

A Dynamic Model of Urban Traffic Congestion Drivers and the Role of Social Marketing–Based Mechanism Design in Its Improvement: The Case of Tehran

Hadi Afrasiabi*, Manouchehr Ansari**, Rahmatollah Gholipour***

Original Article	Receive Date: 2025 Dec 18	Accept Date: 2026 Apr 14	Page: 165-197
------------------	---------------------------	--------------------------	---------------

Abstract

Urban traffic congestion is one of the structural sustainability challenges of metropolitan areas, generating extensive economic, environmental, and social consequences. The objective of this paper is to develop a system dynamics model to identify the causal mechanisms underlying the formation of congestion and to evaluate the effectiveness of integrated policy packages for travel demand management in Tehran. This paper applied a mixed-methods approach. In the qualitative phase, a systematic literature review and expert interviews were conducted to extract the causal structure of the system and its feedback loops, and causal loop diagrams (CLDs) were developed. In the quantitative phase, a stock–flow model was constructed in Vensim, calibrated using data from 2001 to 2021 (with a mean behavior reproduction error of less than 5%), and policy scenarios were simulated. Three primary scenarios were evaluated: (1) expansion of remote services, (2) implementation of a tradable mobility quota system based on market-based travel demand management instruments, and (3) integration of the second scenario with social marketing interventions. The novelty of the study lies in integrating system dynamics modeling with market-based travel demand management tools and behavioral interventions grounded in social marketing within a unified policy framework. The findings provide a basis for designing multi-instrument policy packages and phased implementation strategies for intelligent urban traffic management. Simulation results over a 15-year horizon indicate that the scenario of expanding remote services leads to a maximum reduction of approximately 3 to 5 percent in the congestion index. In contrast, the implementation of the tradable mobility quota system results in a reduction of about 53 percent in the congestion index. Combining this policy with social marketing interventions accelerates behavioral adjustment and reduces the congestion index by approximately 54 percent compared to the current trend. Furthermore, model estimates suggest that the implementation of the integrated policy package, alongside improvements in other related indicators, can reduce the congestion index by about 57 percent relative to the baseline scenario.

Keywords: Policy Simulation, Social Marketing, Travel Demand Management, Sustainable Urban Mobility, System Dynamics Modeling, Urban Traffic Congestion

JEL Classification: R41, R42, D91, O18.

* PhD Student in Business and Strategic Management, Alborz International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

hadi.afraziabi@gmail.com

** Associate Professor, School of Business Administration, School of Management, University of Tehran, Tehran, Iran
(Corresponding Author)

mansari@ut.ac.ir

*** Professor, School of Business Administration, School of Management, University of Tehran, Tehran, Iran

rgholipor@ut.ac.ir

ارائه مدل پویای عوامل ایجادکننده مسئله ترافیک شهری و بررسی نقش سازوکار مبتنی بر بازاریابی اجتماعی در بهبود آن: مطالعه موردی شهر تهران

هادی افراسیابی*، منوچهر انصاری**، رحمت اله قلی پور***

نوع مقاله: پژوهشی	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵	شماره صفحه: ۱۶۵-۱۹۷
-------------------	--------------------------	-------------------------	---------------------

چکیده

ازدحام ترافیک شهری یکی از چالش‌های ساختاری پایداری کلان‌شهرهاست که پیامدهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی گسترده‌ای به دنبال دارد. هدف این پژوهش، توسعه یک مدل پویایی‌شناسی سامانه‌ها برای شناسایی سازوکارهای علی‌شکل‌گیری ازدحام و ارزیابی اثربخشی بسته‌های سیاستی ترکیبی در مدیریت تقاضای سفر در شهر تهران است. نوآوری پژوهش در تلفیق مدل‌سازی پویای سیستم با ابزارهای بازارمحور مدیریت تقاضای سفر و مداخلات رفتاری مبتنی بر بازاریابی اجتماعی در قالب یک چارچوب سیاستی یکپارچه است. پژوهش حاضر با رویکرد آمیخته انجام شد: در فاز کیفی، با مرور نظام‌مند ادبیات و انجام مصاحبه خبرگانی، ساختار علی سیستم و حلقه‌های بازخوردی استخراج و نمودارهای CLD ترسیم گردید؛ در فاز کمی، مدل انباشت-جریان در محیط Vensim توسعه‌یافته، با داده‌های سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ کالیبره شد (میانگین خطای بازتولید رفتار کمتر از ۵ درصد) و سناریوهای سیاستی شبیه‌سازی گردید. سه سناریو اصلی ارزیابی شد: (۱) افزایش خدمات غیرحضوری، (۲) نظام «سه‌میه قابل مبادله پیمایش» مبتنی بر ابزارهای بازارمحور مدیریت تقاضا و (۳) ترکیب سناریوی دوم با مداخلات بازاریابی اجتماعی. نتایج شبیه‌سازی در افق ۱۵ ساله نشان می‌دهد سناریوی افزایش خدمات غیرحضوری حداکثر منجر به کاهش حدود ۳ تا ۵ درصدی شاخص ازدحام می‌شود. در مقابل، اجرای نظام سه‌میه قابل مبادله پیمایش موجب کاهش حدود ۵۳ درصدی شاخص ازدحام می‌گردد. ترکیب این سیاست با مداخلات بازاریابی اجتماعی، سرعت تعدیل رفتاری را افزایش داده و شاخص ازدحام را تا حدود ۵۴ درصد نسبت به روند موجود کاهش می‌دهد. همچنین برآورد مدل نشان می‌دهد اجرای بسته ترکیبی می‌تواند در کنار بهبود سایر شاخص‌های مرتبط، شاخص ازدحام را در حدود ۵۷ درصد نسبت به شرایط موجود کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: بازاریابی اجتماعی، ترافیک شهری، شبیه‌سازی سیاست، مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مدیریت تقاضای سفر

طبقه‌بندی JEL: R41, R42, D91, O18.

* دانشجوی دکتری مدیریت بازرگانی و راهبردی، پردیس بین‌المللی البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران

hadi.afraziabi@gmail.com

mansari@ut.ac.ir

** دانشیار، دانشکده مدیریت کسب و کار، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

rgholipor@ut.ac.ir

*** استاد، دانشکده مدیریت کسب و کار، دانشکدگان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

فصلنامه مجلس و اقتصاد، سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵

DOI: 10.22034/mec.2026.18601.1168

۱- مقدمه

ازدحام ترافیک در کلان‌شهرها به یک مسئله ساختاری و بازتولید شونده تبدیل شده است؛ مسئله‌ای که صرفاً حاصل کمبود زیرساخت نیست، بلکه نتیجه تعامل پویا میان رشد اقتصادی، افزایش مالکیت خودرو، الگوهای رفتاری سفر و محدودیت ظرفیت شهری است. این پدیده نه تنها موجب افزایش اتلاف زمان و هزینه‌های اقتصادی می‌شود، بلکه تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی، آلودگی هوا و کیفیت زندگی شهروندان دارد (Rajput & Jain, 2023). به‌طور کلی، حمل‌ونقل شهری علاوه بر آنکه تسهیل‌کننده جابه‌جایی افراد و کالاهاست، نقشی حیاتی در رشد و پویایی اقتصادی ایفا می‌کند. عملکرد کارآمد سیستم حمل‌ونقل می‌تواند دسترسی به فرصت‌های شغلی و اجتماعی را افزایش دهد و در بلندمدت بر توسعه پایدار شهری اثرگذار باشد (Tao et al., 2020). از سوی دیگر، نارسایی در مدیریت عرضه و تقاضای سفر، منجر به ناکارآمدی شبکه حمل‌ونقل و بروز حلقه‌های بازخورد منفی می‌شود که در بلندمدت حتی با توسعه زیرساخت‌ها نیز قابل حل نیست. سیاست‌های صرفاً عرضه محور نظیر توسعه معابر، ساخت بزرگراه‌ها یا گسترش ظرفیت حمل‌ونقل عمومی، هرچند در کوتاه‌مدت موجب کاهش تراکم می‌شوند، اما در بلندمدت به دلیل «تقاضای القایی» اثر معکوس دارند (Stigen et al., 2024).

سیاست‌های عرضه محور در غیاب مداخلات مؤثر در سمت تقاضا، قادر به کاهش پایدار تراکم نیستند. از سوی دیگر، ابزارهای قیمتی کلاسیک نظیر افزایش قیمت سوخت یا عوارض تردد، اگرچه می‌توانند سیگنال اقتصادی ایجاد کنند، اما اغلب با مقاومت اجتماعی و پیامدهای توزیعی همراه‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که حل پایدار ترافیک شهری مستلزم طراحی سیاست‌هایی است که همزمان ابعاد اقتصادی، رفتاری و نهادی را در یک چارچوب یکپارچه لحاظ کنند. در این میان، دو حوزه دانشی ظرفیت نظری مهمی فراهم می‌کنند: نخست، پویایی‌شناسی سیستم‌ها که امکان تحلیل حلقه‌های بازخوردی و پیامدهای بلندمدت سیاست‌ها را فراهم می‌کند؛ و دوم، بازاریابی اجتماعی که بر تغییر تدریجی رفتارهای فردی از طریق انگیزش، هنجارسازی و طراحی مشوق‌های غیر قهری تأکید دارد. بااین حال، پیوند نظام‌مند این دو حوزه در قالب یک مدل کمی و شبیه‌سازی شده که بتواند سازوکارهای بازارمحور مدیریت تقاضای سفر را نیز در خود جای دهد، همچنان نیازمند توسعه نظری و تجربی است. بر این اساس، پرسش اصلی این پژوهش آن است که چگونه می‌توان با استفاده از یک مدل پویای سامانه‌ای، اثر ترکیبی ابزارهای بازارمحور و مداخلات بازاریابی اجتماعی را بر تقاضای سفر و شاخص ازدحام شهری شبیه‌سازی و ارزیابی کرد؟

در این پژوهش، ابتدا مبانی نظری و پیشینه مطالعات مرتبط مرور می‌شود، سپس چارچوب مفهومی و مدل پویایی سیستم پژوهش ارائه خواهد شد. پس‌از آن، روش‌شناسی مدل‌سازی و شبیه‌سازی سناریوهای سیاستی بیان شده و درنهایت، نتایج شبیه‌سازی و تحلیل سیاست‌ها ارائه می‌گردد.

۲- ادبیات تحقیق

۲-۱- مبانی نظری

مسئله ترافیک شهری در پارادایم‌های جدید سیاست‌گذاری، نه به‌عنوان یک چالش صرفاً فنی، بلکه به‌عنوان پدیده‌ای پیچیده، چندوجهی و پویا شناخته می‌شود که حاصل برهم‌کنش هم‌زمان متغیرهای زیرساختی، اقتصادی و رفتاری است.

بر این اساس، چارچوب نظری پژوهش حاضر بر تلفیق سه حوزه دانشی «پویایی‌شناسی سیستم‌ها»، «مدیریت تقاضای سفر» و «بازاریابی اجتماعی و طراحی مکانیسم» استوار است.

الف) رویکرد سامانه‌ای و پویایی‌شناسی سیستم‌ها^۱

پیچیدگی ذاتی سامانه‌های حمل‌ونقل شهری موجب می‌شود که سیاست‌های خطی و تک‌بعدی اغلب با شکست مواجه شوند. در تفکر سامانه‌ای، هدف اصلی درک رابطه میان ساختار و عملکرد است. (Arnold & Wade, 2015a) به نقل از ریچموند (۱۹۹۴)، تفکر سیستمی را هنر و علم مرتبط کردن ساختار به عملکرد تعریف می‌کنند؛ با این هدف که تغییر در روابط درونی سیستم منجر به بهبود رفتار کلی آن شود. در تحلیل ترافیک، نادیده گرفتن حلقه‌های بازخورد عامل اصلی ناکارآمدی سیاست‌هاست. (Li et al., 2025) در مطالعه‌ای نشان دادند که مداخلات منفرد قادر به کاهش پایدار ازدحام نیستند، درحالی‌که ترکیب سیاست‌ها در قالب سناریوهای هم‌افزا مسیر کارآمدتری برای حکمرانی شهری فراهم می‌کند. همچنین سوشیل (۱۹۹۶) تأکید می‌کند که در مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها، تمرکز باید بر تحلیل پیامدهای درازمدت و تولید رفتار ساختاری سیستم باشد تا صرفاً پیش‌بینی نقطه‌ای متغیرها.

ب) مدیریت تقاضای سفر^۲ و تقاضای القایی

ادبیات نوین حمل‌ونقل نشان می‌دهد که سیاست‌های «عرضه محور» نظیر تعریض معابر، اگرچه در کوتاه‌مدت تراکم را کاهش می‌دهند، اما در بلندمدت به دلیل پدیده «تقاضای القایی» اثر معکوس دارند. (Stigen et al., 2024) (Anupriya et al., 2023) نشان داده‌اند که افزایش ظرفیت جاده‌ای تعادل سیستم را بر هم زده و منجر به بازتولید ترافیک می‌شود. از این رو، تمرکز بر مدیریت تقاضای سفر قرارگرفته است که هدف آن کاهش وابستگی به خودروهای شخصی و ترویج شیوه‌های پایدار است. (Qin et al., 2022) مدیریت تقاضا را راهکاری کلیدی برای هوشمندسازی حمل‌ونقل و تغییر الگوی مصرف معرفی می‌کنند.

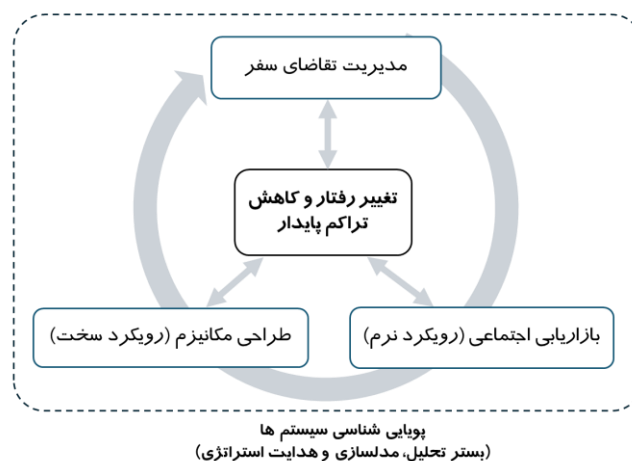
ج) بازاریابی اجتماعی^۳ به عنوان ابزار تغییر رفتار

بازاریابی اجتماعی به عنوان مکمل ابزارهای سخت‌افزاری مدیریت تقاضای سفر، بر بهره‌گیری از اصول و فنون بازاریابی تجاری برای تغییر رفتارهای فردی در راستای منافع جمعی تأکید دارد (Kotler and Zaltman, 1971). این رویکرد با تمرکز بر درک نیازها، انگیزه‌ها و موانع رفتاری شهروندان می‌کوشد از طریق طراحی پیام‌ها، مشوق‌ها و ساختارهای اجتماعی مناسب، رفتارهای مطلوب را تقویت کند (Nancy R. Lee et al., 2023). در ادبیات حمل‌ونقل، بازاریابی اجتماعی به عنوان یکی از ابزارهای نوین مدیریت تقاضای سفر (TDM) مطرح شده است (McGovern, 2005). این رویکرد را «ابزار اطلاعاتی قرن بیست و یک» توصیف می‌کند و بر این نکته تأکید دارد که مداخلات اطلاعاتی زمانی اثربخش خواهند بود که با انگیزه‌ها و ترجیحات فردی هم‌راستا باشند. شواهد تجربی نیز اثربخشی این رویکرد را تأیید کرده‌اند؛ برای نمونه، (Thøgersen, 2014) نشان داد که کمپین‌های اجتماعی مبتنی بر پیام‌های بومی می‌توانند تا ۱۵ درصد از سهم سفر با خودروی شخصی بکاهند. همچنین (Ma et al., 2017a) بیان می‌کنند که مداخلات بازاریابی اجتماعی در محیط‌های شهری می‌توانند استفاده از

1. System Dynamics - SD
2. Travel Demand Management - TDM
3. Social Marketing

شیوه‌های حمل‌ونقل پایدار را افزایش دهند. افزون بر این، (Akbar et al., 2021) با ارائه چارچوبی نوین، بازاریابی اجتماعی را فرآیندی پویا و مبتنی بر بازخورد مستمر معرفی می‌کنند؛ برداشتی که با منطق پویایی‌شناسی سیستم‌ها هم‌خوانی دارد و امکان تحلیل رفتاری در چارچوب مدل‌های بازخوردی را فراهم می‌سازد. به موازات رویکردهای رفتاری، توسعه فناوری‌های نوین و سامانه‌های هوشمند حمل‌ونقل (ITS) نیز فرصت‌های جدیدی برای بهبود جریان ترافیک و کاهش ازدحام ایجاد کرده است. برای نمونه، (Rajput & Jain, 2023) با بهره‌گیری از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها نشان دادند که ترکیب استراتژی‌های ITS با سیاست‌های مدیریت تقاضای سفر می‌تواند به کاهش معنادار تأخیر، مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای در کلان‌شهرها منجر شود.

د) طراحی مکانیسم و سازوکارهای بازار^۱ در کنار ابزارهای رفتاری، استفاده از مشوق‌های اقتصادی مبتنی بر «طراحی مکانیسم» نقش محوری در کنترل ترافیک دارد. (Heller et al., 2015) نشان دادند که قیمت‌گذاری پویا مبتنی بر ارزش زمانی سفر می‌تواند به تخصیص بهینه منابع و کاهش ازدحام منجر شود. پژوهش‌های (Zhang et al., 2019) و (Xin-gang & Zhao & Zhang, 2018) در حوزه سامانه‌های اقتصادی-زیست محیطی نشان می‌دهند که سازوکارهایی نظیر سقف و مبادله و یارانه/جریمه پویا، رفتار عاملان اقتصادی را به سمت پایداری بلندمدت سوق می‌دهند. این رویکرد در پژوهش حاضر در قالب «بازار مبادله سهمیه پیمایش» مدل‌سازی شده است تا با ایجاد هزینه فرصت برای سفر با خودروی شخصی، انگیزه اقتصادی لازم برای تغییر رفتار را فراهم آورد. برگرفته از مجموع نکات ذکرشده، شکل (۱) به‌طور چارچوب مفهومی ارتباط بین مفاهیم اصلی ذکرشده را نمایش می‌دهد:



شکل ۱. چارچوب مفهومی پژوهش: تعامل هم‌زمان سه رویکرد مدیریت تقاضای سفر، بازاریابی اجتماعی (رویکرد نرم) و طراحی مکانیسم (رویکرد سخت) در بستر پویایی‌شناسی سیستم‌ها

۲-۲ پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش در قالب یک «تحلیل تطبیقی» و بر اساس سه محور اصلی (مدل سازی پویایی شناسی سیستم ها، مدیریت تقاضای سفر و سازوکارهای بازارمحور و بازاریابی اجتماعی) دسته بندی و ارائه می شود. در هر زیر بخش، ابتدا مطالعات کلیدی معرفی، سپس شباهت ها و تفاوت های آن ها با پژوهش حاضر تحلیل و در نهایت جایگاه این مطالعه در میان آن ها تبیین می گردد.

۲-۲-۱- مطالعات خارجی

الف) مدل سازی پویایی شناسی سیستم ها در تحلیل ترافیک شهری

مطالعات این دسته عمدتاً بر مدل سازی ساختارهای اقتصادی- زیرساختی سیستم حمل و نقل متمرکز بوده اند. (Wang et al, 2008) با توسعه مدل پویایی سیستم برای سیستم حمل و نقل شهری، سه جنبه محدودیت مالکیت خودرو، محدودیت تردد و بهبود هم زمان خدمات حمل و نقل عمومی را پیشنهاد دادند. شباهت این مطالعه با پژوهش حاضر در تأکید بر نگاه سیستمی است، اما تفاوت اساسی در آن است که مدل آن ها فاقد زیرسیستم رفتاری و بازخوردهای ناشی از ادراک شهروندان است.

در مطالعه ای جدیدتر، لی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از شبیه سازی پویایی شناسی سیستم به تحلیل سیاست های کاهش ازدحام و انتشار آلاینده ها پرداختند. یافته کلیدی آنان این است که مداخلات منفرد قادر به کاهش پایدار ازدحام نیستند و ترکیب سیاست ها در قالب سناریوهای هم افزا مسیر کارآمدتری فراهم می کند. این یافته با نتایج پژوهش حاضر (برتری سناریوی ترکیبی بر سناریوهای تک نفره) همخوانی کامل دارد. با این حال، مطالعه لی و همکاران (۲۰۲۵) به متغیرهای رفتاری مانند بازاریابی اجتماعی نپرداخته و شکاف موجود در این زمینه را باقی گذاشته است.

مرور نظام مند هریسون و همکاران (۲۰۲۵) نشان می دهد که اگرچه پویایی شناسی سیستم در حمل و نقل سابقه طولانی دارد، کاربرد آن در تحلیل «سیاست های راهبردی و پایدار» محبوب ترین موضوع بوده است. این مطالعه با تحلیل ۴۴۷ مقاله، نتیجه می گیرد که روش SD برای تحلیل اثرات بلندمدت و شناسایی بازخوردهای ایده آل است. پژوهش حاضر در ادامه این سنت پژوهشی، با افزودن متغیرهای نرم رفتاری، گامی به سوی تکامل این روش شناسی برمی دارد.

پوخارل و همکاران (۲۰۲۵) با توسعه چارچوب یکپارچه SD-GIS، نشان دادند که تحلیل پویای سیاست های مکان محور (نظیر TOD و محدودیت پارکینگ) می تواند اثرات بلندمدت معناداری بر پایداری داشته باشد. هرچند تمرکز این مطالعه بر مداخلات ساختاری است، اما چارچوب روش شناختی آن برای پژوهش حاضر الهام بخش بوده است.

سوریانی و همکاران (۲۰۲۵) با مرور کاربردهای مدل سازی SD در سامانه های حمل و نقل پایدار، بر یکپارچه سازی ابعاد اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی تأکید کرده و نتیجه می گیرند که مدل های SD امکان تحلیل اثرات بلندمدت سیاست ها بر زیست پذیری شهری را فراهم می کنند. این یافته مؤید انتخاب روش شناسی پژوهش حاضر است.

ب) مدیریت تقاضای سفر و سازوکارهای بازارمحور

مطالعات این حوزه بر کاهش تقاضا از طریق ابزارهای قیمتی و غیرقیمتی تمرکز دارند. وانگ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه ای مبتنی بر نظریه TDM، به شناسایی عوامل مؤثر بر توسعه پایدار تحرک اشتراکی در شهرهای چین پرداختند. آنان با استفاده از مدل ترکیبی FUZZY-DEMATEL-ISM-MICMAC، ۲۱ عامل مؤثر را شناسایی

و به دودسته «استراتژی‌های نرم» و «استراتژی‌های سخت» طبقه‌بندی کردند. یافته مهم این مطالعه آن است که «آموزش تحرک اشتراکی» و «تعاملات سازمانی» در عمیق‌ترین سطح ریشه‌ای قرار دارند و می‌توانند سایر عوامل را در بلندمدت تحت تأثیر قرار دهند. این یافته اهمیت مداخلات نرم (نظیر بازاریابی اجتماعی) را تأیید می‌کند و با رویکرد پژوهش حاضر که بر ترکیب ابزارهای سخت و نرم تأکید دارد، همسو است.

آنوپریا و همکاران (۲۰۲۳) با تحلیل داده‌های شهرهای مختلف نشان دادند که افزایش ظرفیت جاده‌ای به دلیل پدیده «تقاضای القایی» در بلندمدت اثر معکوس دارد و تعادل سیستم را برهم می‌زند. این یافته مستقیماً بر لزوم تمرکز بر مدیریت تقاضا در پژوهش حاضر تأکید می‌کند.

کین و همکاران (۲۰۲۲) در مرور جامع خود بر مدیریت تقاضا در حمل‌ونقل هوشمند، نتیجه می‌گیرند که ابزارهای مدیریت تقاضا در صورت ترکیب با فناوری‌های نوین و مداخلات رفتاری، اثربخشی بیشتری خواهند داشت. این یافته مستقیماً منطق طراحی بسته سیاستی ترکیبی در پژوهش حاضر را پشتیبانی می‌کند.

هلر و همکاران (۲۰۱۵) با رویکرد طراحی سازوکار نشان دادند که قیمت‌گذاری پویا مبتنی بر ارزش زمانی سفر می‌تواند به تخصیص کارآمد منابع و کاهش ازدحام منجر شود. این مطالعه پایه نظری «طرح هوشمند سازی پیمایش» در پژوهش حاضر است. تفاوت اساسی آن با کار ما در این است که هلر و همکاران صرفاً بر ابزار قیمتی تمرکز کرده‌اند، درحالی‌که پژوهش حاضر این سازوکار را با مداخلات رفتاری (بازاریابی اجتماعی) ترکیب می‌کند.

ج) بازاریابی اجتماعی و مداخلات رفتاری

مطالعات این دسته بر تغییر رفتار سفر از طریق مداخلات نرم و غیرقیمتی متمرکزند.

مطالعه تانگنت (۲۰۲۴) با مرور سامانمند عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری سفر، سه دسته عامل «مرتبط با کاربر»، «مرتبط با سفر» و «مرتبط با خدمات» را شناسایی کرده است. این مطالعه تأکید می‌کند که در شرایط اختلالات سیستمی، رفتار سفر کاربران تغییر می‌کند و این تغییرات باید با داده‌های آشکارشده و داده‌های بیان‌شده به‌طور ترکیبی تحلیل شوند. این یافته برای طراحی سناریوهای پذیرش طرح هوشمند سازی در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

دینگیل و همکاران (۲۰۲۱) با رویکرد یکپارچه به تحلیل عوامل اجتماعی-فنی مؤثر بر تصمیم‌گیری سفر پرداخته‌اند. آنان با به‌کارگیری نظریه عمل، مدل سه عنصری شامل «معانی» (فرهنگ و هویت اجتماعی)، «مواد» (محیط انسان‌ساخت) و «شایستگی‌ها» (مهارت‌ها و دانش) را برای تحلیل سیستم حمل‌ونقل پیشنهاد می‌دهند. این چارچوب نظری با رویکرد پژوهش حاضر که به تعامل ساختارهای اجتماعی و فنی توجه دارد، همخوانی دارد.

اکبر و همکاران (۲۰۲۱) با توسعه چارچوب CSD-IES، بازاریابی اجتماعی را به‌عنوان یک سیستم پویا و مبتنی بر بازخورد تبیین کردند که نیازمند ارزیابی و انطباق مستمر است. این مفهوم با منطق پویایی‌شناسی سیستم‌ها هم‌خوانی کامل دارد و مبنای مدل سازی «اثربخشی بازاریابی اجتماعی» در پژوهش حاضر قرار گرفته است.

توجرسن (۲۰۱۴) در مطالعه مروری خود نشان داد که کمپین‌های اجتماعی با طراحی پیام‌های بومی و استفاده از مشوق‌های غیرمالی می‌توانند تا ۱۵ درصد از سهم سفر با خودروی شخصی بکاهند. این یافته به عنوان مرجع اولیه برای تعریف دامنه اثرگذاری بازاریابی اجتماعی در مدل پژوهش حاضر استفاده شده است.

تجربه برنامه «In Motion» در کینگ کانتی واشنگتن که توسط کوپر (۲۰۰۷) مستند شده، نمونه‌ای موفق از کاربرد بازاریابی اجتماعی جامعه‌محور است. نتایج این برنامه نشان داد که مشارکت‌کنندگان کاهش ۲۴ تا ۵۰ درصدی در سفرهای انفرادی و افزایش ۲۰ تا ۵۰ درصدی در استفاده از حمل‌ونقل عمومی را گزارش کرده‌اند. اگرچه این مطالعه مبتنی بر داده‌های خود اظهاری است، اما اثربخشی بازاریابی اجتماعی را تأیید می‌کند.

مک‌گاورن (۲۰۰۵) از نخستین تلاش‌ها برای معرفی بازاریابی اجتماعی به عنوان «ابزار اطلاعاتی قرن بیست و یک» در مدیریت تقاضای سفر است. این مطالعه نشان می‌دهد مداخلات اطلاعاتی زمانی مؤثرند که با انگیزه‌ها و ترجیحات شخصی کاربران هم‌راستا باشند.

۲-۲-۲- مطالعات داخلی

در ادبیات داخلی، مطالعات متعددی با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم به تحلیل ترافیک تهران پرداخته‌اند. این مطالعات را نیز می‌توان در سه دسته مشابه تحلیل کرد.

الف) مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها

پورسیدآقایی و نبی زاده (۱۴۰۳) با مطالعه موردی شهر تهران، از مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای تحلیل سیاست‌های مدیریت ترافیک استفاده کردند. نتایج پژوهش آنان نشان می‌دهد که سیاست‌های ترافیکی در صورت تحلیل در قالب یک سیستم پویا، آثار متفاوت و گاه متناقضی در کوتاه‌مدت و بلندمدت ایجاد می‌کنند. به طور مشخص، یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که حتی سیاست‌های توسعه‌ای نظیر افزایش ظرفیت مترو، اگر بدون مداخلات مکمل در سمت تقاضا اجرا شوند، در بلندمدت نمی‌توانند به کاهش پایدار ازدحام منجر شوند و ممکن است تحت تأثیر تقاضای القایی، کارایی خود را از دست بدهند. شباهت این مطالعه با پژوهش حاضر در تمرکز بر رویکرد سیستمی و تحلیل پویای سیاست‌هاست، اما تفاوت در عدم توجه به سازوکار بازار سهمیه پیمایش و مداخلات بازاریابی اجتماعی است.

نوروزیان ملکی و همکاران (۱۴۰۱) با بهره‌گیری از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها و تحلیل پوششی داده‌ها، به پیش‌بینی تقاضای سفر و ارزیابی سیاست‌های اثربخش در حمل‌ونقل شهری پرداخته‌اند. مدل ارائه‌شده در این پژوهش شامل زیرسیستم‌هایی نظیر جمعیت، تقاضای سفر، سرمایه‌گذاری در حمل‌ونقل و تراکم ترافیک است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیاست‌هایی مانند قیمت‌گذاری ترافیک و توسعه حمل‌ونقل عمومی، در صورت طراحی هماهنگ و بلندمدت، می‌توانند نقش مثبتی در مدیریت تقاضای سفر ایفا کنند؛ هرچند اثرگذاری این سیاست‌ها به شرایط نهادی و رفتاری شهروندان وابسته است.

احمدوند و همکاران (۱۳۹۴) با هدف ارائه مدلی پویا مبتنی بر اصول توسعه پایدار، به شبیه‌سازی سیستم حمل‌ونقل شهری تهران پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اجرای ترکیبی سیاست‌ها - شامل سیاست‌های زیرساختی،

مدیریتی و تقاضامحور - در مقایسه با سیاست‌های منفرد، اثرگذاری معنادارتری بر بهبود شاخص‌های ترافیکی، کاهش زمان سفر و پیامدهای زیست‌محیطی دارد. این یافته بر ضرورت اتخاذ بسته‌های سیاستی چندابزاره در مدیریت ترافیک شهری تأکید می‌کند و با نتایج پژوهش حاضر (برتری سناریوی ترکیبی) همخوانی دارد.

فرتوک‌زاده و رجبی‌نهوجی (۱۳۹۱) با تمرکز بر کلان‌شهر تهران، ترافیک شهری را پدیده‌ای پیچیده معرفی می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی بلندمدت آنان نشان می‌دهد که سیاست‌هایی نظیر توسعه زیرساخت یا تغییرات منفرد قیمتی، بدون توجه به رفتار شهروندان و سازوکارهای مدیریت تقاضا، از اثربخشی پایدار برخوردار نیستند. این پژوهش در کنار راهکارهای عرضه‌محور (مانند مترو)، به گزینه‌هایی همچون توسعه خدمات الکترونیک و غیرحضوری و ابزارهای مدیریت تقاضای سفر اشاره می‌کند که می‌توانند از منظر سازوکارهای رفتاری و اجتماعی تفسیر شوند.

ب) مدیریت تقاضای سفر و ابزارهای قیمتی

ممدوحی و همکاران (۱۳۹۹) با مطالعه موردی طرح قیمت‌گذاری دوره‌مبنای تهران و استفاده از داده‌های پرسشنامه‌ای سال ۱۳۹۷ و مدل‌های آماری (تحلیل عاملی اکتشافی و مدل لجستیک ترتیبی) نشان می‌دهند که پذیرش عمومی این سیاست به شدت تابع عوامل نگرشی، ادراکی و اجتماعی است. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که در صورت نادیده گرفتن این ابعاد، اجرای سیاست‌های قیمتی با مقاومت اجتماعی مواجه شده و اثربخشی آن‌ها کاهش می‌یابد. این یافته مستقیماً ضرورت ترکیب ابزارهای قیمتی با مداخلات بازاریابی اجتماعی را در پژوهش حاضر تأیید می‌کند.

سیدابریشمی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با موضوع تأثیر افزایش قیمت بنزین بر سهم شیوه‌های سفر در شهر تهران نشان دادند که کشش قیمتی تقاضای سفر در تهران پایین است و افزایش ۵۰ درصدی قیمت بنزین تنها ۳.۱٪ از سفرهای با خودروی شخصی را کاهش می‌دهد. این یافته، ناکارآمدی سیاست‌های صرفاً قیمتی را نشان داده و بر لزوم طراحی سازوکارهای ترکیبی تأکید می‌کند.

ج) بازاریابی اجتماعی و مداخلات رفتاری

مجدزاده و همکاران (۱۳۹۰) استفاده از الگوی بازاریابی اجتماعی برای کاهش رفتارهای خطرناک رانندگی در رانندگان تاکسی شهر تهران را موردتوجه قرار داده‌اند. این مطالعه از محدود پژوهش‌های داخلی است که به طور مشخص بازاریابی اجتماعی را در حوزه حمل‌ونقل شهری ایران به کار گرفته است. هرچند این مطالعه بر ایمنی ترافیک متمرکز است، اما کاربردپذیری رویکرد بازاریابی اجتماعی در بافت ایران را تأیید می‌کند.

عبدالرحمانی (۱۳۸۹) در مقاله‌ای به بررسی اهمیت نگاه اجتماعی و فرهنگی به ترافیک پرداخته و نفوذ متغیرهای اجتماعی بر آن همراه با ملاحظات اجتماعی و فرهنگی به جای ملاحظات مهندسی را شرح داده است. این مطالعه مبانی نظری لازم برای توجه به متغیرهای نرم در مدل‌سازی ترافیک را فراهم می‌کند.

۳-۲-۲- تحلیل شکاف پژوهشی و موقعیت‌یابی پژوهش حاضر

مرور تطبیقی مطالعات خارجی و داخلی نشان می‌دهد که سه جریان اصلی پژوهشی قابل‌شناسایی است: (۱) مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم با تمرکز بر ساختار اقتصادی-زیرساختی، (۲) مطالعات مدیریت تقاضای سفر با تأکید بر ابزارهای قیمتی و (۳) پژوهش‌های بازاریابی اجتماعی با محوریت تغییر رفتار. هر یک از این جریان‌ها پیشرفت‌های قابل‌توجهی داشته‌اند، اما دو خلأ اساسی باقی‌مانده است:

نخست، فقدان یکپارچه‌سازی این سه حوزه در چارچوبی واحد: در مطالعات خارجی، اگرچه لی و همکاران (۲۰۲۵) بر ترکیب سیاست‌ها تأکید کرده‌اند، اما به متغیرهای رفتاری نپرداخته‌اند. هلر و همکاران (۲۰۱۵) سازوکار بازارمحور را طراحی کرده‌اند اما مداخلات نرم را لحاظ نکرده‌اند. توجرسن (۲۰۱۴) و اکبر و همکاران (۲۰۲۱) بر بازاریابی اجتماعی متمرکز بوده‌اند اما چارچوب کمی پویا برای تحلیل بلندمدت ارائه نداده‌اند.

دوم، کمبود پژوهش‌های بومی یکپارچه در ایران: مطالعات داخلی با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در مدل‌سازی پویای ترافیک تهران (پورسیدآقایی و نبی‌زاده، ۱۴۰۳؛ احمدوند و همکاران، ۱۳۹۴) و تأکید بر اهمیت عوامل رفتاری (ممدوحی و همکاران، ۱۳۹۹)، تاکنون به طراحی و شبیه‌سازی یک سازوکار ترکیبی که هم‌زمان شامل ابزار بازارمحور (سه‌میه قابل‌مبادله پیمایش) و مداخلات بازاریابی اجتماعی باشد، نپرداخته‌اند.

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف، مدلی یکپارچه ارائه می‌دهد که در آن:

- **پویایی‌شناسی سیستم‌ها** به عنوان زبان مدل‌سازی و تحلیل بازخوردها
 - **طراحی سازوکار بازارمحور** (طرح هوشمندسازی پیمایش) با الهام از هلر و همکاران (۲۰۱۵)
 - **مداخلات بازاریابی اجتماعی** با بهره‌گیری از چارچوب اکبر و همکاران (۲۰۲۱) و توجرسن (۲۰۱۴)
- به صورت درون‌زا در ساختار سیستم حمل‌ونقل شهری تهران مدل‌سازی شده‌اند و اثر هم‌افزای آن‌ها در افق بلندمدت شبیه‌سازی می‌گردد.

نوآوری مقاله در توسعه یک مدل انباشت-جریان است که در آن «سه‌میه قابل‌مبادله پیمایش» به عنوان ابزار بازارمحور مدیریت تقاضا، همراه با متغیرهای رفتاری مبتنی بر بازاریابی اجتماعی، به صورت درون‌زا در ساختار بازخوردی سیستم حمل‌ونقل شهری مدل‌سازی شده است. در همین راستا، مقاله حاضر با هدف ارائه یک مدل پویای سیستم برای تبیین عوامل ایجادکننده ازدحام شهری و ارزیابی نقش سازوکارهای مبتنی بر بازاریابی اجتماعی در بهبود آن انجام شده است. این پژوهش می‌کوشد تا ضمن شناسایی متغیرهای کلیدی مؤثر بر تقاضای سفر و تراکم ترافیک، سازوکارهای سیاستی مبتنی بر انگیزه‌های اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی را در قالب یک مدل شبیه‌سازی پویا بررسی کند. نوآوری اصلی این مقاله، تلفیق سه حوزه دانشی «پویایی‌شناسی سیستم‌ها»، «مدیریت تقاضای سفر» و «بازاریابی اجتماعی» در قالب یک چارچوب تحلیلی یکپارچه است. از منظر کاربردی، نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی برای طراحی سیاست‌های ترکیبی شامل ابزارهای هوشمند پیمایش، مشوق‌های اجتماعی و اقتصادی و طرح‌های ترویجی تغییر رفتار شهروندان در کلان‌شهرهایی چون تهران فراهم آورد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

برگرفته از مبانی نظری و پیشینه تحقیق در این حوزه به نظر می‌رسد تحلیل پدیده ازدحام ترافیک شهری، به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین مسائل کلان‌شهری، نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی است که بتواند تعامل پویا میان عوامل اقتصادی، اجتماعی، زیرساختی و رفتاری را در طول زمان تبیین کند. در ادبیات تحلیل سامانه‌های پیچیده، حل چنین مسائلی مستلزم تفکر سیستمی و غیرخطی است. (Arnold & Wade, 2015b) یکی از شاخه‌های عملیاتی این رویکرد، پویایی‌شناسی سیستم‌ها^۱ است که نخستین بار توسط فارستر در اواخر دهه ۱۹۵۰ برای تحلیل ساختارهای اجتماعی-اقتصادی معرفی شد.

در چارچوب این پژوهش، سیستم حمل‌ونقل شهری به‌صورت یک سیستم باز و پویا در نظر گرفته شده است که از طریق سه دسته متغیر اصلی عمل می‌کند:

- عوامل اقتصادی و ساختاری: شامل درآمد، اشتغال، قیمت سوخت، مالکیت خودرو، هزینه تردد در شهر، هزینه حمل‌ونقل عمومی، ظرفیت معابر و زیرساخت‌ها.
 - عوامل اجتماعی و رفتاری: شامل ادراک ایمنی و آسایش، نگرش‌ها و هنجارهای اجتماعی نسبت به استفاده از خودرو شخصی یا وسایل حمل‌ونقل عمومی و سطح رضایت سفر.
 - سازوکارهای سیاستی و مداخله‌ای: شامل هزینه و سهمیه پیمایش، سیاست‌های بازاریابی اجتماعی، مشوق‌های تغییر رفتار و ابزارهای مبتنی بر طراحی مکانیسم‌های انگیزشی.
- در این سیستم، تراکم ترافیک نتیجه برهم‌کنش مستمر میان «تقاضای سفر» و «ظرفیت عرضه شبکه حمل‌ونقل» است که توسط حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی کنترل می‌شود. استفاده از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها امکان تحلیل این حلقه‌های علی، شناسایی نقاط اهرمی و طراحی سیاست‌های مؤثر را فراهم می‌سازد.

۳-۱- منابع و ابزارهای گردآوری داده‌ها

داده‌های موردنیاز این پژوهش از دو منبع اصلی گردآوری شده است:

- مرور نظام‌مند ادبیات: به‌منظور شناسایی متغیرهای کلیدی، روابط علی و پیشینه مداخلات سیاستی مرتبط با ترافیک شهری، مدیریت تقاضای سفر و بازاریابی اجتماعی، منابع علمی داخلی و خارجی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ بررسی شد. این مرور مبنای اولیه برای طراحی ساختار مفهومی مدل قرار گرفت.
- مصاحبه با خبرگان: برای تکمیل و اعتبارسنجی روابط استخراج‌شده از ادبیات و همچنین بومی‌سازی متغیرها متناسب با شرایط کلان‌شهر تهران، مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با ۱۵ نفر از خبرگان حوزه‌های حمل‌ونقل شهری، برنامه‌ریزی شهری و سیاست‌گذاری اجتماعی انجام شد. تحلیل داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه‌ها با روش تحلیل مضمون صورت

گرفت و مضامین استخراج شده در سه طبقه کلان ساختاری، رفتاری و سیاستی دسته‌بندی شدند. روابط میان این مضامین بر اساس اجماع خبرگان ترسیم و در قالب نمودارهای حلقه‌های علی^۱ مستند گردید.

۳-۲- مراحل و فازهای اجرایی پژوهش

پژوهش حاضر با اتخاذ رویکرد آمیخته اکتشافی^۲ در دو فاز اصلی زیر انجام شد:

الف) فاز کیفی: تدوین مدل مفهومی اولیه

در این فاز، یافته‌های حاصل از مرور ادبیات و تحلیل مصاحبه‌های خبرگان یکپارچه شدند تا ساختار علی سیستم حمل‌ونقل شهری و حلقه‌های بازخوردی مؤثر بر ازدحام ترافیک شناسایی گردد. خروجی این مرحله، نمودارهای حلقه‌های علی بود که روابط پویا میان متغیرهای اقتصادی (نظیر درآمد سرانه و هزینه سوخت)، متغیرهای زیرساختی (نظیر ظرفیت معابر و کیفیت حمل‌ونقل عمومی) و متغیرهای رفتاری (نظیر نگرش به خودروی شخصی و تمایل به تغییر رفتار) را نمایش می‌داد. این نمودارها مبنای طراحی مدل کمی در فاز بعدی قرار گرفتند.

ب) فاز کمی: توسعه و شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم‌ها

۱. تبدیل ساختار کیفی به مدل کمی (Stock-Flow): با استفاده از نرم‌افزار Vensim DSS، متغیرهای انباشت (مانند تعداد خودروهای فعال، تقاضای سفر و شاخص ازدحام) و جریان‌های مرتبط با آن‌ها (نرخ ورود خودرو، نرخ تغییر رفتار سفر، نرخ فرسودگی) تعریف شدند.
۲. کالیبراسیون و تعیین پارامترها: داده‌های آماری موردنیاز برای کالیبراسیون مدل از منابع رسمی شامل شورای عالی ترافیک، شرکت کنترل کیفیت هوا، مرکز آمار ایران و بانک مرکزی برای بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ گردآوری شد. پارامترهایی که داده‌های مستقیم برای آن‌ها در دسترس نبود، بر اساس قضاوت خبرگان و تطبیق با مطالعات مشابه تعیین شدند.
۳. شبیه‌سازی و اعتبارسنجی: مدل توسعه‌یافته برای بازه زمانی یادشده شبیه‌سازی شد و اعتبار آن از دو طریق مورد ارزیابی قرار گرفت: (۱) اعتبار ساختاری از طریق بررسی منطقی روابط و تأیید خبرگان و (۲) اعتبار رفتاری از طریق مقایسه روند خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی (میانگین خطای بازتولید رفتار کمتر از ۵ درصد) و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی. نتیجه این فرآیند، مدلی پویا و کالیبره شده از سیستم حمل‌ونقل شهری تهران است که امکان طراحی و ارزیابی سناریوهای مختلف سیاستی، از جمله «طرح هوشمندسازی پیمایش خودروها» و «مداخلات بازاریابی اجتماعی» را در افق زمانی بلندمدت فراهم می‌آورد.

۳-۳- نحوه کمی سازی متغیرهای کیفی در مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها

یکی از چالش‌های اساسی در مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، به‌ویژه در حوزه‌های اجتماعی و رفتاری، چگونگی بازنمایی و کمی‌سازی متغیرهای نرم^۱ است. متغیرهایی نظیر «ادراک شهروندان از کیفیت سفر»، «جاذبیت درک شده حمل‌ونقل عمومی» یا «اثر بخشی مداخلات بازاریابی اجتماعی» مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیستند، اما نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به حلقه‌های بازخوردی سیستم دارند. در این پژوهش، برای تبدیل این متغیرهای کیفی به کمیت‌های قابل استفاده در مدل انباشت-جریان، از رویکرد ترکیبی «چارچوب کمی سازی مشارکتی»^۲ بهره گرفته شده است. این چارچوب که توسط پژوهشگران دانشگاه کالج لندن برای مدل‌سازی با داده‌های محدود و متغیرهای ناملموس توسعه یافته، شامل مراحل زیر است:

۱- مرور ادبیات و استخراج دامنه تغییرات: برای هر یک از متغیرهای کیفی، نخست با مرور نظام‌مند ادبیات (منابع ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵)، مستندات تجربی موجود درباره دامنه تغییرات، مقادیر حدی و جهت اثر آن‌ها گردآوری شد. برای نمونه، مطالعات تجربی بازاریابی اجتماعی در مدیریت تقاضای سفر نشان می‌دهند که کمپین‌های موفق می‌توانند سهم سفر با خودروی شخصی را بین ۸٪ تا ۱۵٪ کاهش دهند. (Kassirer, 2014; Thøgersen, 2014) این دامنه به عنوان مرجع اولیه برای تعریف پارامترهای مدل مورد استفاده قرار گرفت.

۲- استخراج نظر خبرگان با روش‌های ساختاریافته: در گام دوم، از فنون خبرگی ساختاریافته (پرسشنامه‌های طیف لیکرت و فن دلفی) برای تعیین مقادیر متناسب با بافت تهران استفاده شد. از خبرگان خواسته شد تا در یک طیف عددی ۰ تا ۱۰ شدت تأثیر هر متغیر کیفی را بر متغیرهای وابسته تعیین کنند همچنین جلسات گروهی با خبرگان برای ترسیم «نقشه‌های رفتار»^۳ و بحث درباره مفروضات مدل، گام دیگری در جهت اعتبارسنجی نحوه کمی‌سازی متغیرهای نرم بود. در این جلسات، فرضیه‌های پویا در مورد چگونگی تأثیر متغیرهایی مانند «اعتماد اجتماعی» یا «فشار هنجاری» بر تمایل به تغییر رفتار، به بحث گذاشته شد و اجماع نسبی در مورد شکل توابع (تابع خطی، لگاریتمی یا S-shaped) حاصل گردید.

۳- آزمون حساسیت و تحلیل عدم قطعیت: پس از تعریف روابط و پارامترهای اولیه، تحلیل حساسیت گسترده‌ای بر روی متغیرهای نرم انجام شد. برای مثال، اثر متغیر «شدت مداخله بازاریابی اجتماعی» بر «نرخ پذیرش طرح هوشمندسازی» در دامنه‌ای از مقادیر محافظه‌کارانه تا خوش‌بینانه آزمایش گردید. پایداری رتبه‌بندی سناریوهای سیاستی در این تحلیل‌ها، نشان‌دهنده استحکام مدل علیرغم وجود متغیرهای نرم بود.

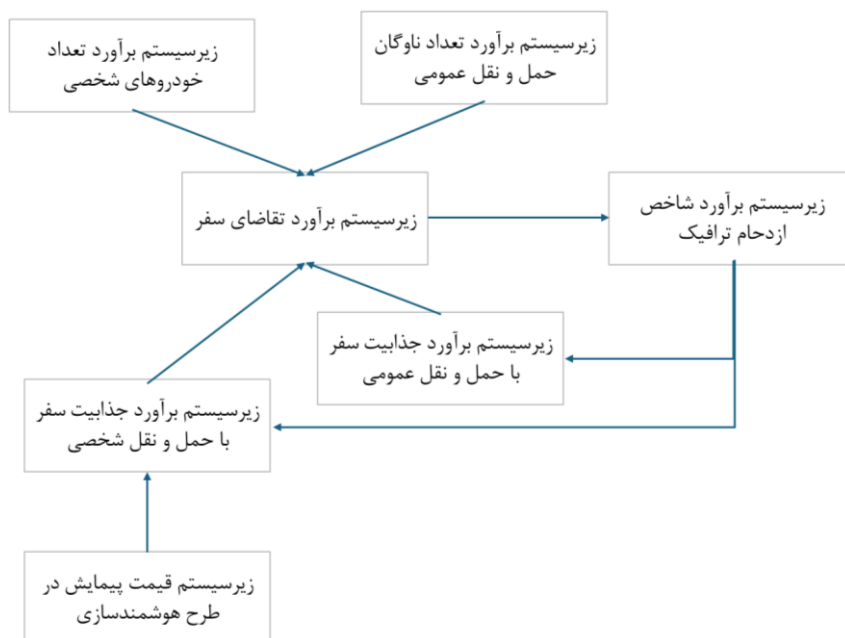
با اتخاذ این رویکرد چندلایه، متغیرهای کیفی به صورت شفاف و مستند به پارامترهای قابل استفاده در معادلات مدل تبدیل شدند. برای نمونه، متغیر «اثر بخشی بازاریابی اجتماعی» در زیرسیستم قیمت پیمایش به صورت تابعی از «شدت مداخله» (بر اساس بودجه تخصیص یافته و پوشش مخاطب) و «ضریب نفوذ اجتماعی» تعریف شده است. این تابع با الهام از پژوهش‌های اخیر در زمینه مدل‌سازی پویای اثر بخشی مداخلات رفتاری (Akbar et al, 2021; Saunders & Truong, 2019) شکل‌دهی شده و در جریان اعتبارسنجی، رفتار آن با شواهد تجربی تطبیق داده شده است.

1. Soft Variables
2. Participatory Quantification Framework
3. Behavioral Trend Mapping

۴- نتایج و تحلیل یافته‌های تحقیق

۴-۱- مدل‌سازی پویای سیستم ترافیک شهری

بر اساس فرایند ذکرشده در بخش قبل، در این مطالعه مسئله ترافیک شهری به زیرسیستم شامل (۱) برآورد تعداد خودروهای شخصی، (۲) زیرسیستم برآورد تعداد ناوگان حمل‌ونقل عمومی، (۳) زیرسیستم برآورد تقاضای سفر، (۴) زیرسیستم برآورد جذابیت سفر با حمل‌ونقل عمومی، (۵) زیرسیستم برآورد جذابیت سفر با حمل‌ونقل شخصی، (۶) زیرسیستم برآورد شاخص ازدحام ترافیک و (۷) زیرسیستم قیمت پیمایش در طرح هوشمندسازی بر اساس شکل (۲) شکسته شد؛ که در ادامه شرح مختصری آورده می‌شود.



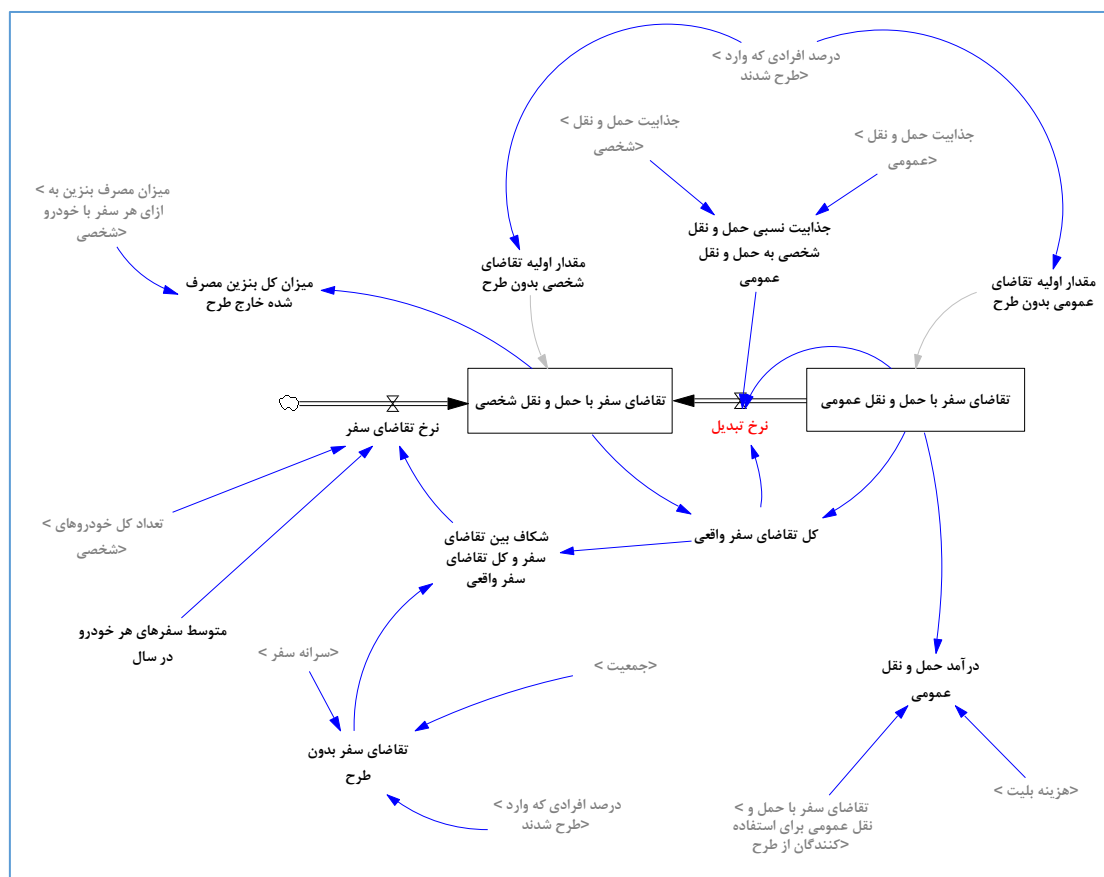
شکل ۲. ارتباط بین زیرسیستم‌های مسئله ترافیک شهری

در زیرسیستم برآورد تعداد خودروهای شخصی، تعداد کل خودروهای شخصی شامل تعداد خودروهای شخصی در عمر مفید و تعداد خودروهای شخصی فرسوده می‌شود که به صورت متغیر انباشت (سطح) در مدل فرموله می‌شوند. متغیر تعداد خودروهای شخصی در عمر مفید با متغیر نرخ ورود خودروهای شخصی جدید افزایش می‌یابد و از طرف دیگر، با متغیر نرخ فرسودگی خودروهای شخصی کاهش می‌یابد. عمر مفید خودروها ۱۴ سال فرض شده است. تعداد زیادی خودرو شخصی فرسوده نیز وجود دارند که همچنان در سطح شهر تردد می‌کنند. این خودروهای فرسوده زمانی که اسقاط می‌شوند از دور خارج می‌شوند. نرخ اسقاط ۱۰ سال فرض شده است. مجموع تعداد خودروهای شخصی در عمر مفید و تعداد خودروهای شخصی فرسوده، تعداد کل خودروهای شخصی را تشکیل می‌دهد.

[illegible]

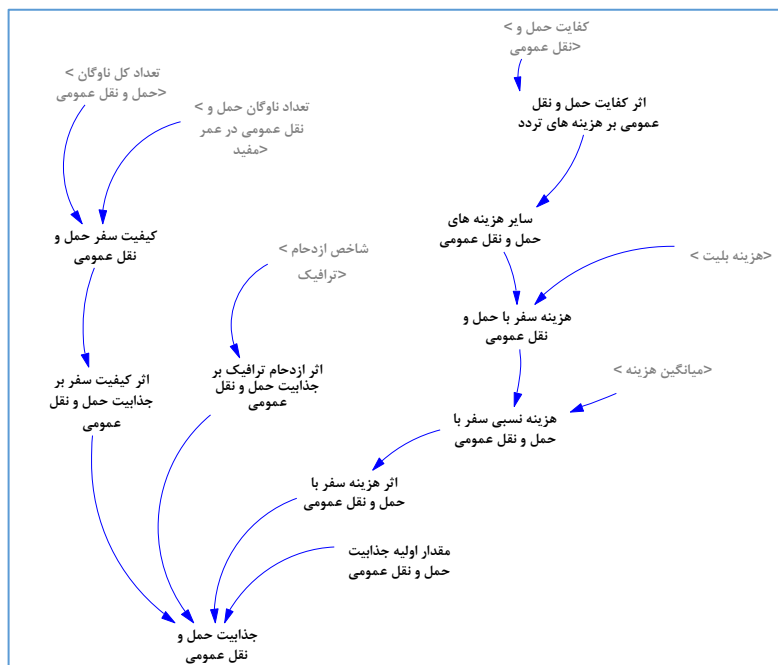
شکل ۴. زیرسیستم برآورد تعداد ناوگان حمل و نقل عمومی

در زیرسیستم برآورد تقاضای سفر، تعداد تقاضای سفر شامل تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی و تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی می‌شود. متغیر «جذابیت نسبی حمل و نقل شخصی به حمل و نقل عمومی» عامل تعیین‌کننده در برآورد دو متغیر فوق است. هرچه جذابیت نسبی حمل و نقل شخصی به حمل و نقل عمومی بیشتر باشد، از تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی کاسته شده به تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی اضافه می‌شود.



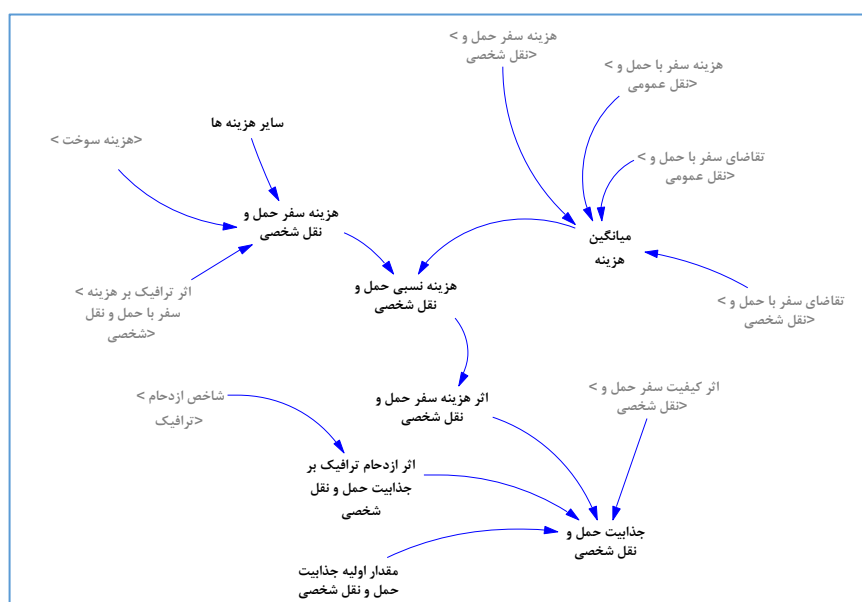
شکل ۵. زیرسیستم برآورد تقاضای سفر

در زیرسیستم جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی، سه عامل کیفیت سفر با حمل و نقل عمومی، ازدحام ترافیک و هزینه سفر با حمل و نقل عمومی بر جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی تأثیر دارند. اثر کیفیت سفر با حمل و نقل عمومی بر جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی مثبت است که کیفیت سفر با حمل و نقل عمومی به نسبت تعداد ناوگان حمل و نقل عمومی در عمر مفید به تعداد کل ناوگان حمل و نقل عمومی بستگی دارد. اثر ازدحام ترافیک بر جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی منفی است. به عبارت دیگر، با افزایش شاخص ازدحام ترافیک، جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی نیز کاهش می‌یابد. اثر هزینه سفر با حمل و نقل عمومی بر جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی نیز منفی است و افزایش آن از جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی می‌کاهد.



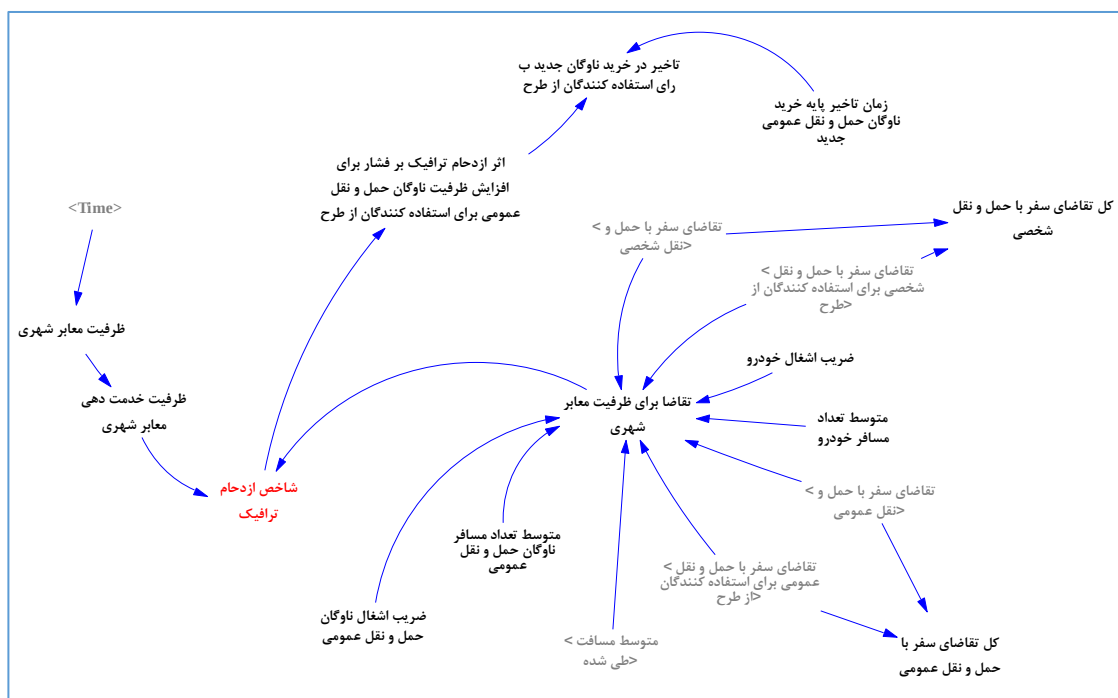
شکل ۶. زیرسیستم برآورد جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی

زیرسیستم برآورد جذابیت سفر با حمل و نقل شخصی مشابه زیرسیستم برآورد جذابیت سفر با حمل و نقل عمومی، سه عامل «کیفیت سفر با حمل و نقل شخصی»، «ازدحام ترافیک» و «هزینه سفر با حمل و نقل شخصی» بر جذابیت سفر با حمل و نقل شخصی تأثیر دارند.



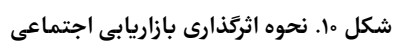
شکل ۷. زیرسیستم برآورد جذابیت سفر با حمل و نقل شخصی

در زیرسیستم برآورد شاخص ازدحام ترافیک، شاخص ازدحام ترافیک بر اساس نسبت دو متغیر اصلی تقاضا برای ظرفیت معابر شهری و ظرفیت خدمت‌دهی معابر شهری برآورد می‌شود. ظرفیت خدمت‌دهی معابر شهری فرض شده است که با شیب کمتری نسبت به گذشته افزایش می‌یابد که ناشی از رسیدن به محدودیت ظرفیت فضای شهر است.



شکل ۸. زیرسیستم برآورد شاخص ازدحام ترافیک

در زیرسیستم پیمایش در طرح هوشمندسازی، یک متغیر انباشت (قیمت پیمایش به ازای هر کیلومتر) دارد که تحت تأثیر متغیر نرخ (نرخ افزایشده قیمت) است. این نرخ نیز خود توسط نسبت عرضه به تقاضای پیمایش تعیین می‌شود. این نرخ درواقع نرخي است که سبب تعادل بین عرضه و تقاضا می‌شود. عرضه سهمیه پیمایش توسط «مقدار سهمیه»، «درصد افرادی که وارد طرح شدند» و «تعداد کل خودروهای شخصی» تعیین می‌شود. تقاضای سهمیه پیمایش نیز تحت تأثیر سه متغیر است. متغیر «قیمت پیمایش به ازای هر کیلومتر» بر متوسط مسافت طی شده تأثیر می‌گذارد. این زیرسیستم در شکل (۱) نشان داده شده است. مابقی زیرسیستم‌ها به جهت رعایت حجم مطالب آورده نشده است.



۲-۴- اعتبارسنجی مدل ساخته شده

اعتبارسنجی، کنترل کیفیت و نحوه اجرای سیستم و ارتباط اجزای داخلی آن است. سؤال اصلی در این آزمون مربوط به روابط منطقی اجزای سیستم باهم است. در این آزمون هدف بررسی کل سیستم و نیز بررسی صحت نتایج نهایی تحت تأثیر چندین پارامتر بر یکدیگر است. از این رو می‌توان گفت، هدف نهایی فرآیند اعتبارسنجی در پویایی‌شناسی سیستم‌ها، اطمینان از صحت رفتار ساختاری مدل در عین توجه به فرآیند مدل‌سازی است. هدف نهایی مدل‌های پویایی سیستم‌ها، ارزیابی اثر سیاست‌های مختلف بر رفتار سیستم است. با توجه به اینکه مدل‌های پویایی سیستم‌ها، قصد دارند در مورد پیامدهای درازمدت هر سیاست، تحلیلی ارائه کنند، بنابراین در اعتبارسنجی، تمرکز باید بر میزان تولید رفتار ساختاری سیستم باشد تا پیش‌بینی نقطه به نقطه مقداری متغیرها (Sushil, 1996).

در مدل شبیه‌ساز، حدود ۲۰۰ متغیر و به تبع آن تقریباً همین تعداد معادله به کار گرفته شده است. با توجه به گستردگی ساختار مدل و محدودیت‌های ارائه، درج کامل تمامی متغیرها و روابط آن‌ها در جدول امکان‌پذیر نیست؛ از این رو، در جدول ۱ صرفاً بخشی از متغیرهای کلیدی و روابط اصلی به صورت نمونه ارائه شده است.

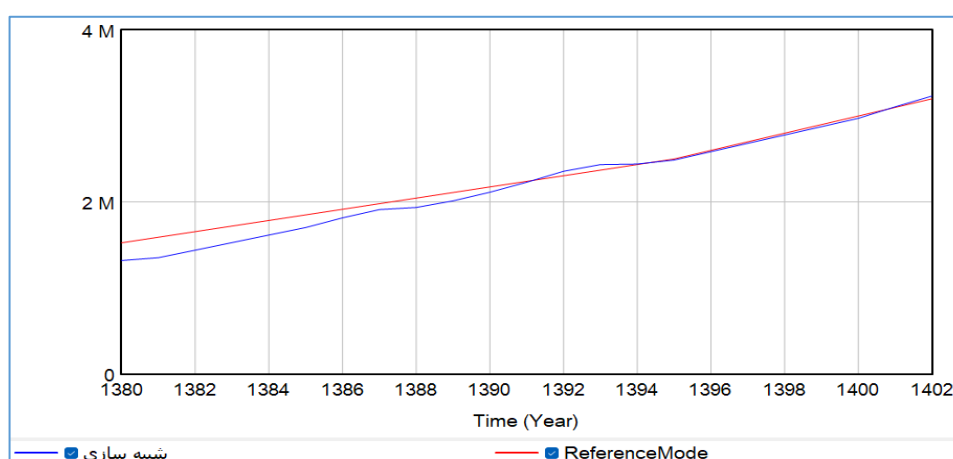
جدول ۱. برخی متغیرها بکار رفته در مدل شبیه‌ساز پژوهش

نام متغیر	نوع متغیر	فرمول
قیمت پیمایش به ازای هر کیلومتر	انباشت	integ (نرخ افزایش قیمت)
IF THEN ELSE		
(درصد افرادی که وارد طرح شدند=۰)		
0 ,		
IF THEN ELSE		
نسبت عرضه به تقاضا		
$\geq 1, (-1)^*$		
نرخ افزایش قیمت	جریان	قیمت پیمایش به ازای هر کیلومتر
*نسبت عرضه به تقاضا		
*ضریب قیمت		
, قیمت پیمایش به ازای هر کیلومتر		
*نسبت عرضه به تقاضا		
*ضریب قیمت		
تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی	انباشت	نرخ تبدیل برای استفاده‌کنندگان از طرح + نرخ تقاضای سفر برای استفاده‌کنندگان از طرح
عرضه سهمیه پیمایشی	کمکی	تعداد کل خودروهای شخصی
*مقدار سهمیه		
*درصد افرادی که وارد طرح شدند		

نام متغیر	نوع متغیر	فرمول
قیمت پیمایش به ازای هر کیلومتر	انباشت	$\text{MAX} - \text{ثابت سهمیه ضریب}$ $\text{integr} (\text{نرخ افزایش قیمت})$
مقدار سهمیه	کمکی	$\text{MAX} - \text{ثابت سهمیه ضریب}$ $\text{integr} (\text{نرخ افزایش قیمت})$
نسبت عرضه به تقاضا	کمکی	IF THEN ELSE $\text{تقاضای سهمیه پیمایش} = 0$
عرضه سهمیه پیمایش / تقاضای سهمیه پیمایش		

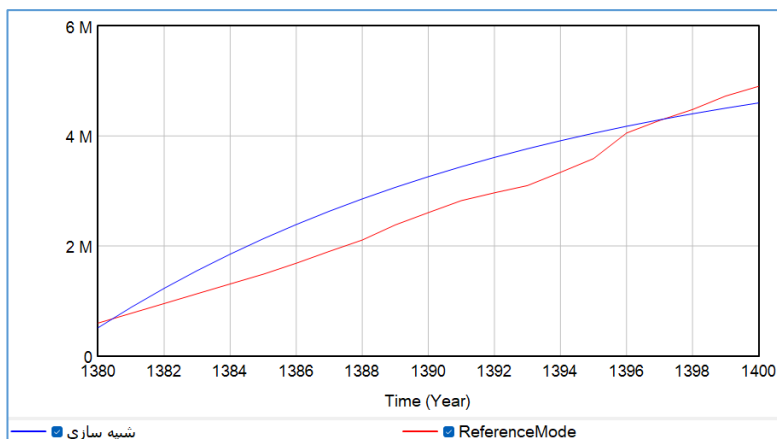
در ادامه اعتبار مدل به وسیله یک سری از آزمون‌هایی که برای ارزیابی مدل‌ها توسط محققین این حوزه توسعه داده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قابل ذکر است که جهت اعتبارسنجی، پس از تعیین روابط ریاضی بین متغیرها و وارد کردن مقادیر پارامترها، مدل به صورت سالانه، از ابتدای سال ۱۳۸۰ تا انتهای ۱۴۰۲ شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است هدف از این آزمون، نشان دادن انطباق رفتار مدل با رفتار مرجع^۱ است. نتایج اعتبارسنجی در شکل‌های زیر ارائه شده است. در شکل (۱۱)، نتایج آزمون رفتار برای متغیر ظرفیت معابر شهری مشاهده می‌شود. همان‌طور که در نمودار مذکور مشاهده می‌شود رفتار شبیه‌سازی شده تقریب مناسبی از رفتار مرجع است.



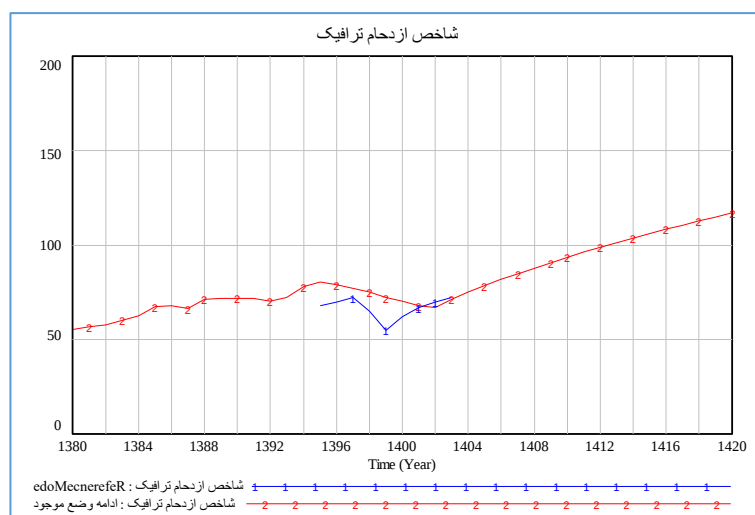
شکل ۱۱. نمودار آزمون مقایسه روند رفتار مرجع و شبیه‌سازی شده متغیر ظرفیت معابر شهری

در شکل (۱۲)، نتایج آزمون رفتار برای متغیر تعداد خودروهای شخصی در عمر مفید مشاهده می‌شود. همان‌طور که در نمودار مذکور مشاهده می‌شود رفتار شبیه‌سازی شده تقریب مناسبی از رفتار مرجع است.



شکل ۱۲. نمودار آزمون مقایسه روند رفتار مرجع و شبیه‌سازی شده متغیر تعداد خودروهای شخصی در عمر مفید

شکل (۱۳) نمودار روند رفتار مرجع و شبیه‌سازی شده متغیر شاخص ازدحام ترافیک را نشان می‌دهد که برای رفتار شبیه‌سازی شده طی سال‌های ۱۳۸۰ الی ۱۴۲۰ ترسیم شده است اما برای روند رفتار مرجع شاخص ازدحام ترافیک فقط برای سال‌های ۱۳۹۵ الی ۱۴۰۲ رسم شده است که ناشی از فقدان داده برای سال‌های قبل‌تر است. همان‌طور که در نمودار مذکور مشاهده می‌شود روند رفتار شبیه‌سازی شده متغیر مذکور از میان روند رفتار مرجع شاخص ازدحام ترافیک می‌گذرد که نشان می‌دهد مدل به خوبی کالیبره شده است. همچنین روند متغیر شبیه‌سازی شده از سال ۱۴۰۲ به بعد به شدت افزایشی است که بخشی از آن ناشی از فرض عدم امکان توسعه بیشتر معابر شهری است.

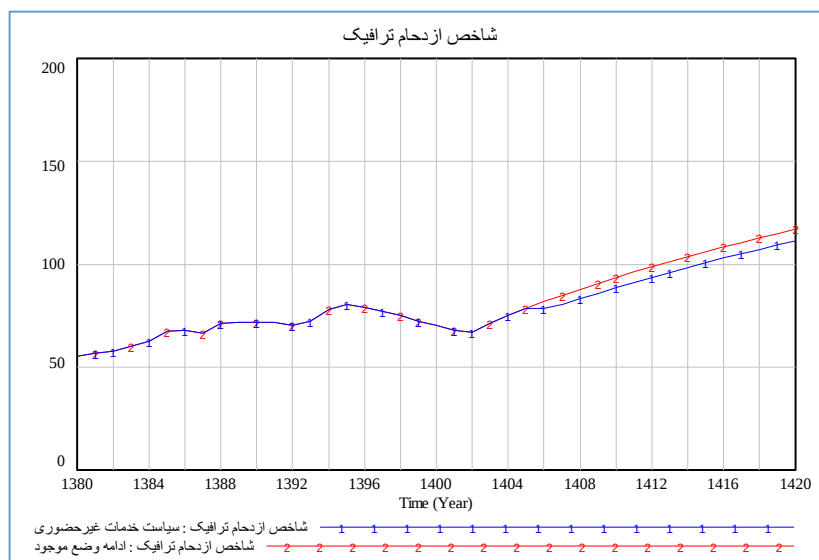


شکل ۱۳. نمودار روند رفتار مرجع و شبیه‌سازی متغیر شاخص ازدحام ترافیک

۴-۳- سناریوهای سیاستی و تحلیل یافته‌های تحقیق

۴-۳-۱- سیاست افزایش خدمات غیرحضوری

در سیاست افزایش خدمات غیرحضوری فرض شده است که با افزایش خدمات غیرحضوری دستگاه‌های اجرایی مختلف مانند وزارتخانه‌ها، شهرداری و سازمان‌های مختلف سرانه سفر تا حداکثر ۵ درصد کاهش می‌یابد. سال شروع اجرای سیاست ۱۴۰۵ فرض شده است. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود اجرای این سیاست با فرض کاهش ۵ درصدی در سرانه سفر به کاهش اندکی در شاخص ازدحام ترافیک منجر می‌شود اما تأثیر آن در حدی نیست که بتواند مسئله ترافیک را که در حال شدت گرفتن است را حل کند.



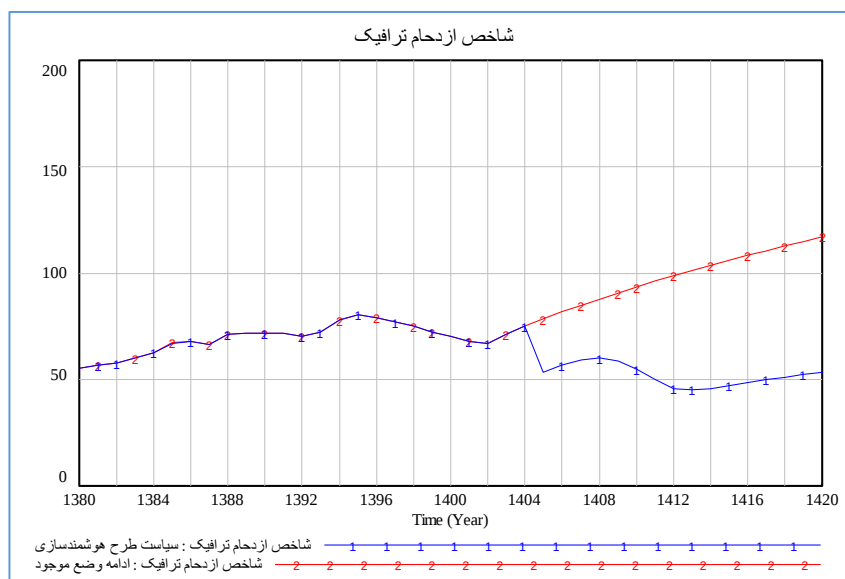
شکل ۱۴. تأثیر سیاست خدمات غیرحضوری بر شاخص ازدحام ترافیک

۴-۳-۲- سیاست مدیریت تقاضای سفر شخصی با طرح هوشمندسازی

طرح هوشمندسازی از این قرار است که به هریک از پلاک‌های فعال داخل شهر تهران^۱، سهمیه‌ای رایگان (برحسب کیلومتر) برای پیمایش در شبکه معابر شهر تهران اختصاص می‌یابد. میزان این سهمیه با توجه به میانگین پیمایش هر نوع وسیله (سواری و وانت، تاکسی و ون، وسایل نقلیه سنگین) و ظرفیت معابر، تعیین می‌شود. به عنوان مثال، اگر میانگین کنونی پیمایش هر خودروی شخصی در شهر تهران حدود ۴۰۰ کیلومتر در همراه باشد، می‌توان سهمیه ماهیانه‌ای در حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر به رایگان در اختیار هر خودرو گذاشت. شهروندان برای پیمایش مازاد بر این میزان، باید امتیاز لازم را به صورت کیلومتر خریداری کنند. این خریداری از

۱. نحوه تخصیص برای مراحل بعدی طرح می‌تواند به روش‌های عادلانه‌تر مانند تخصیص سهمیه به شماره پلاک هر واحد مسکونی، اداری و تجاری و یا به هر خانوار اصلاح شود.

افرادی صورت می‌گیرد که از همه سهمیه رایگان خود استفاده نکنند. مدیریت شهری نیز می‌تواند از دادوستد امتیازها درصدی به عنوان هزینه‌های نگهداری معابر صرفاً از خریدار کسر نماید و از این راه کسب درآمد کند. در سیاست طرح هوشمندسازی نیز سال شروع اجرای سیاست ۱۴۰۵ فرض شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود اجرای این سیاست به کاهش قابل توجه در شاخص ازدحام ترافیک منجر می‌شود.

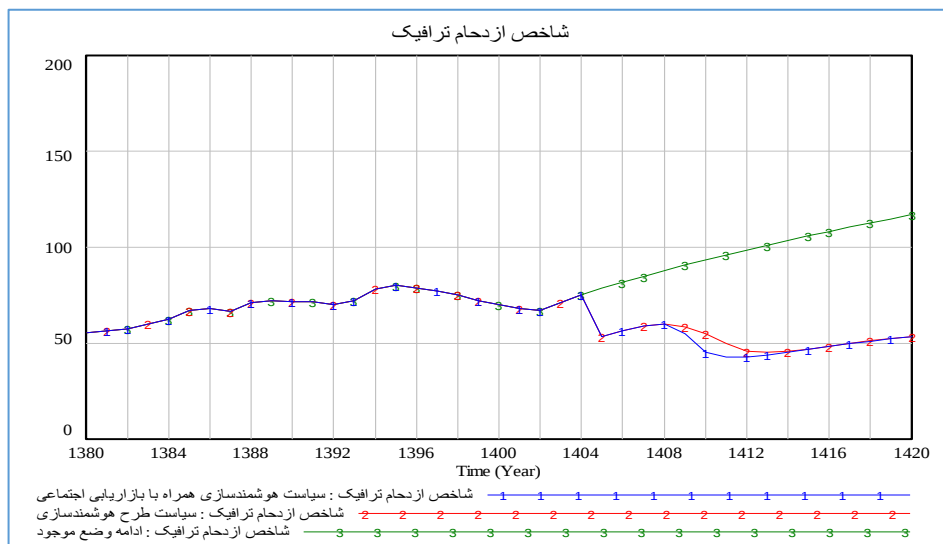


شکل ۱۵. تأثیر سیاست طرح هوشمندسازی بر شاخص ازدحام ترافیک

۳-۳-۴- سیاست طرح هوشمندسازی همراه با بازاریابی اجتماعی

در سیاست طرح هوشمندسازی همراه با بازاریابی اجتماعی فرض شده است که افراد در طی دو سال وارد طرح هوشمندسازی می‌پیوندند. در این سیاست، مداخلات بازاریابی اجتماعی به عنوان مکمل طرح هوشمندسازی و اتخاذ روش‌هایی که سبب می‌شوند افراد سریع‌تر به طرح هوشمندسازی وارد شوند، به کار گرفته شده است. این مداخلات شامل موارد زیر است:

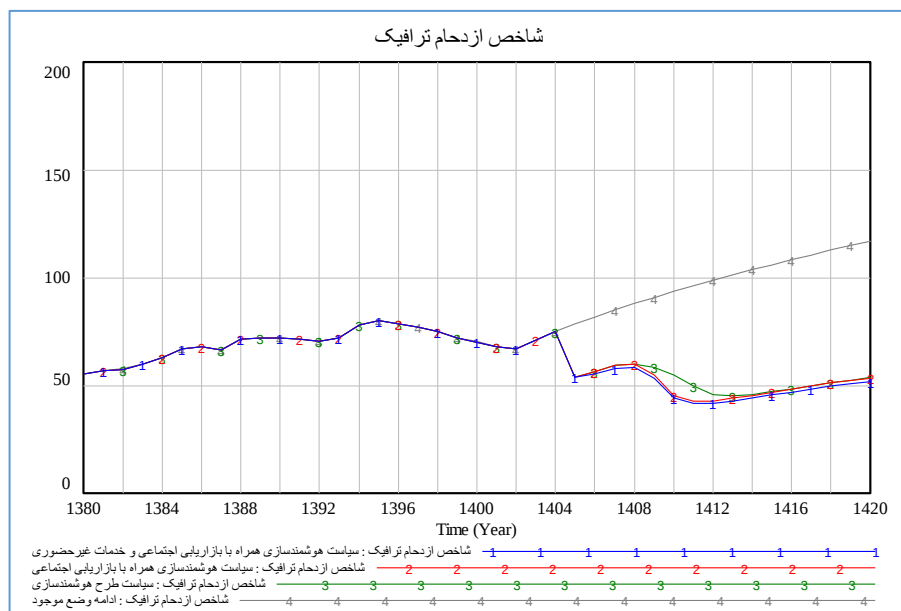
- کمپین‌های آگاهی‌رسانی درباره مزایای اجتماعی و زیست محیطی کاهش پیمایش
 - ترویج هنجارهای اجتماعی مرتبط با حمل‌ونقل پایدار
 - استفاده از رهبران محلی و تأثیرگذاران اجتماعی برای ترویج مشارکت در طرح
 - شفاف‌سازی درباره نحوه تخصیص درآمد حاصل از طرح به توسعه حمل‌ونقل عمومی
- اثر این مداخلات در مدل به صورت «افزایش نرخ پذیرش طرح» و «کاهش زمان تأخیر در تغییر رفتار» لحاظ شده است. همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود اجرای سیاست طرح هوشمندسازی همراه با بازاریابی اجتماعی سریع‌تر به کاهش شاخص ازدحام ترافیک منجر می‌شود.



شکل ۱۶. تأثیر سیاست طرح هوشمندسازی همراه با بازاریابی اجتماعی بر شاخص ازدحام ترافیک

۴-۳-۴- سیاست طرح هوشمندسازی همراه با بازاریابی اجتماعی و افزایش خدمات غیرحضوری

در اجرای همزمان سیاست های طرح هوشمندسازی همراه با بازاریابی اجتماعی و سیاست افزایش خدمات غیرحضوری بیشترین اثرگذاری بر شاخص ازدحام ترافیک مشاهده می شود (شکل ۱۷). همانند سیاست های قبل، سال شروع اجرای سیاست ۱۴۰۵ فرض شده است.



شکل ۱۷. تأثیر سیاست طرح هوشمندسازی همراه با بازاریابی اجتماعی و خدمات غیرحضوری بر شاخص ازدحام ترافیک

۴-۴- مقایسه و تحلیل یکپارچه نتایج سناریوهای سیاستی

به منظور امکان مقایسه دقیق و کمی اثربخشی سناریوها، شاخص‌های کلیدی عملکرد در جدول (۲) ارائه شده است. مقادیر پایه (سناریوی مرجع) و تغییرات هر سناریو نسبت به آن محاسبه گردیده است.

جدول ۲. مقایسه اثربخشی سناریوهای سیاستی در افق ۱۴۲۰

شاخص عملکردی	سناریوی مرجع (ادامه وضع موجود)	سناریوی اول (خدمات غیرحضور)	سناریوی دوم (طرح هوشمندسازی)	سناریوی سوم (طرح هوشمندسازی + بازاریابی اجتماعی)	سناریوی چهارم (ترکیب کامل)
نرخ پذیرش طرح هوشمندسازی (سال پنجم اجرا)	-	-	۶۵٪	۹۸٪ (افزایش ۵۱ واحد درصدی)	۹۹٪
شاخص ازدحام ترافیک (TTI)	۱۱۷	(کاهش ۵٪)	(کاهش ۵۴٪)	۵۳ (کاهش ۵۵٪)	۵۰ (کاهش ۵۷٪)
	نسبت به مرجع	نسبت به مرجع	نسبت به مرجع	نسبت به مرجع	نسبت به مرجع

۴-۵- مزایا و مراحل اجرای طرح هوشمندسازی

با توجه به مصرف سالیانه ۶ میلیارد لیتر بنزین در شهر تهران (طبق ترازنامه انرژی سال ۹۷)، با اجرای طرح هوشمندسازی در سناریوی ترکیبی چهارم ازدحام ترافیک ۵۰ کاهش می‌یابد. ولی با فرض اینکه اجرای این طرح صرفاً موجب صرفه جویی در حدود ۱۰ درصد در مصرف بنزین معادل سالیانه ۶۰۰ میلیون لیتر شود، با احتساب قیمت ۱۰۰ هزار تومان به ازای هر لیتر بنزین در بازار خلیج فارس، درآمدی معادل ۶۰ هزار میلیارد تومان (تقریباً ۳۹۰ میلیون دلار^۱) از محل صرفه جویی در مصرف بنزین فقط در شهر تهران عاید می‌شود. پیشنهاد می‌شود این درآمد در کنار درآمدهای حاصل از خرید و فروش امتیاز پیمایش شهروندان توسط شهرداری، در یک "صندوق توسعه شهری" واریز شود. با استفاده از ظرفیت این صندوق می‌توان اقدام به انتشار اوراق قرضه شهرداری^۲ نمود

۱. قیمت بنزین براساس فوب خلیج فارس ۷۰ سنت و قیمت دلار ۱۵۰ هزار تومان در نظر گرفته شده است.

یا قراردادهای مبتنی بر مشارکت بخش عمومی - خصوصی (PPP)^۱ منعقد کرد و از این طریق، سرمایه لازم برای پروژه های زیرساختی مانند زیرساخت های لازم برای اجرای طرح حاضر و یا تجهیز ناوگان حمل و نقل همگانی شهر را تأمین نمود.

همچنین با ایجاد محدودیت در محل هزینه کرد درآمدهای حاصله برای شهروندان، به نحوی که تنها به نفع حمل و نقل عمومی هزینه شود، ایستگاه دوچرخه و یا پارکینگ های عمومی سطح شهر، منابع مالی قابل توجهی به سوی شرکت های ارائه دهنده این خدمات هدایت می شود. این سازوکار، بازدهی سرمایه گذاری در این زمینه را برای بخش خصوصی توجیه پذیر کرده و امکان توسعه ناوگان با کیفیت و سایر خدمات مربوطه، به سرعت فراهم می شود. به طور مثال می توان با شرکت های تاکسی اینترنتی مانند اسنپ و تپسی قراردادهای مشارکتی و یا همکاری منعقد کرد تا در صورت به کارگیری خودروهای ون و مینی بوس و ارائه خدمات سفر با غیر خودروی سواری، امکان پرداخت هزینه ها توسط شهروندان از این محل حتی با تخصیص یارانه میسر گردد. درواقع از طریق هدایت منابع مالی ایجاد شده می توان چرخه معیوب موجود را به نفع توسعه پایدار حمل و نقل عمومی تغییر داد و از این طریق مطلوبیت حمل و نقل همگانی و پاک را برای شهروندان به میزان فراوانی افزایش داد. علاوه بر کنترل مصرف سوخت، طرح مدیریت هوشمند پیمایش به روش فوق این مزیت را نسبت به افزایش قیمت سوخت دارد که امکان مدیریت و بهبود شرایط ازدحام ترافیک را نیز فراهم می کند. به این صورت که می توان با توجه به شرایط ازدحام، شبکه و وسیله نقلیه، ضرایب مختلفی برای هر کیلومتر پیمایش در نظر گرفت و از این طریق به باز توزیع ترافیک در سطح شهر کمک کرد. ضرایبی از قبیل:

- زمان روز: ضریب بزرگ تر به ازای تردد در ساعات های اوج ترافیک،
- آلایندگی: ضریب بالاتر برای وسایل با میزان آلایندگی بیشتر،
- محدوده مکانی: ضریب بیشتر برای نواحی مرکزی شهر.

علاوه بر این، می توان با متغیر سازی هزینه بیمه خودرو به بهبود شاخص های ایمنی در سطح شبکه نیز کمک کرد. به این شکل که به جای هزینه ثابت سالیانه، بخشی از هزینه بیمه به صورت متغیر و بر اساس مسافت پیموده شده اخذ شود. به این ترتیب، افراد ترغیب می شوند تا برای پرداخت هزینه بیمه کمتر، پیمایش خود در سطح شبکه را بهتر مدیریت کنند.

از مهم ترین مسائل پیرامون این طرح، شیوه ردیابی وسایل نقلیه و زیرساخت های اجرایی مورد نیاز است. به مرور زمان و با تکمیل طرح، ردیابی وسایل عمدتاً توسط تجهیزات داخل هر خودرو که مبتنی بر سامانه های موقعیت یاب هستند انجام شده و از دوربین ها به عنوان مکمل و برای نظارت و اعمال قانون استفاده می شود. برای گسترش دوربین های سطح شهر نیز از سازوکار سرمایه گذاری بخش خصوصی با مشارکت در درآمد طرح بهره گیری می شود. در این راستا، می توان چندین فاز را برای تکامل تدریجی طرح در نظر گرفت:

1. Public-private partnership

- فاز اول- شبکه سازی: در این مرحله، اجرای طرح با هدف ترغیب شهروندان به مشارکت در طرح از طریق نصب ردیاب بر روی خودروی خود صورت می گیرد. در ابتدا در محدوده طرح ترافیک و پس از آن طرح کاهش آلودگی هوا در تهران به طور آزمایشی وارد طرح خواهد شد. مشوق اصلی در این مرحله ارائه سهمیه پیمایش رایگان به خودروهای شرکت کننده در طرح و مجوز برای فروش این سهمیه به سایر خودروهایی که در طرح شرکت و ردیاب نصب کرده اند، می شود. به طور مثال در این مرحله در فاز اول، به ازای نصب ردیاب سهمیه پیمایش رایگان ۲۰ کیلومتر در ماه برای طرح ترافیک و ۵۰ کیلومتر در ماه برای تردد در کل طرح در نظر گرفته می شود. فروش مجوز تردد در طرح ترافیک به صورت پیمایشی نیز در این مرحله صورت می گیرد. تنظیم تعرفه های مجوز پیمایش مبنا باید به گونه ای باشد که انگیزه لازم برای نصب پیمایش را ایجاد کند.
- به موازات این مرحله تدوین سیاست های تشویقی مداخله بازیگران زیست بوم حمل و نقل شهری و مذاکره با شرکت های بیمه برای ارائه تخفیف های جذاب و شرکت های فعال در حمل و نقل شهری مانند اسنپ و تپسی برای توسعه و تقویت ناوگان حمل و نقل همگانی صورت می گیرد. جذابیت اقتصادی حضور آن ها، از طریق امکان هزینه کرد منافع حاصله برای افراد از فروش سهمیه پیمایش در سیستم حمل و نقل همگانی، در کنار پرداخت یارانه افزایش می باید. زمان برآوردی این مرحله یک سال است که حسب موفقیت در تحقق اهداف این مرحله می تواند کاهش یا افزایش یابد.
- فاز دوم- رفتارسازی: در این مرحله اختصاص سهمیه پیمایش رایگان در طرح ترافیک و طرح کاهش آلودگی (رینگ یک و دو) در تهران به خودروهای مشارکت کننده در طرح مدیریت پیمایش به ازای رعایت الگوی پیمایش (به طور مثال ۳۰۰ کیلومتر در ماه) در کل شبکه معابر اختصاص پیدا می کند. به موازات آن هزینه حضور در طرح ترافیک نیز به طوری که انگیزه مشارکت در طرح را برای خودروهای جدید ایجاد کند، افزایش می یابد. به موازات مرحله اول و دوم شبکه دوربین های نظارتی در شهر از طریق سرمایه گذاران بخش خصوصی گسترش می یابد. مدت اجرای این مرحله ۱ سال برآورد می شود.
- به موازات این مرحله و در صورت موفقیت در فاز اول در تهران، فاز شبکه سازی در چند کلان شهر دیگر مانند شهر مشهد و اصفهان که درگیر با ازدحام ترافیک و دارای دوربین های نظارتی حداقلی باشند، اجرا می شوند.
- فاز سوم- پیاده سازی کامل: در این مرحله الگوی پیمایش در کل شهر (سهمیه پیمایش رایگان) به خودروهای شرکت کننده در طرح اختصاص می یابد و در صورت رصد پیمایش خودروهای فاقد ردیاب توسط دوربین ها هزینه پیمایش برآوردی برای آن ها محاسبه شده و در بدی خودرو منظور می شود. نحوه محاسبه این هزینه و برآورد میزان پیمایش باید به نحوی باشد که انگیزه شرکت در طرح را افزایش دهد.
- به موازات پیشبرد طرح، هزینه حضور در طرح ترافیک نیز به طوری که انگیزه مشارکت در طرح را برای خودروهای جدید ایجاد کند، افزایش می یابد. به موازات شبکه دوربین های نظارتی در شهر گسترش می یابد.

اجرای این مرحله از سال دوم خواهد بود و اجرای نیمه آزمایشی آن یک سال طول می کشد و از سال سوم اجرای کامل و سراسری طرح خواهد بود.

• فاز چهارم - : در این مرحله که از سال چهارم به اجرا درمی آید نحوه اختصاص سهمیه پیمایش از خودرو به افراد یا املاک پس از انجام مطالعات لازم تغییر می کند و تمامی خودروهای مشمول در طرح اعم از شخصی، نیمه عمومی و باری در سطح کلان شهرهای هدف طرح با تعرفه معینی در طرح حضور خواهند داشت و الگوی مطلوب پیمایش در مورد آن ها به اجرا درمی آید و مانند مرحله قبل ضرایب تنبیهی متفاوت و انگیزاننده ای در مورد خودروهای فاقد ردیاب اعمال می شود.

با تخصیص سهمیه پیمایش و شکل دهی به بازار معاملاتی سهمیه پیمایش، چند مکانیسم با هم فعال می شوند که در نتیجه آن، می توان نتایج زیر را انتظار داشت:

- کاهش هزینه حمل و نقل عمومی به دلیل امکان معامله سهمیه و در نتیجه افزایش جذابیت آن.
- افزایش ظرفیت حمل و نقل عمومی به دلیل سرمایه گذاری ناشی از صرفه جویی در مصرف سوخت
- افزایش کیفیت سفر حمل و نقل عمومی و در نتیجه افزایش جذابیت آن
- درآمدزا شدن سیستم حمل و نقل عمومی و توان توسعه و سرمایه گذاری آن از طریق درآمدهای کسب شده
- کاهش جذابیت سفر با حمل و نقل شخصی به دلیل افزایش هزینه های آن و در نتیجه کاهش تردد با آن.
- کاهش میزان کل تردهای در شهر (کاهش سرانه تردد) به دلیل حذف سفرهای غیر ضروری و یا ادغام سفرهای با مبدا- مقصد نزدیک (car pooling) به دلیل وجود هزینه سهمیه پیمایش / امکان کسب درآمد از فروش سهمیه پیمایش

آزادی انتخاب افراد برای انتخاب شیوه سفر (حمل و نقل شخصی یا عمومی) در عین اینکه مقررات محدودکننده جدیدی وضع نشده و یا قیمت بنزین (که تشدیدکننده تورم است) افزایش نیافته است.

۵- نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد های سیاستی

پژوهش حاضر با هدف تبیین پویایی های حاکم بر ترافیک شهری و ارزیابی کارایی سیاست های غیر قیمتی در کاهش ازدحام کلان شهر تهران انجام شد. در این راستا، از رویکرد پویایی شناسی سیستم ها به عنوان ابزاری برای مدل سازی روابط علّی، غیرخطی و مبتنی بر بازخورد میان متغیرهای اقتصادی، اجتماعی و رفتاری مؤثر بر ترافیک استفاده گردید. مدل توسعه یافته با در نظر گرفتن زیرسیستم هایی نظیر تعداد خودروهای شخصی، ظرفیت و جذابیت حمل و نقل عمومی، تقاضای سفر، شاخص ازدحام و قیمت پیمایش در چارچوب طرح هوشمندسازی، قادر بود رفتار پیچیده سیستم حمل و نقل شهری را در افق زمانی شبیه سازی کند.

نتایج شبیه سازی نشان داد که تداوم روند موجود، به افزایش مستمر تراکم، کاهش سرعت متوسط سفر، تشدید پیامدهای زیست محیطی و افزایش نارضایتی اجتماعی منجر خواهد شد. همچنین ارزیابی سیاست های

مرسوم نظیر افزایش قیمت سوخت، اعمال محدودیت‌های تردد یا توسعه یک جانبه زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی نشان داد که اگرچه این مداخلات ممکن است در کوتاه مدت اثرات مثبتی داشته باشند، اما در بلندمدت به دلیل وجود حلقه‌های بازخورد نامطلوب (ازجمله تقاضای القایی، افت جذابیت حمل‌ونقل عمومی در شرایط ازدحام، یا افزایش فشار اقتصادی بر خانوارها) از پایداری لازم برخوردار نیستند.

نوآوری اصلی این پژوهش، طراحی و ارزیابی مدل هوشمندسازی پیمایش خودروها مبتنی بر سازوکار بازار (Cap-and-Trade) است. در این چارچوب، برای هر خودرو سهمیه‌ای از پیمایش مجاز سالانه تخصیص داده می‌شود و امکان خریدوفروش این سهمیه‌ها در یک بازار قانون‌مند فراهم است. این سازوکار با ایجاد انگیزه اقتصادی برای کاهش سفرهای غیرضروری از طریق امکان فروش سهمیه مازاد موجب اصلاح تدریجی رفتار سفر شهروندان می‌شود، بدون آن که نیاز به اعمال اجبار یا محدودیت‌های سخت‌گیرانه وجود داشته باشد.

یافته‌های پژوهش همچنین نشان می‌دهد که ترکیب این سیاست بازارمحور با دو مداخله مکمل شامل (۱) بازاریابی اجتماعی به منظور ترویج تغییر رفتارهای سفر و (۲) گسترش خدمات الکترونیکی و دورکاری برای کاهش تقاضای فیزیکی سفر، بیشترین اثر هم‌افزا را در کنترل ازدحام ترافیکی ایجاد می‌کند. این بسته سیاستی ترکیبی، افزون بر کاهش معنادار شاخص تراکم، از منظر پذیرش اجتماعی نیز نسبت به سیاست‌های صرفاً قیمتی، مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که حتی در سناریوهای محافظه‌کارانه ازجمله فرض کسش قیمتی پایین تقاضای سفر یا تأخیر در اجرای طرح سیاست هوشمندسازی پیمایش همچنان در مقایسه با گزینه‌های جایگزین، کارایی بالاتری در کاهش ترافیک و کنترل آلاینده‌گی دارد. از منظر سیاست‌گذاری، این رویکرد نمونه‌ای از سیاست‌های ترکیبی چندابزاره (Multi-Instrument Policies) است که در آن ابزارهای اقتصادی، فناوریانه و اجتماعی به صورت هم‌زمان و مکمل به کار گرفته می‌شوند.

مانند هر مطالعه مبتنی بر پویایی‌شناسی سیستم‌ها، پژوهش حاضر نیز با محدودیت‌هایی همراه است. نخست، برخی داده‌های آماری کلیدی نظیر شاخص‌های دقیق زمان سفر، الگوهای واقعی مالکیت خودرو و نرخ فرسودگی ناوگان به صورت رسمی و منظم منتشر نمی‌شوند؛ ازاین‌رو بخشی از پارامترهای مدل ناگزیر بر اساس برآوردهای ثانویه یا تطبیق با مطالعات مشابه تعیین شده‌اند. دوم، واکنش‌های رفتاری شهروندان نسبت به سیاست‌های جدید (مانند خریدوفروش سهمیه پیمایش یا پذیرش اجتماعی طرح) ممکن است در طول زمان و تحت تأثیر عوامل فرهنگی و نهادی تغییر کند؛ این پویایی‌ها در مدل به صورت تقریبی لحاظ شده‌اند. درنهایت، تحقق عملی سیاست پیشنهادی مستلزم هم‌افزایی نهادی میان بازیگران متعددی ازجمله شهرداری، وزارت کشور، پلیس راهور، شرکت‌های بیمه و ارائه‌دهندگان خدمات بانکی و ارتباطی است تا زیرساخت‌های لازم برای رهگیری، تبادل و مدیریت داده‌ها فراهم شود.

بر اساس یافته‌های این مطالعه، مسیرهای زیر برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

اعتبارسنجی تجربی مدل: انجام مطالعات میدانی برای برآورد دقیق تر پارامترهایی مانند کشش تقاضای سفر نسبت به قیمت پیمایش و سنجش واقعی واکنش رفتاری شهروندان به مشوق های اقتصادی و اجتماعی. توسعه فنی مدل پیاده سازی: بررسی ابعاد فنی سامانه هوشمند شامل رهگیری پیمایش، امنیت داده ها، حفظ حریم خصوصی کاربران و طراحی الگوریتم تخصیص عادلانه سهمیه بر مبنای ویژگی های خانوار به جای خودرو.

تحلیل آثار اجتماعی و توزیعی: ارزیابی پیامدهای اقتصادی و اجتماعی طرح برای دهک های مختلف درآمدی و طراحی مکانیسم های جبرانی برای گروه های آسیب پذیر.

بومی سازی در سایر کلان شهرها: شبیه سازی مدل برای شهرهایی با ساختار و الگوهای ترافیکی متفاوت نظیر مشهد، اصفهان و تبریز و مقایسه نتایج جهت ارائه سیاست های متناسب با شرایط محلی.

ادغام با سیاست های زیست محیطی: بررسی هم افزایی طرح هوشمندسازی پیمایش با نظام های تجارت کربن شهری یا مالیات های سبز در راستای کاهش هم زمان ازدحام و آلودگی.

هم راستا با این پیشنهادها، پژوهش های اخیر در حوزه مدل سازی پویایی شناسی سامانه های حمل و نقل نشان می دهد که ادغام تحلیل های رفتاری، ابزارهای فناورانه و سیاست گذاری عمومی برای پشتیبانی از تحرک پایدار در حال گسترش است. مدل های SD با امکان بررسی هم زمان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی، به سیاست گذاران اجازه می دهند اثرات بلندمدت مداخلات مختلف را در ساختارهای پیچیده شهری تحلیل کنند. همچنین چارچوب های ترکیبی SD-GIS، ظرفیت تحلیل اثر سیاست های شهری بر الگوهای سفر و انتخاب های رفتاری را تقویت کرده اند (Suryani et al., 2025).

درمجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که حل پایدار مسئله ترافیک شهری مستلزم ترکیب هوشمندانه ابزارهای اقتصادی، فناورانه و رفتاری است. طرح پیشنهادی «هوشمندسازی پیمایش خودروها» که بر سازوکارهای بازار و پشتیبانی بازاریابی اجتماعی استوار است، می تواند به عنوان جایگزینی پایدار، عادلانه و کم هزینه تر برای سیاست های سنتی کنترل ترافیک مورد توجه قرار گیرد. این رویکرد، علاوه بر پشتوانه نظری، از منظر اجرایی نیز ظرفیت آن را دارد که از سطح یک مدل شبیه سازی شده فراتر رفته و به نقشه راهی عملیاتی برای مدیریت هوشمند ترافیک شهری در ایران تبدیل شود.

منابع

منابع داخلی

اکبر، ک. و دیگران. (۱۴۰۰). بازاریابی اجتماعی: پیشبرد یک چارچوب برنامه ریزی جدید برای هدایت برنامه ها. نشریه مدیریت (RAUSP)، ۳(۵۶)، ۳۹۵-۳۷۷. (ترجمه و تطبیق با مفاهیم بومی).

پورسیدآقایی، م. و نبی‌زاده، م. (۱۴۰۳). مدل‌سازی ترافیک شهر تهران و بررسی راهکارهای بهبود پایدار آن با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها. پژوهشنامه حمل‌ونقل، ۲۱(۴).

فرتوک‌زاده، ح. ر. و رجبی‌نهوجی، م. (۱۳۹۱). مدل‌سازی پویای ترافیک کلان‌شهرها: تحلیلی بر چرخه توسعه معابر و تقاضای سفر. پژوهشنامه حمل‌ونقل، ۱۹(۳)، ۲۴۱-۲۵۸.

مجدزاده، ر. و همکاران. (۱۳۹۰). استفاده از الگوی بازاریابی اجتماعی برای کاهش رفتارهای خطرناک رانندگی در رانندگان تاکسی شهر تهران. مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی، ۹(۳)، ۱-۱۲.

ممدوحی، ا. ر.، فلاح‌زاده، م. و ملاحسینی، ا. (۱۳۹۹). شناسایی عوامل پنهان مؤثر بر پذیرش قیمت‌گذاری تراکم (نمونه موردی: طرح قیمت‌گذاری دوره مبنای تهران). پژوهشنامه حمل‌ونقل، ۱۷(۳)، ۱-۱۴.

نوروزیان ملکی، پگاه، ایزدبخش، حمیدرضا و غنیرطهرانی، نسیم. (۱۴۰۱). برآورد میزان تقاضای حمل‌ونقل پایدار شهری و تحلیل و بازبینی سیاست‌های حاکم بر آن از طریق سیستم‌های پویا بر اساس شبیه‌سازی مدل. پژوهشنامه حمل‌ونقل، دوره ۱۹ (شماره ۳)، صفحات ۴۵۱-۴۶۸.

منابع خارجی

- Anupriya, Bansal, P., & Graham, D. J. (2023). Congestion in cities: Can road capacity expansions provide a solution? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 174, 103738. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103738>
- Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A definition of systems thinking: A systems approach. *Procedia Computer Science*, 44, 669-678.
- Axsen, J., & Long, Z. (2025). Accepting and implementing transport pricing policies for climate: A review of evidence and research gaps. *Ecological Economics*, 238, 108395. (Online ahead of print).
- Harrison, G., Gühnemann, A., & Shepherd, S. (2025). In the loop: A systematic review of the application of system dynamics in transport policy. *Transportation Reviews*, (In Press/Accepted Manuscript - Analysing 447 papers).
- Heller, D., Johnen, C., & Schmitz, P. W. (2015). Congestion Pricing: A Mechanism Design Approach. Discussion Papers of Freie Universität Berlin, No. 2015/15.
- Kassirer, J. (2010). Changing Transportation Behaviours: A Social Marketing Planning Guide. Cullbridge Marketing and Communications / Transport Canada.
- Kassirer, J. (2014). Team Power Smart Sparks Increase in Low-Priority, Repetitive Behaviors. *Social Marketing Quarterly*, 20(3), 165-185.
- Kotler, P., & Zaltman, G. (1971). Social marketing: An approach to planned social change. *Journal of Marketing*, 35(3), 3-12.
- Li, X., et al. (2025). A System Dynamics-Based Simulation Study on Urban Traffic Congestion Mitigation and Emission Reduction Policies. *Sustainability*, 17(20), 9296. (Special Issue 2025). <https://doi.org/10.3390/su17209296>
- McGovern, E. (2005). Social marketing applications and transportation demand management: An information instrument for the 21st century. *Journal of Public Transportation*, 8(3), 89-108.
- Pokharel, R., Miller, E. J., & Chapple, K. (2025). Sustainability Assessment Framework for Urban Transportation Combining System Dynamics Modeling and GIS: A TOD and Parking Policy Approach. *Sustainability*, (Early Access Publication).
- Rajput, S., & Jain, M. (2023). System Dynamics Simulation Model to Reduce the Traffic Congestion of Metropolitan Cities of India. Proceedings of the 6th International Conference on Management Science and Systems (ICMSS 2022), Atlantis Press, 670-685.

- Stigen, K., et al. (2024). Induced demand and the myth of road building as a solution to congestion. *Transportation Research Procedia*, 72, 1145-1152.
- TANGENT Project Consortium (Esztergár-Kiss, D., et al). (2024). Enhanced Data Processing Techniques for Dynamic Management of Multimodal Traffic: Deliverable 3.1 - Travel Behaviour. European Commission - Horizon 2020 Research and Innovation Programme.
- Thøgersen, J. (2014). Social Marketing in Travel Demand Management. In *Handbook of Sustainable Travel* (pp. 161-182). Springer Netherlands.
- Suryani, E., Hendrawan, R. A., & Widodo, B. (2025). System Dynamics Models for Sustainable Transportation Systems: Integrating Economic, Environmental, and Social Dimensions. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 23(3), 1625-1643.
- WANG, J., LU, H., & PENG, H. (2008). System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), 83–89. [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(08\)60027-6](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(08)60027-6)