب را مدل می‌کند و تأثیر نسبی پارامترهای مختلف برخورد خودرو را تخمین می‌زند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد سیستم‌های خودکار خودرو تأثیر زیادی بر ایمنی دارند و می‌توانند میزان تأثیر منتسب به پارامترهای دیگر مانند سطح چسبندگی تایر را تغییر دهند. همان‌طور که استفاده از سیستم‌های خودروی خودکار گسترش می‌یابد، تأثیر سطوح عملکرد چسبندگی تایر بر خطرات برخورد نیز افزایش می‌یابد.

ژانگ و همکاران [۱۵] در مقاله‌ای با عنوان «بررسی روابط بین پارامترهای جنبشی میکروسکوپی لاستیک‌ها در شرایط رانندگی عادی، ویژگی‌های جاده و انواع تصادف» نشان دادند ویژگی‌های جاده بر ویژگی‌های جنبشی طولی وسیلهٔ نقلیه تأثیر می‌گذارد و در نتیجه سطح خطر تصادفات از عقب را تعیین می‌کند. اثرات جبران خسارت رانندگی نیز در این مقاله شناسایی شد، یعنی رانندگان تمایل دارند در شرایط پیچیدهٔ رانندگی محتاط‌تر باشند. یکی دیگر از یافته‌های مربوط به آزادراه کوهستانی این است که ویژگی‌های مختلف تونل (به عنوان مثال، ورودی تونل و خروجی تونل) تأثیرات متفاوتی بر انواع مختلف حوادث ترافیکی دارد.

تاتاری و همکاران [۵] به‌کارگیری یک مدل پویای سیستم در خصوص ایمنی جاده در امریکا را هدف قرار دادند. براساس سیاست افراطی در این حوزه، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان می‌تواند تلفات ناشی از تصادفات جاده‌ای را به واسطهٔ تعداد کمتر وقایع آب‌وهوایی شدید، همین‌طور خرابی تجهیزات راه و بی‌توجهی رانندگان فراهم کند. به عنوان سیاست دوم، کاهش تقاضای سفر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد این سیاست تأثیر مهمی در کاهش نرخ تلفات جاده‌ای دارد. نتایج همچنین نشان دادند این سیاست نسبت به سیاست افزایش کارایی سوخت در کاهش تلفات جاده‌ای، روش مؤثرتری است. در آخر سیاست بهبود ایمنی وسیلهٔ نقلیه بر کاهش تعداد تلفات جاده‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد این سیاست بیشترین تأثیر را در کاهش حوادث داشته و باید در اولویت قرار گیرد.

ربیعه و همکاران [۱۶] در مقاله‌ای با عنوان «مدل علّی معلولی مسئله حوادث رانندگی در ایران: رویکرد پویایی‌شناسی سیستم» به بررسی ابعاد مختلف مسئلهٔ تصادفات رانندگی با استفاده از روش پویایی سیستم پرداختند. در این راستا سیستم مورد بررسی به چندین زیرسیستم یا بخش اصلی تقسیم شد، زیرسیستم‌ها شامل زیرسیستم نیروی انسانی پلیس، خودرو، فرهنگ و آموزش، سازمان راهبر، جریمه‌ها، بودجه، تجهیزات پلیس و زیرسیستم جاده بود و در پایان سیاست‌های راهبردی بهبوددهندهٔ رفتار متغیرهای اصلی سیستم، مانند فعال‌سازی یا راه‌اندازی سازمان متولی با نام سازمان راهبر پیشنهاد شد.

وانگ و همکارانش [۱۹] با استفاده از مدل پویایی‌های سیستم برای سیستم حمل‌ونقل شهری به بررسی اثر مداخلهٔ سیاست مالکیت خودرو در توسعهٔ حمل‌ونقل پرداختند و در این راستا اثر ۵ سناریوی ۱- تشویق زیاد؛ ۲- تشویق؛ ۳- محدودیت مستقیم؛ ۴- محدودیت؛ ۵- بدون مداخله را بر GDP، جمعیت، تعداد خودرو و محیط زیست ارائه کردند. همان‌طور که مطالعات قبلی اذعان دارند عامل محیط (راه و خودرو) بر تصادفات ترافیکی تأثیر قابل توجهی دارد، ولی پژوهش‌های قبلی یا تأثیر عوامل محیطی اثرگذار بر تصادفات ترافیکی را به صورت خطی دنبال کرده است یا اگر در یک مدل پویایی سیستم موضوع ترافیکی را بررسی کرده است عواملی مانند مؤلفه‌های راه، خودرو و تکنولوژی خودرو را به صورت هم‌زمان در نظر نگرفته است. لذا نیاز است در یک مدل پویایی سیستم که مدلی جامع است تأثیر عوامل محیطی اثرگذار بر تصادفات ترافیکی مورد توجه بیشتر قرار گیرد و پژوهش حاضر این مهم را به صورت خاص دنبال می‌کند.

سیستم‌ها را می‌توان برای بررسی مشکلات ایمنی ترافیک، هم در سطح ماکروسکوپی که شامل یک سیستم پیچیده از تجزیه‌وتحلیل سیستم‌هاست، و هم در سطح میکروسکوپی که چگونگی و علت بروز انواع تصادفات رانندگی را توضیح می‌دهد به کار برد [۴۵]. روش پویایی سیستم برای بهینه‌سازی جریان ترافیک به کار گرفته می‌شود به‌طبع سیستم ترافیکی بهینه به‌دست‌آمده از روش بهینه‌سازی پویایی سیستم‌ها با سیستم واقعی تطابق بیشتری داشته و استراتژی‌های پیشنهادشده قانع‌کننده‌تر هستند [۸].

روش تحقیق

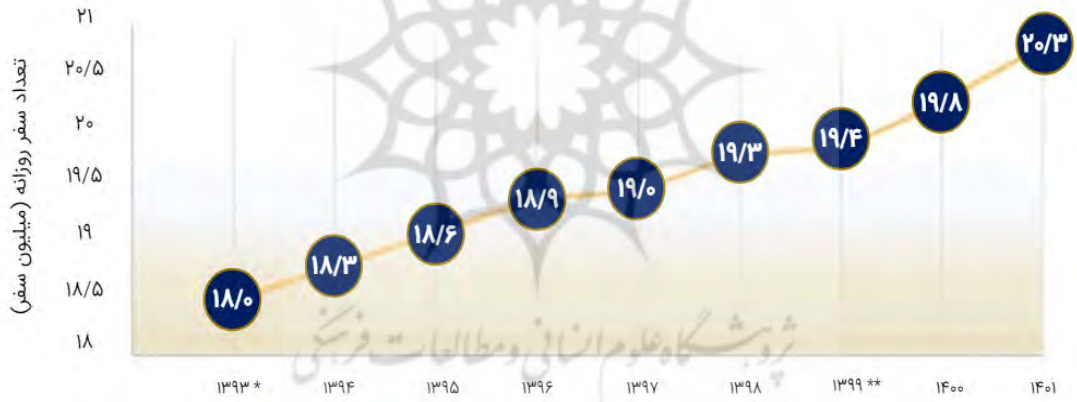
پژوهش حاضر از نظر نوع هدف، زمینه‌ای موردی و از دیدگاه شیوهٔ عمل، توصیفی مدل‌سازی است. به بیان دیگر، این پژوهش در چارچوب تفکر سیستمی صورت پذیرفته و در آن برای حصول اهداف پژوهش و به دست آوردن پاسخ سؤال‌ها از روش مدل‌سازی پویایی‌های سیستمی استفاده شده است. همچنین با توجه به نتایج آن در زمرهٔ تحقیقات کاربردی تلقی می‌شود. از سوی دیگر، از آنجا که هر پدیدهٔ رفتاری در انسان به طور کلی معلول عوامل و انگیزه‌هایی است که در انسان‌های مختلف به شکل‌های متنوعی متبلور و علت آن رفتار تلقی می‌شوند، لذا می‌توان رفتارهای انسان را از جنس کیفی تلقی کرد و فرایند اجرای آن در زمرهٔ تحقیقات و پژوهش‌های کیفی محسوب می‌شود. همچنین با توجه به اینکه تحقیقات حاضر در یک دورهٔ زمانی مشخص صورت می‌پذیرد، از این منظر و به لحاظ جایگاه زمانی در گروه پژوهش‌های طولی محسوب می‌شود.

الف) منطقهٔ مطالعه‌شده

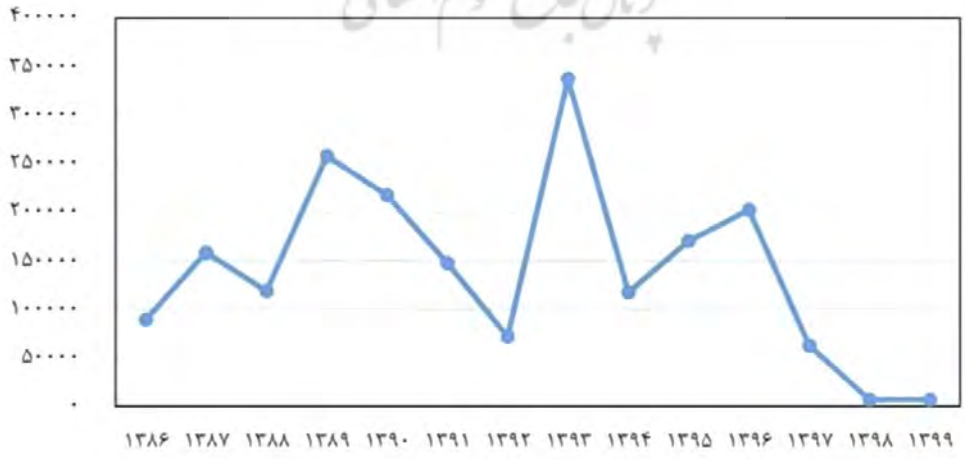
مطالعهٔ حاضر در شهر تهران انجام شده است. این پژوهش به دنبال ساخت الگوی دینامیکی تأثیر زیرساخت راه و خودرو بر رفتار رانندگی با استفاده از ابزار مدل‌سازی به منظور تحلیل دقیق‌تر رفتارهای شهروندان در ترافیک و پیامدهای آن و کمک به انتخاب شیوه‌های بهبود ناهنجاری‌های ترافیکی توسط برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران است. در این پژوهش با استفاده از الگوی شبیه‌سازی نسبت به ارائهٔ سناریوهای مختلف و بررسی نتایج مترتب بر آن اقدام شده است.

ب) داده‌ها

در این پژوهش از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده شده است. روش سیستم داینامیک به مدد یادگیری در محیط‌های مبهم و پیچیده می‌آید. مانند یک شرکت هواپیمایی که از سیمولاتور پرواز برای خلبانانش استفاده می‌کند، پویایی‌شناسی سیستم‌ها نیز برای مدیران و تصمیم‌گیران، فضایی همانند شبیه‌ساز تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند تا بتوانند در مورد پیچیدگی‌های پویا و سبب مقاومت در برابر تصمیم‌ها و خط مشی‌ها اطلاعات کسب کرده و تصمیم‌های بهینه اتخاذ کنند [۴۶]. در پژوهش حاضر از داده‌های ثبت‌شدهٔ شهر تهران شامل اطلاعات معابر تازه‌ساخت، خودروهای نو شماره و تصادفات فوتی، جرحی و خسارتی، در بازهٔ ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱ استفاده شده است. همچنین نرخ رشد GDP در کشور و فناوری خوروها مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.



الف) تعداد سفر روزانهٔ شهر تهران



ب) تعداد خودروی اسقاط‌شده در هر سال

شکل ۱. نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده

ج) مراحل پویایی‌شناسی سیستم‌ها

مراحل روش سیستم داینامیک شامل پنج گام است که مدل ارائه‌شده در این تحقیق سمت‌وسوی خود را بر مبنای گام‌های یادشده تنظیم کرده است.

- *شناسایی و توصیف مسئله:* در این مرحله باید به‌درستی مسئلهٔ واقعی را شناخته و اثرات جانبی را با مسئلهٔ اصلی اشتباه نگرفت. باید با درک کامل مسئله، هدف شفافی از مدل‌سازی برای خود تصویر کرد. مدل، نمادی از واقعیت است و جهان واقعی به شکلی ساده و قابل فهم بیان می‌کند.
- *خلق فرضیه‌های پویا:* در این گام باید متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر مسئله مورد بررسی قرار گرفته و مرز مدل را مشخص کنیم. اینک با شناختی که در خصوص مسئله به دست آورده‌ایم حلقه‌های علّی – معلولی را شکل داده و به‌تدریج کامل و کامل‌تر می‌کنیم تا در نهایت تصویری ساده از دنیای واقعی را خلق کند.
- *شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار:* زمانی که فرضیه‌های اصلی و مرز سیستم تشکیل شد، مدل قابلیت اجرایی می‌یابد. در این حال مدل در یک محیط مجازی امکان شبیه‌سازی و اجرا پیدا می‌کند.
- *آزمون مدل و اعتبارسنجی:* در این مرحله لازم است رفتارهای شبیه‌سازی مدل با رفتارهای دنیای واقعی مورد مقایسه قرار گیرد.
- *سیاست‌گذاری:* به مفهوم تولید و ایجاد استراتژی‌ها، ساختارها و شیوه‌های تصمیم‌گیری بدیع با هدف بهبود سیستم است [۴۶].

د) ابزار تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

در این پژوهش از ابزار نرم‌افزاری ونسیم نسخهٔ ۷.۳.۵ جهت تجزیه‌وتحلیل اطلاعات استفاده شده است. به این‌ترتیب که با ارائهٔ سناریوهای مرتبط با متغیرهای تعداد خودرو و فناوری‌های آن، طول شبکهٔ راها و وضعیت سرانهٔ درآمد، به تأثیر آن بر رفتار رانندگی در شهر تهران و پیامدهای آن پرداخته شده است.

ه) شناسایی متغیرهای مدل

فرایند مدل‌سازی ابتدا با جمع‌آوری متغیرهای انباشت، جریان و متغیرهای کمکی آغاز می‌شود. برای این‌منظور، پس از انجام مروری بر ادبیات و مطالعهٔ پیشینهٔ آن، با بهره‌مندی از پرسشنامه‌های نیمه‌ساختاریافته با کمک متخصصان و خبرگان موضوع، متغیرهای تحقیق شناسایی شد و در مراحل بعدی این فرایند پس از طی مراحل لازم به تکامل رسید و درنهایت جدول نهایی تشکیل شد.

و) فرایند الگوسازی سیستم داینامیک

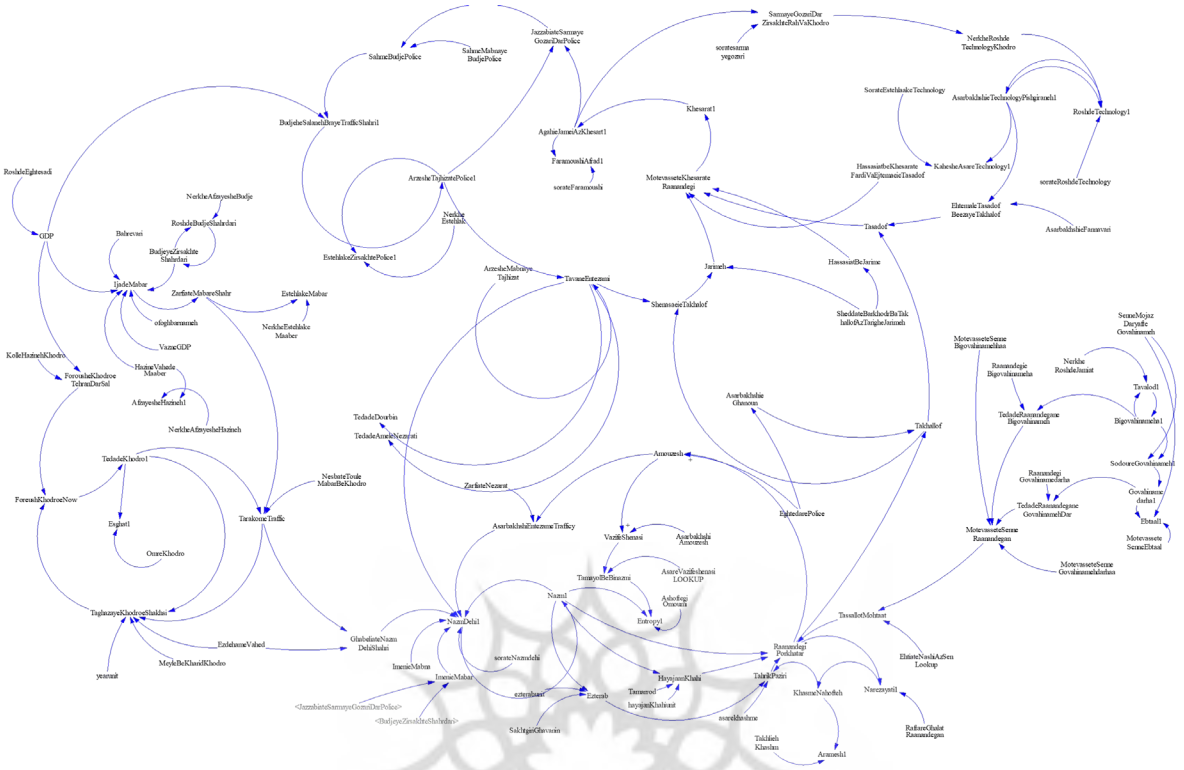
فرایند الگوسازی با شناخت مشکل و بیان مسئله آغاز می‌شود با استفاده از منابع معتبر از جمله مبانی نظری موضوع تحقیق، دانش سیستمی و اخذ نظرات خبرگان و افراد صاحب‌نظر، مدل‌های مفهومی را به چارچوب‌های قابل فهم که در قالب مدل‌های توضیحی بیان می‌شوند، تبدیل می‌کند. این عبارت‌ها و تفاسیر همان فرضیه‌های پویا هستند. در اینجا مسئلهٔ ما بررسی تأثیرات زیرساخت راه و تعداد خودرو و همچنین، فناوری خودرو و درآمد ملی بر رفتارهای رانندگی، ایمنی ترافیک و حوادث رانندگی است. پس از مرحلهٔ فرضیه‌سازی، متغیرهای کلیدی در قالب متغیرهای مستقل (از قبیل تعداد خودرو، سرانهٔ درآمد ملی، فناوری خودرو و طول شبکهٔ معابر) و متغیرهای وابسته (از قبیل تخلفات، تصادفات، خسارت‌ها و تلفات رانندگی) و همچنین، چگونگی اثرگذاری آنان بر همدیگر مورد بررسی قرار گرفته و آن‌گاه با طراحی مدل مفهومی از مسئلهٔ پژوهش به عنوان تصویری از سیستم، حلقه‌های علت و معلولی تشکیل می‌شود. در ادامه چگونگی تبدیل مفاهیم به مدل که موجب تکمیل فرایند تصمیم‌گیری نیز می‌شود، نمودارهای نرخ که اساس مدل‌سازی در پویایی‌های سیستمی است طراحی و ساخته می‌شود. در مرحلهٔ بعدی با لایه‌بندی متغیرها بر پایهٔ تئوری ساختمان سیستم که ارتباط بین ساختار سیستم و رفتار سیستم را مشخص می‌کند، متغیرهای انباشت، جریان، کمکی و نیز بازخوردها و ارتباط بین متغیرهای انباشت جریان شناخته شده و با دادن مقدار به متغیرهای مدل و ثابت‌های مربوطه، روابط و معادلات ریاضی نوشته‌شده و درنهایت عملیات شبیه‌سازی و اجرای الگو صورت می‌پذیرد. بنابراین با تجزیه‌وتحلیل روند تغییرات رفتار مدل در گذشته و با بررسی تداوم این تغییرات در آتی و اقدام لازم برای تحلیل حساسیت روی متغیرهای الگو، اعتبارسنجی آن صورت می‌گیرد و سناریوهای منتخب و مناسب پیشنهاد می‌شود.

یافته‌های تحقیق

مدل مفهومی نمودار حلقهٔ علّی "CLD" ناشی از مطالعات اولیه، به رابطهٔ علّی و معلولی بین متغیرهای مربوط، به عوامل زمینه‌ساز رفتاری و همچنین رفتارهای رانندگی و درنتیجه به پیامدهای مترتب بر آن خواهد پرداخت که در حکم فرضیه‌های دینامیکی پژوهش خواهند بود و هنگام تدوین مدل به آن پرداخته و مدل نهایی پیشنهاد شد. با تدوین فرضیه‌های پویا، نمودارهای علّی معلولی مهم ترسیم می‌شود. این نمودار مبین روابط سیستم‌های واقعی است که از آن به عنوان زنجیره‌های حلقه‌های علت و معلولی یاد می‌شود. در ادامه با طرح سناریوهای مختلف تأثیر هریک را بر رفتار رانندگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

الف) ایجاد فرضیهٔ پویا و نمودار علت و معلولی

در این پژوهش با مبنا قرار دادن رفتار رانندگی شهروندان و مرور ادبیات پژوهش، متغیرهای کلیدی شناسایی و سپس نمودار علت و معلولی با مشخصات زیر در قالب نمودار ۱ ترسیم شد. شکل ۲ نتایج این فرضیه را نشان می‌دهد.

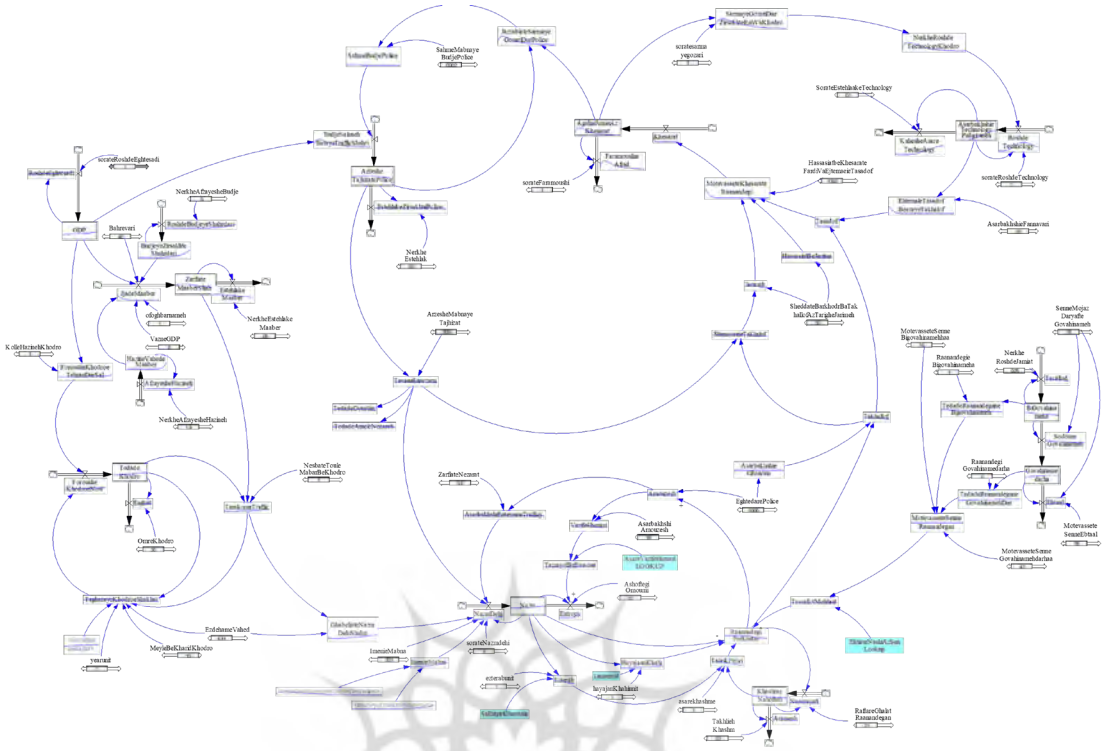


شکل ۲. حلقه‌های علّی معلولی

همچنین برای انجام شبیه‌سازی الگو، این نمایش نموداری را باید به معادلات ریاضی تبدیل کرد. برای تدوین معادلات ریاضی، از داده‌های جمع‌آوری‌شده و نظر خبرگان استفاده می‌کنیم. بر این مبنا الگوهای انباشت جریان برای هر یک از متغیرها و با توجه به مرور ادبیات و پیشینهٔ موضوع پژوهش و نیز با توجه به نمودارهای علت – معلولی مرحله گذشته و نظرات خبرگان تدوین شد.

ب) ایجاد نمودارهای انباشت جریان

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 نرم‌افزار و اجرای شبیه‌سازی مدل است [۴۷]. فرمول‌های ریاضی در ارتباط با هر متغیرها است. فرمول‌های مربوط به متغیرهای حالت، انتگرال جمع جبری متغیرهای نرخ هستند که به طور خودکار توسط نرم‌افزارها وارد می‌شوند، در خصوص متغیرهای نرخ و کمکی لازم است فرمول‌های ریاضی مربوطه مشخص شود. سپس، ثابت‌های عددی و مقدار ابتدایی متغیرهای حالت مشخص می‌شود. ارتباط میان متغیرها با استفاده از روش‌های مرور ادبیات، مطالعهٔ رفتار آمار گذشته، نظر خبرگان ترسیم می‌شود [۴۷]. بر این مبنا نمودارهای انباشت جریان برای هر یک از متغیرها تدوین شد.



شکل ۳. نمودار انباشت جریان

د) نتایج شبیه‌سازی پژوهش

پس از انجام شبیه‌سازی و بررسی رفتار اجزای مدل در بازهٔ زمانی چهارسالهٔ مورد نظر، به تغییر مقادیر متغیرهای مختلف مدل و تحلیل تأثیر آن‌ها روی متغیرهای اصلی مورد بررسی که ایمنی، تصادف و تلفات است، پرداخته می‌شود. درضمن، time step مدل ۰/۵ و واحد زمان ماه تعریف شده است. بررسی مشاهدات مرحلهٔ قبل بیانگر آن است که طول شبکهٔ معابر، تعداد خودرو و فناوری‌های جدید بر رفتار رانندگی و ایمنی تأثیرگذاری قابل توجهی دارند، لذا برای هر یک از متغیرهای تأثیرگذار سناریوهایی شامل: تعداد خودروی نو شماره، طول شبکهٔ معابر تازه‌ساخت و سرانهٔ درآمد ملی تدوین شد.

مجموعه سناریوهایی که در بخش اول بررسی می‌شود شامل سناریوهایی در خصوص تأثیر سرعت رشد اقتصادی و بهره‌وری بر توسعهٔ زیرساخت‌ها و رفتار رانندگی است.

با توجه به اهمیت سرعت رشد اقتصادی و بهره‌وری به عنوان متغیرهای مستقل بر مؤلفه‌های رشد زیرساخت‌ها اعم از معابر شهری و بزرگراهی و همچنین، تولید خودرو که در این مدل متغیرهای وابسته تعریف شده‌اند، در سه سناریو تحلیل‌ها انجام شده و نمودارهای مربوطه استحصال شد.

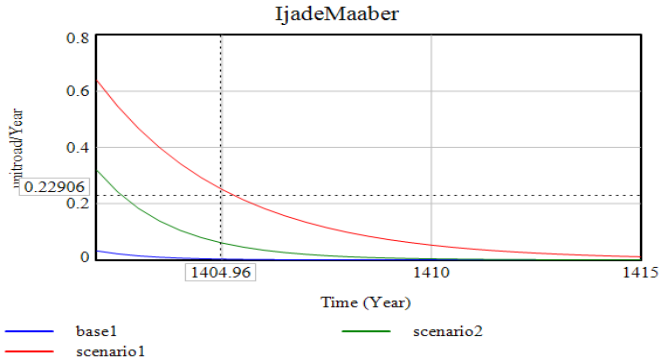
سناریوی پایه: سرعت رشد اقتصادی ۱ و بهره‌وری ۴ در نظر گرفته شد.

سناریوی اول: سرعت رشد اقتصادی ۲۰ و بهره‌وری ۸۰ پیش بینی شد.

سناریوی دوم: سرعت رشد اقتصادی ۱۰ و بهره‌وری ۴۰ لحاظ شد.

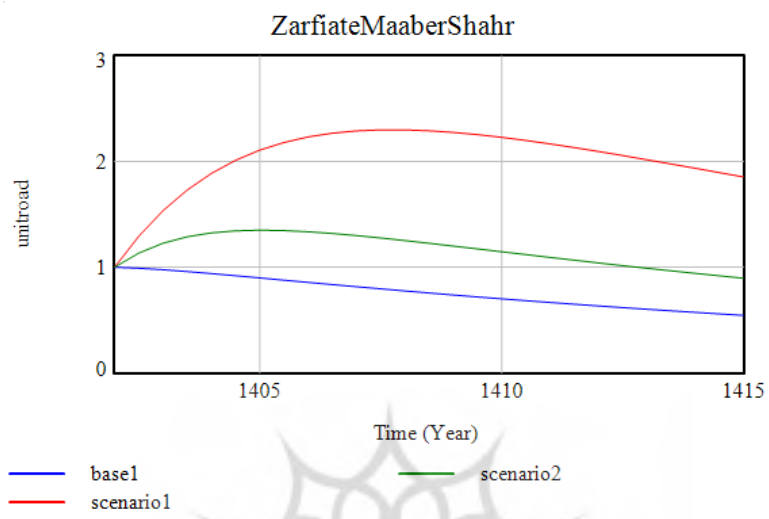
پس از انجام شبیه‌سازی و ترسیم نمودارها برای هر یک از متغیرهای وابسته مشخص شد متغیرهای مستقل یادشده دارای تأثیر قابل توجه بر رفتار مدل بوده که در مورد هریک توضیحات لازم به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. *ایجاد معبر جدید:* همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزایش سرعت رشد اقتصادی و بهره‌وری در کشور رابطهٔ مستقیم با ایجاد معبر جدید دارد، زیرا با توان اقتصادی بالا، دولت و شهرداری‌ها به سوی توسعهٔ زیرساخت‌ها می‌روند. این موضوع در وهلهٔ اول به رشد بسیار سریع منجر می‌شود و در سال‌های بعد به دلیل افزایش هزینه‌ها و صعودی بودن نرخ تورم این سرعت کاهش می‌یابد و به بیانی شتاب تولید کاهشی خواهد بود.



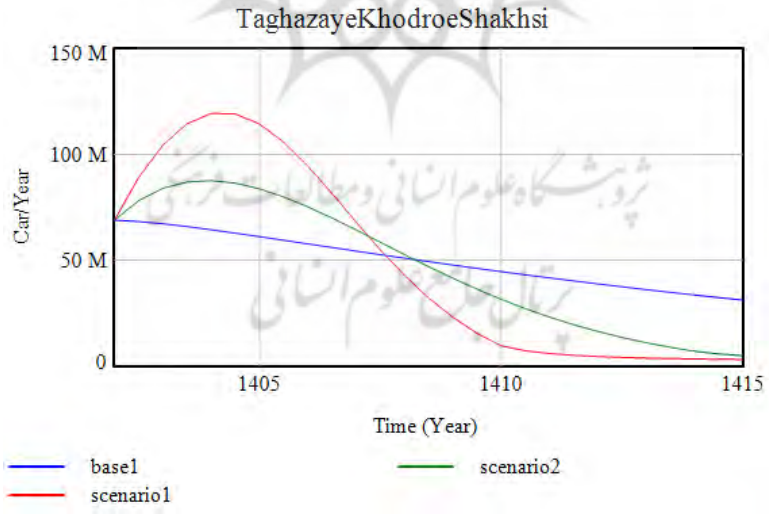
شکل ۴. تغییرات ایجاد معابر در سناریوهای اول و دوم نسبت به سناریوی پایه

۲. *ظرفیت معبر:* با افزایش سرعت رشد اقتصادی و بهره‌وری با در نظر گرفتن تأخیر ناشی از زمان ساخت معبر، شاهد افزایش ظرفیت معابر برای تردد بیشتر خودروها هستیم، اما همان‌گونه که در نمودار ملاحظه می‌شود با ایجاد ظرفیت بیشتر، میل به استفاده از خودرو نیز بیشتر خواهد شد و از سوی دیگر، با امعان نظر به افزایش قدرت خرید مردم از جمله برای خودرو، این ظرفیت‌ها به صورت تدریجی به سمت اشباع شدن خواهد رفت و هرچند وضعیت از عدم ایجاد زیرساخت و یا نرخ پایین ایجاد زیرساخت بهتر است، اما به مرور زمان سیر کاهشی خواهد یافت.



شکل ۵. تغییرات ظرفیت معابر شهر در سناریوهای اول و دوم نسبت به سناریوی پایه

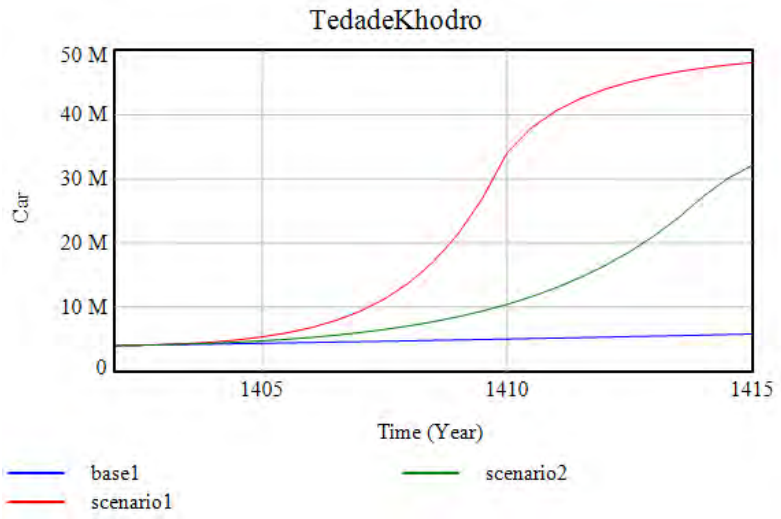
۳. *فروش خودرو:* همان‌گونه که توضیح داده شد، با افزایش سرعت رشد اقتصادی و بهره‌وری، قدرت اقتصادی شهروندان نیز افزایش می‌یابد میل به خرید خودرو بیشتر می‌شود.



شکل ۶. تغییرات تقاضای خودرو شخصی در سناریوهای اول و دوم نسبت به سناریوی پایه

اگر این سرعت پایین باشد (حالت دو)، این اتفاق با تأخیر بیشتر و در سطح پایین‌تری حادث می‌شود و در حالت پایه که توان اقتصادی جامعه پایین است، فروش خودرو در حداقل و در عین حال با رشد منفی به صورت خطی تداوم می‌یابد. از آنجا که سرانهٔ مالکیت خودرو نمی‌تواند نامحدود باشد، لذا شاهد هستیم بعد از مدتی تقاضای خرید خودروی شخصی کاهش یافته و تعداد فروش به سمت عدد ثابتی سوق می‌یابد.

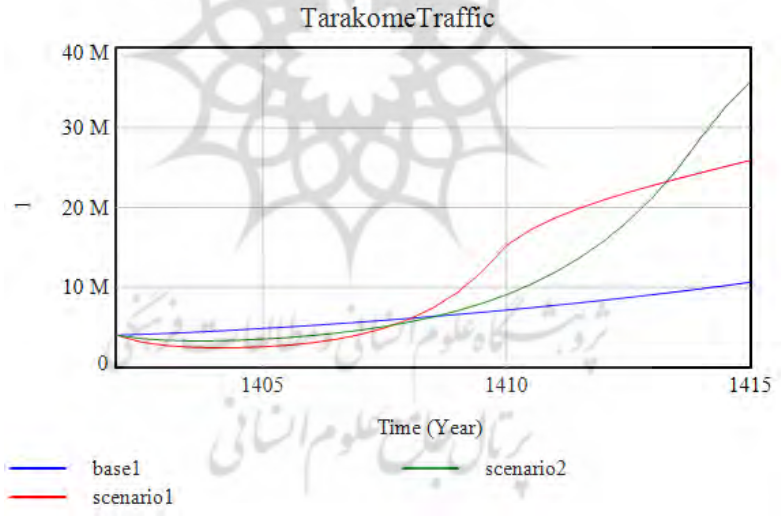
۴. *تعداد خودرو:* تعداد خودروهای موجود در سطح شهر تابعی از تعدادخودروی نو شماره و خودروهای قبل از این دوره است. در مدل تعداد خودرو اسقاط‌شده‌ها نیز در نظر گرفته شده است.



شکل ۷. تغییرات تعداد خودرو در سناریوهای اول و دوم نسبت به سناریوی پایه

این نمودار S شکل حکایت از محدود بودن کشش‌پذیری مالکیت خودرو و تعادلی بودن آن دارد و نمی‌تواند نرخ رشد مدام افزایش باقی بماند.

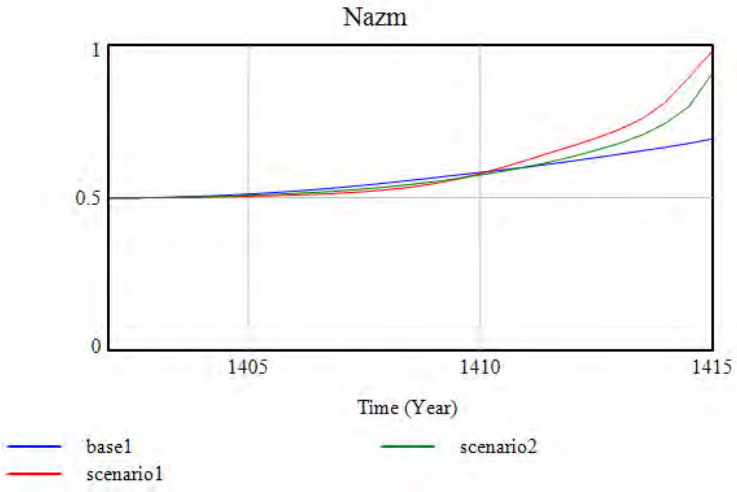
۵. تراکم ترافیک: با افزایش تعداد خودروهای شخصی به‌تدریج تراکم ترافیک افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در نمودار ۸ هویداست.



شکل ۸. تغییرات تراکم ترافیک در سناریوهای اول و دوم نسبت به سناریوی پایه

نظر به اینکه افزایش خودروها به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد، تراکم ترافیک نیز تدریجی خواهد بود. اگر سرعت رشد ساخت معبر کمتر از سرعت رشد خرید خودرو باشد، شاهد شدت تراکم ترافیک خواهیم بود و این می‌تواند یک هشدار جدی برای سیاست‌گذاران باشد که افزایش فروش خودرو بدون تأمین معبر مناسب و کافی بحران‌زا بوده و در عین حال رقابت افزایش خودرو و ساخت معبر سرانجام روشنی نخواهد داشت. شاید یکی از دلایل توصیه به گسترش حمل‌ونقل عمومی همین تحلیل باشد که نشان می‌دهد بی‌توجهی به این موضوع در بلندمدت طبعات سنگینی برای جامعه خواهد داشت.

۶. نظم در رانندگی: یکی از نگرانی‌هایی که با افزایش خودرو متصور است، موضوع بی‌نظمی است.



شکل ۹. تغییرات متغیر وابسته نظم در سناریوهای اول و دوم نسبت به سناریوی پایه

علاوه بر موضوعات رفتاری، تعداد خودرو نیز می‌تواند بر بی‌نظمی اثرگذار باشد، اما با افزایش سرانهٔ درآمد ملی می‌توان پیش‌بینی کرد که توجه به ایمنی و ارتقای فرهنگ عمومی هم افزایش یابد و رانندگان توجه بیشتری به این موضوع داشته باشند و به صورت تدریجی شاهد افزایش نظم‌پذیری باشیم.

در مجموعهٔ دوم سناریوها که بررسی شده است، موضوع تأثیر سرعت سرمایه‌گذاری در فناوری‌های خودرو و سرعت رشد و استهلاک آن و چگونگی تأثیر آن بر اثربخشی تکنولوژی‌های پیشگیرانه، نرخ رشد تکنولوژی و تأثیر آن بر تصادفات پرداخته شده است. همچنین سرعت سرمایه‌گذاری این حوزه و تأثیر آن در هر یک از پارامترهای یادشده مورد توجه قرار گرفت.

سناریوی پایه: سرعت سرمایه‌گذاری در زیرساخت خودرو ۱، سرعت استهلاک تکنولوژی برابر ۰/۰۱ و سرعت رشد تکنولوژی معادل ۱ در نظر گرفته شده است.

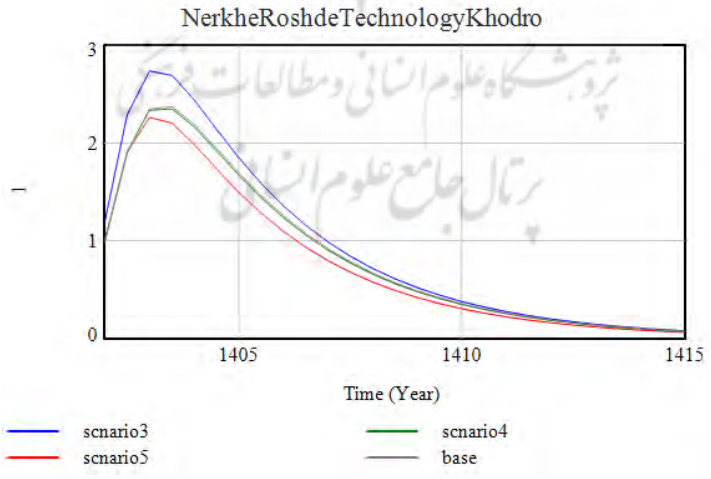
در سناریوی ۳: سرعت سرمایه‌گذاری در زیرساخت خودرو افزایش و از ۱ به ۱/۲ ارتقا یافت.

در سناریوی ۴: سرعت استهلاک تکنولوژی از ۰/۰۱ به ۰/۰۵ افزایش یافت.

در سناریوی ۵: سرعت رشد تکنولوژی افزایش و از ۱ به ۱/۳ افزایش داده شد.

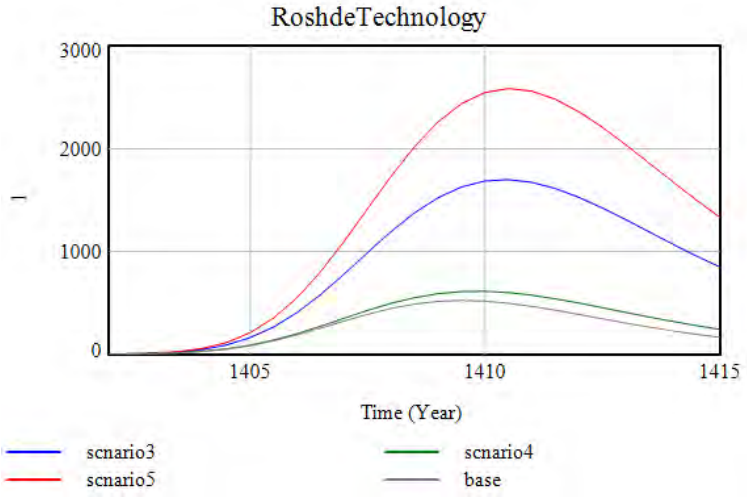
با شبیه‌سازی این سناریوها رفتار سیستم را در هر یک از این وضعیت‌ها مقایسه شده است. آنچه در مورد هر یک از متغیرها مشاهده شد، در نمودارهای زیر به نمایش گذاشته شد که توضیحات آن به این شرح است:

۱. بیشترین تأثیر در نرخ رشد تکنولوژی خودرو متأثر از افزایش سرمایه‌گذاری در این حوزه است.



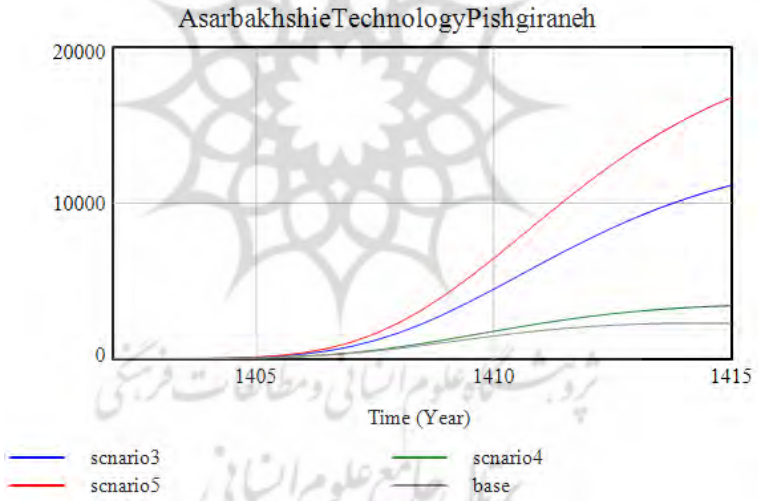
شکل ۱۰. تغییرات نرخ رشد تکنولوژی خودرو در سناریوهای ۳ تا ۵ نسبت به سناریوی پایه

هرچه شدت افزایش سرمایه‌گذاری بیشتر باشد، اثربخشی و رشد تکنولوژی به شکل فزاینده‌ای بیشتر می‌شود.



شکل ۱۱. تغییرات رشد تکنولوژی تحت تأثیر سناریوهای ۳ تا ۵ نسبت به سناریوی پایه

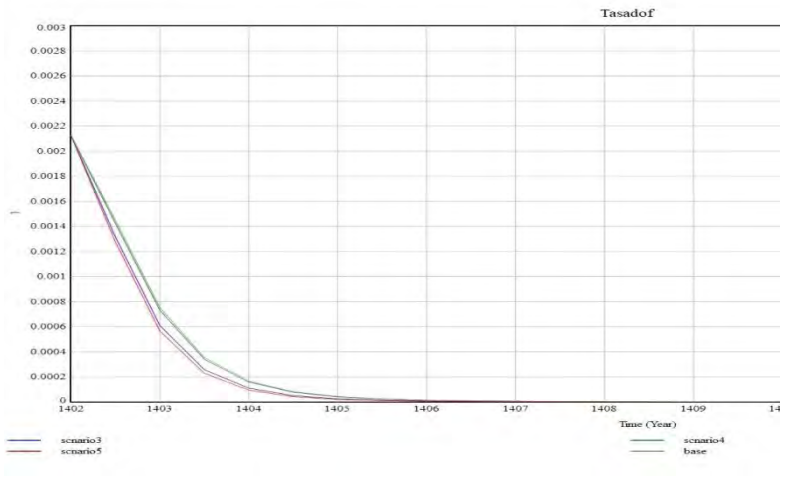
۲. اثربخشی تکنولوژی پیشگیرانه بیش از هر متغیری وابسته به سرعت رشد تکنولوژی است.



شکل ۱۲. تغییرات اثربخشی تکنولوژی پیشگیرانه در سناریوهای ۳ تا ۵ نسبت به سناریوی پایه

درواقع به دلیل حس ایمنی که کاربران از خودروهای با تکنولوژی بالا دارند، ریسک بیشتر در رانندگی دارد و یا منجر به کم‌توجهی هنگام راندن می‌شود و ضروری است برای کاهش ریسک‌های جدید رانندگان، تکنولوژی با سرعت بیشتری رشد کند.

۳. در موضوع تصادفات، گرچه همهٔ تغییرات در وضعیت‌های یادشده حائز اهمیت هستند و به کاهش تصادفات منجر می‌شوند، اما سایر تحلیل‌ها نشان داد این کاهش طی زمان کمتر خواهد شد و تغییرات آن به صفر نزدیک خواهد شد (معادل صفر نخواهد بود، ولی به آن نزدیک است) و لازم است با استفاده از متغیرهای دیگری همچون اقتدار پلیس این موضوع را جبران کرد.



شکل ۱۳. تغییرات تصادفات در سناریوهای ۳ تا ۵ نسبت به سناریوی پایه

نتیجه‌گیری

با اجرای مدل و انجام تست تحلیل حساسیت، نسبت به تغییر مقادیر متغیرها و بررسی رفتار هر یک از متغیرهای مدل، شناسایی متغیرهای اصلی و کلیدی شامل: سرعت رشد اقتصادی، بهره‌وری، سرعت سرمایه‌گذاری در فناوری‌های خودرو و سرعت رشد تکنولوژی و استهلاک تکنولوژی اقدام شد. نتایج حاصله را می‌توان در چند بند خلاصه کرد:

۱. ارتقای نظم که می‌تواند به عنوان تابعی از توجه به ایمنی و ارتقای فرهنگ عمومی در نظر گرفته شود و بر اثر افزایش سرانهٔ درآمد ملی قابل حصول خواهد بود، عاملی اثرگذار بر کاهش تصادفات است که پیش از این در مطالعات متعددی از جمله پژوهش لی و همکاران [۹]، سان و همکاران [۱۰] و ربیعه و همکاران [۱۶] مورد اشاره قرار گرفته و نتایج مطالعهٔ حاضر نیز مؤید همان یافته‌هاست.

۲. ارتقای تکنولوژی‌های پیشگیرانه، نقش شایانی در افزایش ایمنی رانندگی و در نتیجه، کاهش تصادفات خواهد داشت که مؤید یافته‌های پژوهش‌های پیشین از جمله پژوهش‌های رایدر و همکاران [۱۱] و کریست [۱۴] است.

۳. همان‌گونه که در پژوهش بسو و ساها [۱۲] نتیجه‌گیری شده است و نتایج مطالعهٔ حاضر نیز مورد تأیید قرار داد، افزایش ظرفیت معابر نمی‌تواند نقش مؤثری در کاهش نرخ تصادفات ایفا کند و حتی گاهی نتیجهٔ عکس خواهد داشت.

در مرحلهٔ بعد به منظور کاربردی کردن مدل نسبت به ارائهٔ دو سناریو عملیاتی به منظور بررسی تأثیر سرعت سرمایه‌گذاری در فناوری‌های خودرو و سرعت رشد تکنولوژی و استهلاک آن بر ایجاد راه‌ها جدید، ظرفیت معبر و سطح سرویس، فروش خودرو، تعداد خودروی موجود، تراکم ترافیک، نظم، تصادفات، نرخ رشد تکنولوژی، اثربخشی تکنولوژهای پیشگیرانه و رشد تکنولوژی اقدام شد. نتایج سناریوها نشان داد افزایش سرانهٔ درآمد ملی به توسعهٔ زیرساخت‌های شهری و افزایش تولید خودرو منجر خواهد شد، اما افزایش ساخت معبر خیلی زود با افزایش تعداد خودرو و افزایش تقاضا به سمت اشباع و کاهش ظرفیت خواهد رفت. فروش خودرو تا مدتی جاذبه دارد و با افزایش سرانهٔ مالکیت، فروش روند نزولی پیدا خواهد کرد. تراکم روند افزایش می‌یابد و نظم با توسعهٔ زیرساخت‌ها و ارتقای فناوری خودرو به‌تدریج روند بهبود پیدا خواهد کرد. این نتایج و همسویی آن‌ها با مطالعات پیشین نشان‌دهندهٔ آن است که پژوهش حاضر توانسته است به سؤال اصلی خود که همان معرفی مدل دینامیکی مناسب برای تأثیر زیرساخت‌ها و فناوری بر جریان ترافیک بوده است، پاسخ دهد.

بر همین اساس و با تکیه بر مدل معرفی‌شده و یافته‌های مستخرج از اجرای آن، می‌توان راهبردها و راهکارهایی را پیشنهاد کرد که بخشی از آن در ادامه ارائه می‌شود. افزایش سرمایه‌گذاری در فناوری خودرو هرچه بیشتر باشد شاهد بهبود بیشتر محصولات، اثربخشی و رشد بیشتر آن خواهیم بود. سرعت رشد تکنولوژی خودرو می‌تواند نقش پیشگیرانه بودن فناوری را هرچه بیشتر تقویت کند. به نظر می‌رسد حتی اگر کشور دارای رشد چشمگیر در درآمدهای خود باشد، حل مشکل ترافیک از طریق توسعهٔ زیرساخت شهری امکان‌پذیر نخواهد بود. البته تأمین شبکهٔ راه‌های استاندارد و رعایت سلسله‌مراتب راه با تأمین حمل‌ونقل عمومی می‌تواند راهگشای ترافیک شهری باشد. همچنین توسعهٔ فناوری‌های نو گرچه در کاهش خطاهای انسانی رانندگان بسیار مؤثر است، اما با توجه به اینکه بعد از مدتی اطمینان به تجهیزات باعث ریسک‌پذیری بیشتر می‌شود، باید علاوه بر مهارت‌آموزی رانندگان، فناوری‌ها همچنان با رویکرد کاهش خطای انسانی مسیر توسعهٔ خود را ارتقا دهند.

مشارکت نویسندگان

سید جعفر تشکری هاشمی (پژوهشگر اصلی ۴۵ درصد)، عباس طلوعی اشلقی (۳۵ درصد)، شهریار افندی‌زاده (۲۰ درصد).

تشکر و قدردانی

این پژوهش منافع تجاری برای نویسنده نداشته و در قبال ارائهٔ اثر وجهی دریافت نشده و مقاله حامی مادی و معنوی نداشته است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

منابع

[1] Pour Gholami, Mohammadreza. Farajzadeh, Manouchehr. Habibzadeh, Ashab and Gandhamkar, Amir. 2016. The role of weather elements in road accidents in northwest Iran. Road research studies. magiran.com/p1831695 [In Persian].

[2] Mascarenhas, M. D. M., Souto, R. M. C. V., Malta, D. C., Silva, M. M. A., Lima, C. M., & Montenegro, M. M. S. (2016). Características de motociclistas envolvidosem acidentes de transporte atendidos em serviços públicos de urgência e emergência. Ciência & Saúde Coletiva, 21, 3661–3671. https://doi.org/10.1590/1413-812320152112.24332016

[3] Heron-Delaney, M., Kenardy, J., Charlton, E., & Matsuoka, Y. (2013). A systematic review of predictors of posttraumatic stress disorder (PTSD) for adult road traffic crash survivors. Injury, 44, 1413–1422. https://doi.org/10.1016/j.injury.2013.07.011

[4] Papadakaki, M., Ottavia, E. F., Orsi, C., Otte, D., Tzamalouka, G., von-der-Geest, M.,& Pierrakos, G. (2016). Psychological distress and physical disability in patients sustaining severe injuries in road traffic crashes: Results from a one-year cohort study from three European countries. Injury. https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.11.011

[5] Tatari, O., Alirezaei, M., Onat, N.C. & Abdel-Aty, M.(2017). The Climate Change-Road Safety-Economy Nexus: A System Dynamics Approach to Understanding Complex Interdependencies, Journal: Systems volume 5 pages 6. https://doi.org/10.3390/systems5010006

[6] World Health Organization

[7] ZHOU Jing, ZHU Zhentao. (2007) "Hierarchy analysis and strategies on the imbalance between supply and demand of urban traffic", Journal of transportation systems engineering and information technology, 7(4), pp. 24–29. https://doi.org/10.1016/S1570-6672(07)60027-0

[8] He, Sh-K, and Li, J, A Study of Urban City Traffic Congestion Governance Effectiveness Based on System Dynamics Simulation, International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES), Volume 8, Issue 1 Ser I (Jan 2019), PP. 37-47.

[9] Li, Xin, Liyu Wu, and Xianfeng Yang. "Exploring the impact of social economic variables on traffic safety performance in Hong Kong: A time series analysis." Safety science 109 (2018): 67-75. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.010

[10] Sun, L.L., Liu, D., Chen, T., He, M.T., 2019. Analysis on the accident casualties influenced by several economic factors based on the traffic-related data in China from 2004 to 2016. Chinese Journal of Traumatology 22 (2019) 75-79. https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2019.02.002

[11] Ryder, B., Gahr, B., Egolf, P., Dahlinger, A., Wortmann, F., 2017. Preventing Traffic Accidents with In-Vehicle Decision Support Systems - The Impact of Accident Hotspot Warnings on Driver Behaviour. Decision Support Systems (2017). https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.05.004

[12] Basu, S., Saha, P., 2022. Evaluation of risk factors for road accidents under mixed traffic: Case study on Indian highways. IATSS Research 46 (2022) 559–573. https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2022.09.004

[13] Tamakloe, R.; Lim, S.; Sam, E.F.; Park, S.H.; Park, D.;2021;" Investigating factors affecting bus/minibus accident severity in a developing country for different subgroup datasets characterized by time, pavement, and light conditions"; Journal of Accident Analysis & Prevention; https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106268

[14] Christ, D., 2020. Simulating the relative influence of tire, vehicle, and driver factors on forward collision accident rates. Journal of Safety Research. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.03.009

[15] Zhang, Ch., He, J., Yan, X., Liu, Z., Chen, Y., Zhang, H., 2021. Exploring relationships between microscopic kinetic parameters of tires under normal driving conditions, road characteristics, and accident types. Journal of Safety Research. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2021.05.010

[16] Rabia, Massoud. Leadership, leadership Karmi, Mohammad Mahdi. Zia'i Mustafa and Yasoubi, dear God. 2016. Causal causal model of the problem of driving accidents in Iran: system dynamics approach. Industrial management perspective. No. 25, 143-115. https://www.sid.ir/paper/516061/fa. [In Persian]

[17] Fartukzadeh, Hamidreza and Rajabi Nahoji, Maitham. 2013. Dynamic modeling of metropolitan traffic in order to provide transportation improvement policies (Case example of Tehran metropolis). Transportation Research Journal, 9th year, 1st issue, spring https://www.sid.ir/paper/83923/fa. [In Persian]

[18] 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, 2671–2689. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.246

[19] Wang,J & Lu,H & Peng,H, System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(3), 83-89. https://doi.org/10.1016/S1570-6672(08)60027-6

[20] Ozkan, T. (2006). The regional differences between countries in traffic safty: A cross-cultural study and Turkish case. Helsinki: University of Helsinki. http://urn.fi/URN:ISBN:952-10-3421-1

[21] Porter, Brian. 2015. Guide to traffic psychology. Translated by Mahmoud Shoreche. Study and planning center of Tehran city. [In Persian]

[22] Noland, R.B., 2003. Traffic fatalities and injuries: the effect of changes in infrastructureand other trends. Accid. Anal. Prev. 35 (4), 599–611. https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00040-4

[23] Jovanis, P.P., Chang, H.L., 1986. Modeling the relationship of accidents to miles traveled. Transp. Res. Rec. 1068, 42–51. http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1986/1068/1068-005.pdf

[24] Ritter, N., Vance, C., 2013. Do fewer people mean fewer cars? Population decline and car ownership in Germany. Transp. Res. Part A: Policy Pract. 50, 74–85. https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.035

[25] Wang, B., Hensher, A.D., Ton, T., 2002. Safety in the road environment: a driver behavioral response perspective. Transportation 29, 253–270.

[26] Dissanayake, S., 2004. Comparison of severity affecting factors between young and older drivers involved in single vehicle crashes. IATSS Res. 28 (2), 48–54. https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60108-4

[27] Yannis, G., Kanellopoulou, A., Aggeloussi, K., Tsamboulas, D., 2005. Modelling driver choices towards accident risk reduction. Saf. Sci. 43, 173–186. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.02.004

[28] Clarke, D.D., Ward, P., Bartle, C., Truman, W., 2006. Young driver accidents in the UK: the influence of age, experience, and time of day. Accid. Anal. Prev. 38, 871–878. https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.02.013

[29] Tractinsky, N., Ram, E.S., Shinar, D., 2013. To call or not to call - That is the question (while driving). Accid. Anal. Prev. 56, 59–70. https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.017

[30] Bucchi, A. & Simone, A. (2000). Il fattore umano nell'ingegneria della sicurezza nella circolazione stradale, Strade e Autostrade, 1.

https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.946

[31] Bucchi, A., Dondi, G., Simone, A. & Bonini, A. (1999). Principi dell'ingegneria della sicurezza nei sistemi di trasporto, Trasporti europei,10. http://hdl.handle.net/10077/8433

[32] Bucchi, Alberto., Sangiorgi, Cesare, Vignali, Valeria., (2012). Social and Behavioral Sciences 53,973 – 980

[33] Oña, J.D., Garach, L., Calvo, F., Muñoz, T.G., 2014. Relationship between predicted speed re- duction on horizontal curves and safety on two-lane rural roads in Spain, J. Transp.Eng. 140 (3) (2014) 04013015, https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.

[34] Hamidi, Naser and Sanai, Salim. 2012. Providing a multi-criteria approach in identifying and prioritizing factors affecting urban accidents. Quarterly specialized scientific journal of Qazvin policing knowledge. Volume 2, Number 5, pp. 20-34. [In Persian]

[35] Schneider, W.H., Zimmerman, K.H., Boxel, D.V., Vavilikolanu, S., 2009. Bayesian analysis of the effect of horizontal curvature on truck crashes using training and validation data sets, Transp. Res. Rec. 2096 (2009) 41–46, https://doi.org/10.3141/2096-06.

[36] Mayora, J. Rubio, R.(2003). Relevant variables for crash-ratepredi- diction on Spain's two lane rural roads, Presented at 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2003.

[37] Yazdani, Mir Bahadur, Rasafi, Amir Abbas, and Mirzaei, Fazel. (2017). Evaluating the effect of weather and environmental conditions on the severity of single-vehicle accidents. Rahor Scientific Quarterly, 7(25), 143-176. SID. https://sid.ir/paper/231573/fa

[38] Hamim, O.F., Hoque, M.S., McIlroy, R.C., Plant, K.L., Stanton, N.A., 2020. A sociotechnical ap- proach to accident analysis in a low-income setting: using Accimaps to guide road safety recommendations in Bangladesh, Saf. Sci. 124 (2020), 104589. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104589

[39] Gorbani, M and Zakeri, H. (1385). Investigating the impact of economic growth on accidents and forecasting the road safety situation in the country. The third regional conference on traffic management. https://civilica.com/doc/8663/. [In Persian]

[40] Loo, B.P.Y., 2018. Unsustainable Transport and Transition in China, 1st edition. Routledge https://doi.org/10.4324/9781315677941.

[41] Li, Xin, Liyu Wu, and Xianfeng Yang. "Exploring the impact of social economic variables on traffic safety performance in Hong Kong: A time series analysis." Safety science 109 (2018): 67-75. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.010

[42] Le, Khanh Giang, Pei Liu, and Liang-Tay Lin. "Determining the road traffic accident hotspots using GIS-based temporal-spatial statistical analytic techniques in Hanoi, Vietnam." Geo-spatial Information Science 23, no. 2 (2020): 153-164. https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1683437

[43] Morais Neto, O.L; Malta, D. C.; Mascarenhas, M. M.; (2012); 49- Traffic accident emergency medical care by emergency services in 23 state capitals and the Federal District – Brazil; Epidemiologia e Serviços de Saúde 21(1):31-42. http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1679-49742012000100004&lng=en&nrm=.pf

[44] McMahon, K., & Dahdah, S. (2008). The true cost of road crashes: valuing life and the cost of a serious injury. London: iRAP.

[45] Minami, N. & Madnick, S. (2009). Dynamic Analysis of Combat Vehicle Accidents. System Dynamics Review. 25(2). https://doi.org/10.1002/sdr.415

[46] Sterman, J. D. (2001) Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: McGraw-Hill.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی