

مدل‌سازی پویای سیستم حمل‌ونقل شهری پایدار به منظور اصلاح و بهبود ترافیک

علی‌محمد احمدوند^۱، زینب محمدیانی^{۲*}، حدیثه خدادادی ابیازنی^۳

۱. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، موسسه آموزش عالی ایوانکی، سمنان، ایران
۲. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی ایوانکی، سمنان، ایران
۳. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی ایوانکی، سمنان، ایران

پذیرش: ۹۴/۰۵/۱۵

دریافت: ۹۳/۰۸/۰۶

چکیده

امروزه توسعه پایدار به یکی از نگرانی‌های مهم سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در سراسر دنیا تبدیل شده است. توسعه پایدار از سه بعد اصلی تشکیل شده است: محیط زیست، اقتصاد و اجتماع. حمل و نقل اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی بسیاری دارد و فاکتور مهمی در توسعه پایدار محسوب می‌شود. سیستم حمل‌ونقل شهری، سیستمی پیچیده با متغیرهای متعدد و چرخه‌های بازخوردی غیرخطی است. حمل‌ونقل را نمی‌توان یک متغیر مستقل محسوب کرد. هدف این مقاله ارائه مدلی پویا برای سیستم حمل‌ونقل شهری با توجه به مفهوم سیستم حمل‌ونقل شهری پایدار است، به طوری که با استفاده از این مدل، ماهیت پیچیده و پویای سیستم حمل‌ونقل شهری درک و تأثیر سیاست‌ها ارزیابی گردد. لذا، در مقاله حاضر سعی شده است با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مدلی جامع و یکپارچه برای سیستم حمل‌ونقل شهری تهران با توجه به مفهوم سیستم حمل‌ونقل شهری پایدار ارائه گردد و رفتار پویای سیستم ارزیابی شود. در ادامه با شبیه‌سازی مدل، سیاست‌هایی در جهت افزایش کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری و بهبود پارامترهای ترافیک شهری ارائه شده است. مدل با استفاده از نرم‌افزار ونسیم و داده‌های شهر تهران مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اجرای ترکیبی سیاست‌های ارائه‌شده تأثیر بسزایی در بهبود کارایی سیستم حمل‌ونقل و وضعیت پارامترهای ترافیکی شهر تهران دارد.

کلیدواژه‌ها: پویایی‌شناسی سیستم، ترافیک، حمل‌ونقل شهری، سیاست‌گذاری.



۱- مقدمه

امروزه توسعه پایدار به یکی از نگرانی‌های مهم سیاست گذاران و برنامه ریزان در سراسر دنیا تبدیل شده است. توسعه پایدار از سه بعد اصلی تشکیل شده است: محیط زیست، اقتصاد و اجتماع. حمل و نقل اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی بسیاری دارد و فاکتور مهمی در توسعه پایدار محسوب می‌شود [۱]. توسعه پایدار سیستم حمل و نقل شهری یکی از نکات کلیدی در صرفه جویی منابع، بهبود محیط زیست و جامعه مبتنی بر مردم است [۲]. برنامه ریزی برای رفع مشکل ترافیک با در نظر داشتن مفهوم توسعه پایدار تنها گزینه‌هایی را قابل قبول خواهد دانست که علاوه بر اثربخشی در حل مشکل ترافیک شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی شهر را بهبود دهد یا دست کم اثر منفی بر آن‌ها نداشته باشد [۳].

رشد شهرنشینی و افزایش جمعیت شهری، افزایش استفاده از خودروهای شخصی، گسترش معابر و .. علاوه بر مشکل تراکم ترافیک، افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، افزایش حوادث رانندگی، افزایش مصرف سوخت، اتلاف وقت شهروندان، استهلاک وسایل نقلیه، مشکلات بسیار دیگری را در پی داشته است. برای حل معضلات مذکور تا کنون راه‌حل‌های زیادی در نظر گرفته شده است، که به سبب آن‌ها بهبود ناچیزی حاصل شده است اما به هیچ وجه رضایت بخش نیست. سال‌هاست مدیران حمل و نقل شهرها در تلاش‌اند که سیستم پیچیده حمل و نقل را تحت کنترل خود درآورند و در جریان تغییرات متنوع این سیستم پویا باشند و پدیده‌هایی را که بر عملکرد سیستم حمل و نقل موثرند شناسایی و تأثیرات آن را بررسی کنند [۴]. برای حل مشکلات و خسارت‌های جبران‌ناپذیر ناشی از سیستم حمل و نقل شهری باید بتوان توأمان شاخص‌های حمل و نقلی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را مد نظر قرار داد. برای حل این مشکلات نمی‌توان در انزوا به هر یک از این شاخص‌ها پرداخت. هر اقدامی که در نظر گرفته می‌شود باید با توجه به پیامدهای آن به کل سیستم، ارزیابی شود. هدف اصلی از انجام این پژوهش، ساخت یک مدل پویا برای درک پویایی‌های سیستم حمل و نقل شهر تهران با توجه به مفهوم حمل و نقل شهری پایدار است.

۲- پیشینه پژوهش

۲-۱- سیستم حمل و نقل پایدار و حوزه‌های اصلی اثرگذار بر سیستم حمل‌ونقل

سیستم حمل و نقل پایدار به معنی برآورده کردن نیاز دسترسی افراد و گروه‌های مختلف به صورت‌ای من و به شیوه‌ای سازگار با سلامت انسان و اکوسیستم، ارائه بهینه و مقرون به‌صرفه انواع مدهای حمل و نقلی و حمایت از رونق اقتصادی، محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای و به حداقل رساندن مصرف منابع غیر قابل تجدید، بهره برداری از اراضی و ایجاد آلودگی صوتی به منظور رسیدن به سطح پایدار است [۵]. سیستم حمل‌ونقل، کاربری زمین، توسعه اقتصادی و محیط‌زیست به یکدیگر وابسته هستند [۶، ص ۱۳۰].

سیستم حمل‌ونقل یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر اقتصاد است. سلامت اجتماعی و اقتصادی یک منطقه شهری تا حد زیادی بر عملکرد سیستم حمل‌ونقل آن وابسته است [۷]. سیستم حمل‌ونقل نه تنها تسهیلاتی برای جابه‌جایی و تحرک ارائه می‌دهد، بلکه در درازمدت بر الگوهای رشد و سطح فعالیت اقتصادی یک منطقه، از طریق دسترسی به مناطق مختلف تأثیر می‌گذارد [۸]. حمل‌ونقل همچنان که در فرایند رشد و توسعه اقتصادی تأثیرگذار است، خود نیز از فرایند رشد و توسعه اقتصادی تأثیر می‌پذیرد [۹]. توسعه اقتصادی با افزایش تقاضا برای حمل‌ونقل، به خصوص افزایش تعداد وسایل نقلیه همراه است. با افزایش توسعه اقتصادی درآمد سرانه افراد رشد می‌کند و سرانه سفر با خودرو شخصی افزایش می‌یابد. درآمد مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در مالکیت اتومبیل شخصی می‌باشد [۱۰، ۱۱]. حمل‌ونقل نقش عمده‌ای در آلودگی محیط‌زیست شهری دارد و درصد قابل‌توجهی از آلودگی هوا در شهرها به دلیل سوختن بنزین در خودروها است [۱۲، ص ۱۱۵]. بر اساس گزارش بانک جهانی میزان خسارت سالانه آلودگی هوا در کشور ۴۲۰ میلیارد ریال است که این رقم معادل ۱.۶ درصد تولید ناخالص داخلی است [۱۳]. کاربری زمین و حمل‌ونقل ارتباط دو سویه دارند [۱۴]. تغییرات سیستم حمل‌ونقل و کاربری زمین در سیستمی بسیار پویا رخ می‌دهد که شامل نیروهای بسیاری از جمله توسعه اقتصادی، رشد جمعیت و تصمیم‌گیری‌های سیاست است [۱۵]. اثرات نامطلوب ناشی از سیستم حمل‌ونقل تهدیدی مهم برای اجتماع است که به اشکالی همچون: مرگ‌ومیر، تصادفات، آلودگی هوا، آلودگی صوتی، استرس مشاهده می‌گردد [۶، ص ۴۹]. عوامل اجتماعی ضروری برای یک حمل‌ونقل پایدار شامل عدالت اجتماعی، بهداشت عمومی، ایمنی، امنیت و دسترسی‌پذیری خدمات



مختلف است [۱۶]. خسارت‌های مستقیم ناشی از این صدمات بین ۱ تا ۲ درصد کل تولید ناخالص ملی در سطح جهان است که در کشور ما به حدود ۷ درصد می‌رسد [۱۲، ص ۸۱].

۲-۲- تجارب کاربرد رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها در سیستم حمل‌ونقل شهری
ژانگ و ژانگ (۲۰۱۱) در مطالعه‌ی خود به بررسی اثر ساخت مترو بر ترافیک شهری پرداخته‌اند. سه اقدام متقابل اجرایی برای حذف بازخورد منفی و تقویت نقش موثر سیاست ساخت مترو در این مقاله ارائه شده است که عبارت‌اند از: تقویت ارتباط بین مترو و دیگر مدهای سفر، توسعه منابع مترو به صورت ترکیبی، توسعه مدیریت درآمد مترو [۱۷]. همان و هایاشی (۲۰۰۸) مدلی با رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها برای ارزیابی سیاست و تحلیل سناریوهای کاهش انتشار دی اکسید کربن ارائه داده‌اند. تحلیل حساسیت نشان داده است که تسریع در توسعه شبکه حمل‌ونقل ریلی همراه با کاهش گسترش شبکه بزرگراهی و اعمال مالیات بر سوخت سیاست‌هایی مفید و کارا برای کاهش انتشار دی اکسید کربن می‌باشند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در صورت اعمال سناریوهای مذکور ۲۶٪ تا ۳۲٪ انتشار دی اکسید کربن در مقایسه با اینکه هیچ‌گونه سیاستی اعمال نشود، کاهش می‌یابد [۱۸]. در حوزه مدل‌سازی حمل‌ونقل شهری با رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها، مطالعات اندکی مفهوم سیستم حمل‌ونقل پایدار شهری در مدل‌سازی را در نظر گرفته‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

وانگ، لو و پنگ (۲۰۰۸) مدلی با رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها بر اساس تحلیل علت و معلولی و ساختار حلقه بازخوردی ارائه می‌دهند. پیشنهادات ارائه شده در رابطه با سیاست تعداد وسایل نقلیه شخصی شامل سه جنبه می‌باشد: محدودیت مالکیت و استفاده از خودرو شخصی، محدودیت وسایل نقلیه شخصی و به طور همزمان بهبود سطح خدمات حمل‌ونقل عمومی، محدودیت وسایل نقلیه شخصی و به طور همزمان تاکید بر تحقیق و توسعه تکنولوژی‌های کاهش انتشار دی اکسید کربن [۲].

ایگلمز و تاتاری (۲۰۱۲) توسعه پایدار سیستم بزرگراهی آمریکا را بررسی کرده‌اند. کارایی سوخت، حمل‌ونقل عمومی، استفاده از وسایل نقلیه الکترونیکی: سه استراتژی بالقوه هستند که به منظور سیاست‌گذاری مورد آزمون قرار گرفته شده‌اند. نتایج مقاله نشان می‌دهد که اجرای

ترکیبی سیاست‌های منفرد اثر بسیار مهمی بر موفقیت سیاست‌گذاری دارد [۱۹]. از میان مدل‌های ارائه شده در این حوزه، تنها مدل وانگ و همکاران (۲۰۰۸) است که مفهوم سیستم حمل‌ونقل پایدار شهری را که شامل ۴ بخش: پایداری اقتصادی، پایداری زیست‌محیطی، پایداری اجتماعی و پایداری حمل‌ونقلی است، در نظر گرفته است. این مدل تنها سفر با خودرو شخصی را بررسی کرده است. مدل ارائه شده در این مقاله، در سیستم حمل‌ونقل پایدار شهری علاوه بر سفر با خودرو شخصی، سفر با دیگر مدهای حمل و نقل را نیز در نظر گرفته است.

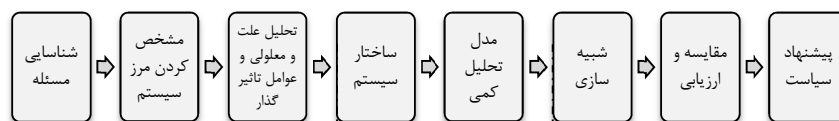
۲-۳- پویایی شناسی سیستم

پویایی شناسی سیستم‌ها به دلایل زیر برای مطالعه ساختار سیستم حمل‌ونقل مناسب است:

۱. هدف روش پویایی شناسی سیستم‌ها مطالعه پیچیدگی‌های سیستم‌های اجتماعی، اقتصادی و سیستم‌های زیست‌محیطی است. سیستم حمل‌ونقل شهری، سیستمی پویا با عوامل پیچیده است که روش پویایی شناسی سیستم‌ها برای مطالعه آن بسیار آسان است.
۲. روش پویایی شناسی سیستم‌ها می‌تواند به منظور مطالعه فرایند توسعه پویای سیستم با توجه به عوامل درون‌زا استفاده شود. بنابراین می‌توان از آن برای شبیه‌سازی پویای سیستم و مطالعه روند آن به منظور مطالعه فرایند توسعه بلندمدت سیستم حمل‌ونقل شهری استفاده کرد.
۳. فرایند مدل‌سازی پویایی شناسی سیستم با تمرکز بر ساختار درونی سیستم می‌باشد. با استفاده از روابط علت و معلولی بین متغیرهای مختلف و داده‌های محدود می‌تواند برخی از پیش‌بینی‌های مربوط را انجام دهد. این روش برای مطالعه سیستم حمل‌ونقل درون‌شهری با داده‌های آماری محدود مناسب است.
۴. پویایی شناسی سیستم‌ها به عنوان آزمایشگاه سیاست شناخته شده است که می‌تواند به منظور تحلیل اثرات مختلف سیاست‌ها بر روی سیستم و همچنین برای شبیه‌سازی اثرات سیاست‌های مختلف از طریق متغیرهای سیاست و پارامترهای مرتبط استفاده شود. بنابراین می‌توان از این روش به منظور بررسی اثرات سیاست‌های حمل‌ونقلی در تکامل ساختار سیستم حمل‌ونقل شهری استفاده کرد [۲۰]. نمودار ساخت یک مدل با استفاده از رویکرد



پویایی شناسی سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است [۲].



شکل ۱ نمودار ساخت یک مدل با استفاده از رویکرد پویایی شناسی سیستم [۲]

۳- روش شناسی پژوهش

با توجه به اینکه در این پژوهش از رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها استفاده شده است، همان طور که در شکل ۱ در قسمت قبل اشاره شد، در ابتدا مسئله و رفتار مرجع بیان شده است. سپس متغیرهای کلیدی مسئله مشخص شده است. در مرحله بعد، چگونگی ارتباط بین متغیرها در قالب نمودار علی معلولی مربوط تهیه شده است. در ادامه، نمودار جریان بر مبنای نمودار علی معلولی توسعه یافته است. سپس با شبیه‌سازی مدل با استفاده از نرم‌افزار ونسیم و اعتبارسنجی مدل، سناریوهای گوناگون تجزیه و تحلیل شده است.

۴- بیان مسئله و رفتار مرجع

سیستم حمل‌ونقل، کاربری زمین، توسعه اقتصادی و محیط‌زیست به یکدیگر وابسته هستند. سیاست‌های حمل‌ونقلی نیازمند استنتاج بر اساس ملاحظات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد. نبود یک سیستم حمل‌ونقل شهری موثر مانع رشد اقتصادی شهرها شده است و مشکلات متعددی نظیر آلودگی هوا، افزایش حوادث رانندگی، افزایش مصرف سوخت، اتلاف وقت شهروندان، استهلاک وسایل نقلیه و غیره را در پی داشته است. افزایش وسایل نقلیه شخصی موجب افزایش ترافیک در خیابان‌های اصلی و کاهش سرعت سفر، افزایش ازدحام، توقفات طولانی در تقاطع‌ها و آلودگی غیرقابل تحمل گردیده است [۶، صص ۲۹-۳۱]. در شهر تهران نیز اثرات نامطلوب ناشی از افزایش بیش از حد جمعیت، افزایش وسایل نقلیه شخصی، نبود سیستم حمل‌ونقل عمومی کارآمد و .. مشکلات متعددی از جمله تراکم ترافیک، آلودگی هوا، کاهش سرعت سفر و اتلاف وقت شهروندان را سبب شده است و خسارت‌های اقتصادی بسیاری را ایجاد کرده است. اکثر مسائل حمل‌ونقل شهری پیچیده و راهکارهای پیشنهادی آن در اجرا پرهزینه و زمان

بر است، از آنجایی که متدولوژی پویایی شناسی سیستم‌ها امکان‌ایجاد یک محیط یادگیری را فراهم ساخته و همچنین ارزیابی سناریوهای مختلف را امکان‌پذیر می‌نماید. لذا در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از مفاهیم موجود در ادبیات، مدلی جامع و یکپارچه برای سیستم حمل‌ونقل شهری با توجه به مفهوم حمل‌ونقل شهری پایدار بر اساس تحلیل علت و معلولی و ساختار حلقه بازخوردی ارائه شود و رفتار پویای آن بررسی گردد تا بتوان با شبیه‌سازی مدل، به ارزیابی و ارائه سیاست‌هایی در جهت بهبود پارامترهای ترافیک شهری پرداخت. مفهوم ترافیک تا حد زیادی قابل اندازه‌گیری نیست، مگر اینکه اثرات آن را اندازه‌گیری کنیم. مهمترین متغیرها برای بیان مفهوم ترافیک به صورت کمی، زمان سفر و میانگین سرعت خودرو است. افزایش ترافیک موجب افزایش زمان سفر و کاهش میانگین سرعت خودرو می‌شود. از آنجایی که زمان سفر تحت تاثیر مسافت سفر نیز است، گزینه مناسبی برای اندازه‌گیری میزان ترافیک نمی‌باشد. به نظر می‌رسد متغیر میانگین سرعت خودرو گزینه مناسبی برای کمی سازی مفهوم ترافیک است [۲۱]. لذا، از متغیر متوسط سرعت خودرو شخصی به عنوان متغیر اصلی مسئله برای بیان مفهوم ترافیک به صورت کمی استفاده شده است. جدول ۱ میانگین سرعت سفر روزانه درون‌شهری تهران را نشان می‌دهد.

جدول ۱ متوسط سرعت خودرو شخصی [۲۷]

سال	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶
مقدار اندازه‌گیری شده (کیلومتر بر ساعت)	۲۶/۲	۲۴/۸	۲۲/۱	۲۱/۵

۵- شناسایی متغیرهای سیستم حمل‌ونقل شهری

با توجه به مقالات بررسی‌شده در این حوزه، مجموعه متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر مدل سیستم حمل‌ونقل شهری ارائه‌شده در این پژوهش، در جدول ۲ بیان گردیده شده است.

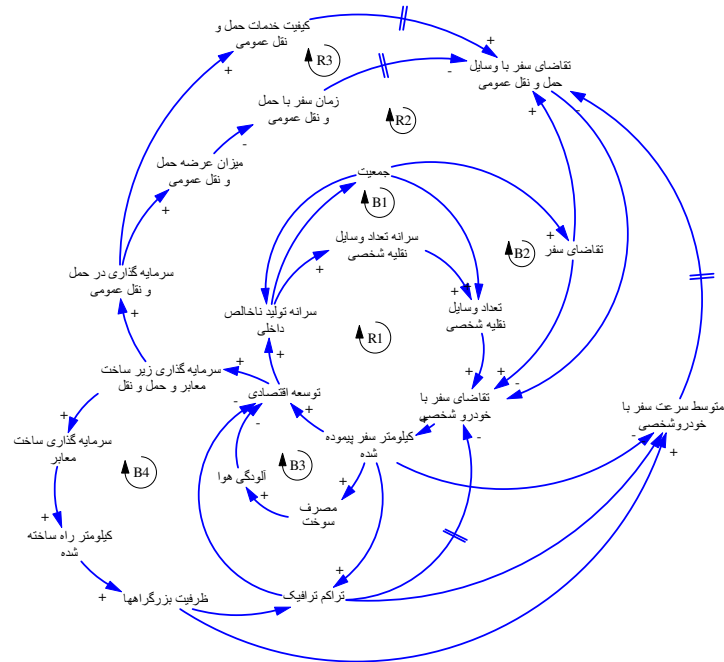


جدول ۲ مجموعه متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر مدل سیستم حمل و نقل شهری ارائه شده در پژوهش

متغیرهای سیستم	منابع
سرانه تولید ناخالص داخلی	[۲]، [۱۹]
تعداد وسایل نقلیه شخصی	[۲]، [۱۹]، [۲۲]، [۲۳]
تقاضای سفر با خودرو شخصی	[۲]، [۲۸]، [۲۳]
تراکم ترافیک	[۲]، [۱۹]، [۱۷]، [۲۲]
جمعیت	[۲]، [۱۹]، [۱۷]، [۲۲]، [۲۳]
سرعت سفر با خودرو شخصی	[۲۱]، [۱۷]، [۲۳]
آلودگی هوا	[۲]، [۱۷]، [۱۸]، [۲۸]، [۱۹]، [۲۲]
کیفیت حمل و نقل عمومی	[۲۱]
تقاضای سفر با وسایل حمل و نقل عمومی	[۲۱]، [۲۲]
زمان سفر با حمل و نقل عمومی	[۲۱]، [۲۳]

۶- نمودار علی معلولی

حلقه‌های علی معلولی بر اساس ارتباط علی معلولی میان متغیرها مشخص شده است. مدل علی معلولی بر اساس مشاهدات صورت گرفته روی رفتار سیستم و نیز با الهام از مدل‌های ارائه شده در این حوزه شکل گرفته است. نمودار علی معلولی موجود در کل سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ نمودار علی معلولی مدل پیشنهادی سیستم حمل و نقل شهری

مهم‌ترین حلقه‌های علی معلولی مدل پیشنهادی در این بخش توضیح داده شده است. توسعه اقتصادی \rightarrow سرانه تولید ناخالص داخلی \rightarrow سرانه تعداد وسایل نقلیه شخصی \rightarrow تعداد وسایل نقلیه شخصی \rightarrow تقاضای سفر با خودرو شخصی \rightarrow کیلومتر سفر پیموده شده \rightarrow توسعه اقتصادی (R₁)

حلقه‌ی فزاینده R₁ مربوط به تأثیر افزایش سرانه تولید ناخالص داخلی شهر تهران است. مکانیزم آن به این صورت است که هر قدر توسعه اقتصادی شهر بیشتر شود، سرانه تولید ناخالص داخلی افزایش می‌یابد (شاخص تولید ناخالص داخلی شهر به عنوان معیار توسعه اقتصادی در نظر گرفته شده است). با افزایش سرانه تولید ناخالص داخلی سرانه تعداد وسایل نقلیه شخصی نیز افزایش می‌یابد و منجر به افزایش تعداد وسایل نقلیه شخصی در سطح معابر



شهر می شود. تقاضای سفر با خودرو شخصی افزایش می یابد و سبب افزایش کیلومتر سفر پیموده شده در شهر می شود که نشان دهنده بالا رفتن فعالیت های اقتصادی و اجتماعی در شهر می باشد و منجر به توسعه اقتصادی بیشتر شهر می گردد.

توسعه اقتصادی \leftarrow سرانه تولید ناخالص داخلی \leftarrow جمعیت \leftarrow تعداد وسایل نقلیه شخصی \leftarrow تقاضای سفر با خودرو شخصی \leftarrow کیلومتر سفر پیموده شده \leftarrow تراکم ترافیک \leftarrow توسعه اقتصادی (B₁)

این حلقه تعادلی نشان دهنده تمرکز بالای جمعیت در شهر تهران است. شهر تهران به دلیل موقعیت ویژه سیاسی و اجتماعی، تمرکز امکانات تولیدی و فرصت های شغلی در خود، در بسیاری از سال ها بالاترین سهم تولید ناخالص داخلی را از کل تولید ناخالص داخلی کشور دارا بوده است. افزایش سرانه تولید ناخالص داخلی تهران نسبت به سایر شهرهای کشور، موجب جذابیت بیشتر این شهر نسبت به سایر شهرهای کشور شده و سبب شده است که بیشترین نرخ مهاجرت و تمرکز بالای جمعیت را دارا باشد. این افزایش جمعیت همراه با افزایش سرانه مالکیت خودرو شخصی منجر به افزایش تعداد وسایل نقلیه شخصی در سطح معابر شهر می شود. با افزایش تعداد وسایل نقلیه شخصی تقاضای سفر با خودرو شخصی افزایش می یابد. به دلیل افزایش بیش از حد سفر با خودرو شخصی و افزایش کیلومتر سفر طی شده، تراکم ترافیک افزایش می یابد. این تراکم ترافیک سبب کاهش فرصت های اقتصادی و اجتماعی، اتلاف وقت شهروندان، هدر رفتن منابع، کاهش تحرک و جابه جایی افراد و دستیابی به بازارها و منابع و در نتیجه کاهش توسعه اقتصادی می شود.

توسعه اقتصادی \leftarrow سرانه تولید ناخالص داخلی \leftarrow جمعیت \leftarrow تقاضای سفر \leftarrow تقاضای سفر با خودرو شخصی \leftarrow کیلومتر سفر پیموده شده \leftarrow تراکم ترافیک \leftarrow توسعه اقتصادی (B₂)

افزایش تقاضای سفر در شهر تهران ریشه در افزایش جمعیت این شهر دارد. با افزایش توسعه اقتصادی و به تبع آن افزایش جمعیت، تقاضای سفر در شهر افزایش می یابد. افزایش تقاضای سفر موجب می شود که از کل سفرهای درون شهری، سهم تقاضای سفر با خودرو شخصی افزایش یابد. افزایش تقاضای سفر با خودرو شخصی فراتر از ظرفیت معابر موجود، موجب افزایش تراکم ترافیک و کاهش توسعه اقتصادی می شود.

توسعه اقتصادی ← سرانه تولید ناخالص داخلی ← جمعیت ← تقاضای سفر ← تقاضای سفر با خودرو شخصی ← کیلومتر سفر پیموده شده ← مصرف سوخت ← آلودگی هوا ← توسعه اقتصادی (B₃)

این حلقه نشان می‌دهد که افزایش تقاضای سفر با خودروی شخصی و به تبع آن افزایش کیلومتر سفر طی شده موجب مصرف بیش از حد سوخت شده و سبب آلودگی بیش از حد هوای شهر تهران می‌شود. آلودگی هوا سالانه خسارت‌های زیادی را به شهر تحمیل می‌کند و سبب کاهش توسعه اقتصادی می‌شود.

توسعه اقتصادی ← سرمایه‌گذاری زیرساخت معابر و حمل‌ونقل ← سرمایه‌گذاری ساخت معابر ← کیلومتر راه ساخته شده ← ظرفیت بزرگراه‌ها ← تراکم ترافیک ← تقاضای سفر با خودرو شخصی ← کیلومتر سفر پیموده شده ← تراکم ترافیک ← توسعه اقتصادی (B₄)

این حلقه مربوط به سهم سرمایه‌گذاری در توسعه حمل‌ونقل و معابر از افزایش توسعه اقتصادی شهر می‌باشد. با افزایش سهم سرمایه‌گذاری ساخت معابر، کیلومتر راه ساخته شده افزایش می‌یابد و به ظرفیت بزرگراه‌ها اضافه می‌گردد و در کوتاه مدت سبب کاهش تراکم ترافیک و کاهش زمان سفر با خودرو شخصی می‌شود. با تأخیری (در طول زمان) شهروندان درک می‌کنند که می‌توانند سفرهای خود را سریع‌تر از پیش انجام دهند، لذا تقاضای سفر با خودروی شخصی افزایش می‌یابد، اما این امر در درازمدت موجب افزایش تراکم ترافیک و کاهش توسعه اقتصادی می‌گردد (واکنش به ساخت بزرگراه).

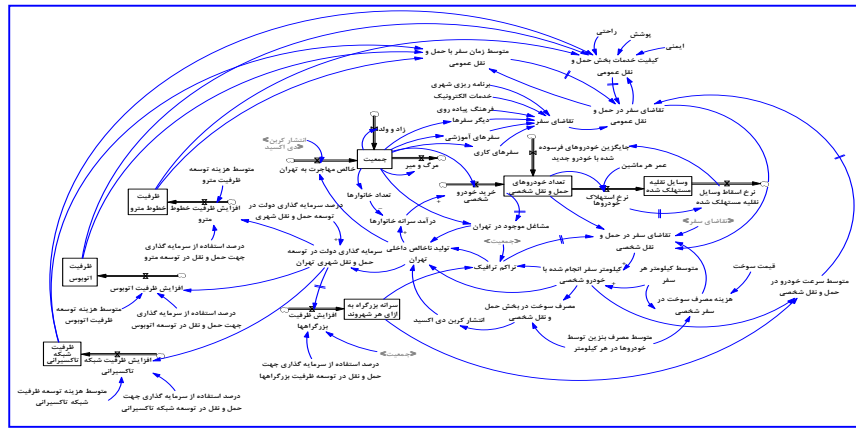
توسعه اقتصادی ← سرمایه‌گذاری زیرساخت معابر و حمل‌ونقل ← سرمایه‌گذاری در حمل‌ونقل عمومی ← میزان عرضه حمل‌ونقل عمومی ← زمان سفر با حمل‌ونقل عمومی ← تقاضای سفر با حمل‌ونقل عمومی ← تقاضای سفر با خودرو شخصی ← کیلومتر سفر پیموده شده ← تراکم ترافیک ← توسعه اقتصادی (R₂) توسعه اقتصادی ← سرمایه‌گذاری زیرساخت معابر و حمل‌ونقل ← سرمایه‌گذاری در حمل‌ونقل عمومی ← کیفیت خدمات حمل‌ونقل عمومی ← تقاضای سفر با حمل‌ونقل عمومی ← تقاضای سفر با خودرو شخصی ← کیلومتر سفر پیموده شده ← تراکم ترافیک ← توسعه اقتصادی (R₃)

در حلقه‌های R₂ و R₃ با افزایش سهم سرمایه‌گذاری در توسعه حمل‌ونقل و معابر از افزایش توسعه اقتصادی، سهم سرمایه‌گذاری حمل‌ونقل عمومی نیز افزایش می‌یابد. افزایش

سهام سرمایه‌گذاری حمل‌ونقل عمومی با تاخیری منجر به افزایش میزان عرضه حمل‌ونقل عمومی، تعداد خطوط مترو و مسیر ویژه اتوبوس و همچنین افزایش کیفیت حمل‌ونقل عمومی از جمله دسترسی بهتر به سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، راحتی و ایمنی بیشتر می‌شود. کاهش زمان سفر با حمل‌ونقل عمومی به همراه افزایش کیفیت حمل‌ونقل عمومی موجب افزایش تقاضای سفر با حمل‌ونقل عمومی می‌گردد، لذا از حجم سفر با خودرو شخصی کاسته شده و به تبع آن کیلومتر سفر طی شده با خودرو شخصی کاهش می‌یابد. بهبود تراکم ترافیک از خسارت‌های وارده به شهر کاسته و همچنین سبب افزایش توسعه اقتصادی شهر می‌گردد.

۷- نمودار جریان

هدف اصلی نمودار جریان، بازنمایی ساختار جریان دقیق سیستم در قالب ساختار سیاست‌های ظرفیت و جزئی آن به منظور تسهیل‌ای‌جاد مدل ریاضی برای شبیه‌سازی است. نمودار جریان در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ نمودار جریان سیستم پیشنهادی

۸- اعتبارسنجی مدل

یکی از مراحل مهم مدل‌سازی، اعتبارسنجی مدل می‌باشد. اعتبارسنجی مدل‌های پویایی‌های سیستم، اساساً فرآیندی برای ایجاد اطمینان نسبت به درستی و سودمندی مدل به عنوان یک ابزار سیاست‌گذاری است [۲۴، ص ۲۹۴].

۸-۱- بازسازی رفتار مرجع

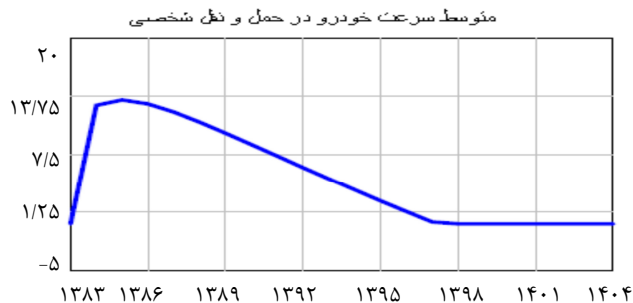
متغیر متوسط سرعت خودروی شخصی که به عنوان متغیر اصلی مسئله انتخاب شده است. با توجه به اینکه داده‌های متغیر متوسط سرعت خودروی شخصی در شهر تهران از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ در دسترس است برای سنجش اعتبار رفتاری مدل، نتایج شبیه‌سازی تا سال ۱۳۸۶ با داده واقعی مقایسه شده است، که رفتاری مشابه پیش‌بینی ما را نمایش می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۳ خطای بازسازی رفتار مرجع مدل پیشنهادی

سال	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶
مقدار اندازه‌گیری شده (کیلومتر بر ساعت)	۲۶/۲	۲۴/۸	۲۳/۱	۲۱/۵
پیش‌بینی مدل (کیلومتر بر ساعت)	۲۶/۵۱۶۶	۲۴/۰۱۴	۲۳/۰۴۸۹	۲۲/۶۹۵
خطا (درصد)	۱/۲	۳/۱۶	۰/۲۲	۵/۵۵

۸-۲- شبیه‌سازی رفتار حدی (آزمون شرایط حدی)

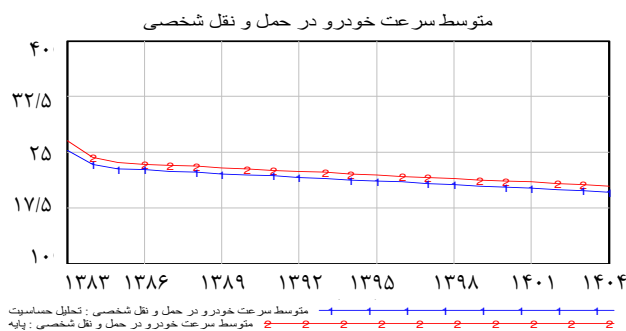
شرایط حدی، شرایطی که ممکن است هرگز در دنیای واقعی مشاهده نشود. این آزمون نشان می‌دهد که آیا سیستم رفتار قابل انتظاری در برابر شرایط حدی از خود نشان می‌دهد یا خیر؟ اگر به ازای هر شهروند ساکن تهران یک خودرو وجود داشته باشد، انتظار داریم به دلیل افزایش بیش از حد تراکم ترافیک تهران، سرعت سفر با حمل‌ونقل شخصی به صفر میل کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این شرایط نیز گویای همین انتظار است (شکل ۴).



شکل ۴ نتیجه حاصل از آزمون شرایط حدی

۳-۸- آزمون حساسیت (آنالیز حساسیت)

بر اساس این آزمون تغییرات کوچک و قابل پیش‌بینی در پارامترهای مدل در حالت عادی نباید تغییرات شدید و غیرقابل پیش‌بینی در رفتار مدل ایجاد کند. برای مثال، چنانچه مقدار اولیه تعداد خودرو شخصی ۱۰٪ افزایش یابد انتظار داریم به افزایش تعداد خودرو شخصی، متوسط سرعت خودرو در حمل و نقل شخصی اندکی کاهش یابد که پس از شبیه‌سازی خروجی مدل این انتظار را تأیید می‌کند (شکل ۵).

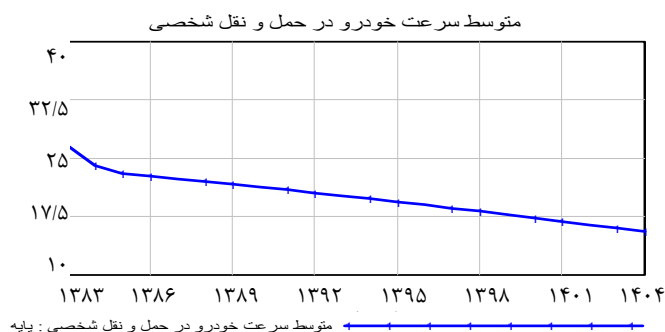


شکل ۵ نتیجه حاصل از آنالیز حساسیت

۹- یافته‌های پژوهش

۹-۱- ادامه وضع موجود

ادامه وضعیت موجود بدین معنا که هیچ تغییری در وضع موجود شهر تهران ایجاد نشود و همین روند به صورت کنونی ادامه یابد (شکل ۶).



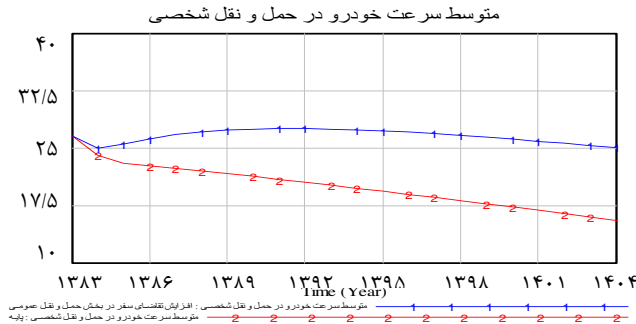
شکل ۶ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریوی اول: ادامه وضع موجود

۹-۲- افزایش تقاضای سفر در بخش حمل‌ونقل عمومی

گسترش حمل‌ونقل عمومی با کارایی بالا و سرویس‌دهی مناسب و با در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی، نه تنها از ترافیک شهر می‌کاهد بلکه نقش اساسی در توسعه پایدار و بهبود محیط شهری خواهد داشت. کاهش کارایی سیستم حمل‌ونقل عمومی، سبب گسترش مالکیت و تمایل استفاده از وسایل نقلیه شخصی و تمرکز آن‌ها در سطح شبکه معابر شهری می‌گردد. افزایش استفاده از حمل‌ونقل عمومی همراه با کاهش استفاده از خودروی شخصی می‌تواند تراکم ترافیک و از همه مهم‌تر، انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش دهد [۲۵]. انواع سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی در کنار یکدیگر، باید شرایطی از قبیل ایمنی و راحتی را برای جابجایی مسافران فراهم آورند [۲۶]. سیاست در نظر گرفته شده در این بخش، افزایش تقاضای سفر در بخش حمل‌ونقل عمومی از طریق کاهش متوسط زمان سفر با حمل‌ونقل عمومی به همراه افزایش کیفیت خدمات بخش حمل‌ونقل عمومی از جمله ایمنی و راحتی سفر با حمل‌ونقل عمومی و همچنین پوشش مسیرهای سفر می‌باشد. نتیجه حاصل از شبیه‌سازی این سناریو در



شکل ۷ مشاهده می‌شود.

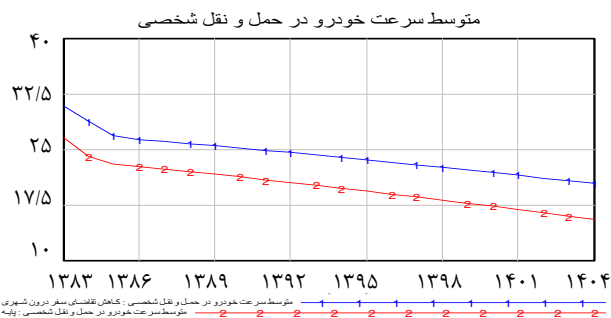


شکل ۷ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریوی دوم: افزایش تقاضای سفر در بخش حمل و نقل عمومی

۹-۳- کاهش تقاضای سفرهای درون‌شهری

سفرهای درون‌شهری به علت فعالیت‌های مختلف روزانه مردم صورت می‌پذیرد. افزایش و یا کاهش میزان نیاز به سفرهای درون‌شهری تأثیر مستقیمی روی تعداد سفرهای درون‌شهری دارد [۱۲، ص ۳]. ریشه‌یابی و تعیین زائد بودن یا نبودن این سفرها کار وسیعی می‌باشد ولی به هر حال هر چه که بتواند نیاز را به طور مستقیم و یا غیرمستقیم از طریق پیاده کردن روش‌هایی مانند اطلاع‌رسانی به کمک سرویس‌های مخابراتی، اینترنت و یا ایجاد سیستم‌های کارآمدتر در ادارات و غیره بر طرف کند، از حجم سفرها کاسته و سرعت انجام امور را نیز افزایش می‌دهد. مهم‌ترین مسئله در مورد سفرهای شهری، این است که بتوان سفر را به عنوان یک هدف از ذهن‌ها خارج ساخت و این معنی را در اذهان جا انداخت که سفر تنها یک وسیله جهت انجام کاری در مقصد است و در صورتی که بتوان آن را با وسیله‌ای بهتر، ارزان‌تر و آسان‌تر جایگزین ساخت طبعاً بهتر خواهد بود. سفرهای درون‌شهری از جمله عوامل اصلی بروز آلودگی هوا در کلان‌شهرها می‌باشند، بنابراین، اگر استراتژی‌هایی در پیش‌گرفته شود که به واسطه آن‌ها از میزان رفت و آمد وسایل نقلیه درون‌شهری کاسته شود، متعاقباً از میزان ترافیک و آلودگی هوا نیز کاسته خواهد شد [۱۳]. لذا، ارائه خدمات الکترونیک به عنوان یکی از راه‌کارهای مناسب جهت کاهش رفت و آمدهای درون‌شهری شناخته شده است که به سبب آن

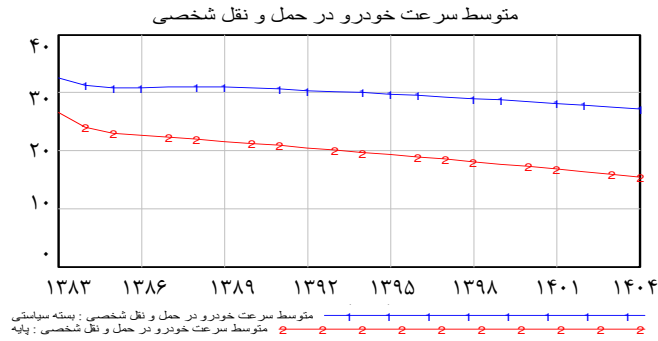
تراکم ترافیک کاهش و سرعت سفر با خودرو شخصی افزایش می‌یابد. همچنین از مصرف سوخت و به تبع آن از آلودگی هوا کاسته می‌شود. یکی دیگر از روش‌های کاهش سفر، بهبود طراحی شهری است. هم‌افزایی بین کاربری زمین و سیستم حمل‌ونقل، به طوری که نیاز به تبدیل و حفظ انرژی، زمان و منابع کمتری احساس شود، از اهمیت بسیاری برخوردار است [۷۱-۷۰]. سیاست در نظر گرفته‌شده در این بخش، کاهش تقاضای سفر درون‌شهری از طریق بهبود برنامه‌ریزی شهری و افزایش ارائه خدمات الکترونیک می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سناریو در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۸ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی سناریوی سوم: کاهش تقاضای سفرهای درون‌شهری

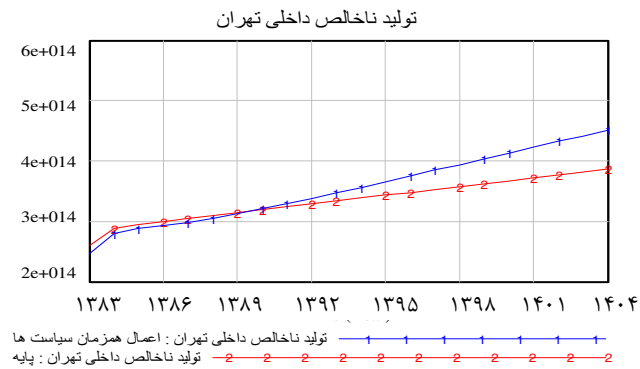
۹-۴- بسته سیاستی

با اعمال هم‌زمان افزایش تقاضای سفر در بخش حمل‌ونقل عمومی از طریق کاهش متوسط زمان سفر با حمل‌ونقل عمومی به همراه افزایش کیفیت خدمات بخش حمل‌ونقل عمومی از جمله ایمنی و راحتی سفر با حمل‌ونقل عمومی و همچنین پوشش مسیرهای سفر و همچنین کاهش تقاضای سفر درون‌شهری از طریق بهبود برنامه‌ریزی شهری و افزایش ارائه خدمات الکترونیک، نتیجه‌ای مطابق با نمودار شکل ۹ بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ای جاد شده است.

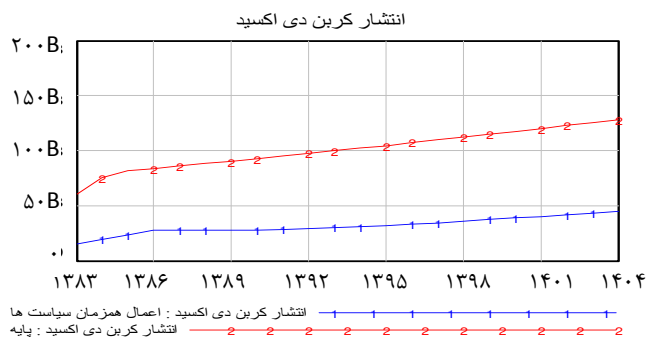


شکل ۹ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی اجرای بسته سیاست

در این بین، با اتخاذ سیاست‌های مذکور علاوه بر بهبود متوسط سرعت خودرو در حمل و نقل شخصی، از خسارات ناشی از تراکم ترافیک کاسته شده، شاخص‌های اقتصادی اجتماعی و زیست‌محیطی بهبود می‌یابد (شکل ۱۰، ۱۱).



شکل ۱۰ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی اجرای بسته سیاستی بر روی تولید ناخالص داخلی



شکل ۱۱ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی اجرای بسته سیاستی بر روی انتشار دی اکسید کربن

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی پویا برای سیستم حمل‌ونقل شهری با توجه به مفهوم سیستم حمل‌ونقل شهری پایدار به منظور درک پویایی‌های سیستم حمل‌ونقل شهری ارائه شده است. هدف از ارائه این مدل، پیشنهاد سیاست‌هایی در جهت افزایش کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل و بهبود پارامترهای ترافیک شهری است. مدل ارائه شده بر اساس داده‌های شهر تهران از ابتدای سال ۱۳۸۳، شبیه‌سازی شده است. سه حوزه برای سیاست‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است: حمل‌ونقل عمومی، طراحی شهری و ارائه خدمات الکترونیک. گسترش حمل و نقل عمومی با کارایی بالا و سرویس دهی مناسب و با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی و زیست محیطی، نه تنها از مشکلات ترافیکی می‌کاهد بلکه گامی به سوی توسعه پایدار و بهبود محیط شهری خواهد بود. سناریوهای مختلفی طراحی و نتایج اعمال آن‌ها بررسی و تحلیل شده است. تحلیل آثار سناریوها نشان می‌دهد که در صورت اعمال همزمان کاهش تقاضای سفر درون‌شهری از طریق بهبود برنامه‌ریزی شهری و افزایش ارائه خدمات الکترونیک و همچنین افزایش تقاضای سفر در بخش حمل‌ونقل عمومی از طریق کاهش متوسط زمان سفر با حمل‌ونقل عمومی به همراه افزایش کیفیت خدمات بخش حمل‌ونقل عمومی از جمله ایمنی و راحتی سفر با حمل‌ونقل عمومی و همچنین پوشش مسیرهای سفر می‌توان به بهبود پارامترهای ترافیکی از جمله متوسط سرعت خودرو شخصی، مصرف سوخت، آلودگی‌های زیست‌محیطی در شهر تهران



امیدوار بود. همچنین در این بین از خسارات ناشی از تراکم ترافیک شهری کاسته شده و توسعه اقتصادی بهبود می یابد و می تواند بر سهم سرمایه گذاری حمل و نقل عمومی از توسعه اقتصادی بیفزاید.

۱۱- منابع

- [1] Haghshenas H., Vaziri M.; "Urban sustainable transportation indicators for global comparison"; *Ecological Indicators*, 15(1), 2012, pp. 115-121.
- [2] Wang J., Lu H., Peng H.; "System dynamics model of urban transportation system and its application"; *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), 2008, pp. 83-89.
- [3] Safari-Moghadam, M.; "Travel Demand Management Strategies in Electronic City". *Proceedings of the Second Conference on Electronic City*, Tehran, Iran, 2009, pp. 24-25 May, pp. 29-38. (In Persian)
- [4] Alavi, A.; *Organizing Traffic Management of urban Communication System (Case study: Tehran)* (Master's thesis). Tarbiat Modares University, Tehran, 1997. (In Persian)
- [5] Gilbert, R., Irwin, N., Hollingworth, B.; *Sustainable Transportation Performance Indicators (STPI)*, Transportation Research Board (TRB), CD ROM, 2003.
- [6] Ashok Kumar, J.; *Urban Transport: Planning And Management* (A. Rezaeian Gharagozlo, Trans.). Tehran: Azarakhsh, 2012. (In Persian)
- [7] Tang, K. X., & Waters, N. M.; The internet, GIS and public participation in transportation planning. *Progress in Planning*, 64(1), 2005, pp. 7-62.
- [8] Li, Y., & DaCosta, M. N.; "Transportation and income inequality in China: 1978-2007". *Transportation Research Part, A: Policy and Practice*, 2013, pp. 56-71.
- [9] Rezaee Arjroody, A., & Tasbihi, A.; A communication model for development of transportation and economic growth in Iran based on vector regression pattern. *The Economic Research*, 7(2), 2007, pp. 125-136. (in Persian)
- [10] Hadi-Zonouz, B., Ahmadi, M. Effective Factors on Ownership and Use Rate of

- Personal Vehicle in Tehran Urban Households. *Proceedings of the 11th International Conference on Traffic and Transportation Engineering*, Tehran, Iran, 2-3 February. Retrieved from <http://www.civilica.com/Paper-TTC11-TTC11056.html>. 2012 (In Persian)
- [11] Bureau of Transport and Regional Economics [BTRE], *Estimating Urban Traffic and Congestion Cost Trends for Australian Cities*, Working paper 71, BTRE, Canberra ACT, 2007.
- [12] Naderan, A. & Choopani, A.; *Urban Transportation Management*. Tehran: Organization of Municipalities and Administrative Office of Rural Districts in The Country 2012. (In Persian)
- [13] Jadidi-Ardakani, M.; *Effect of Removal of Energy Subsidies on Transporting Tehran's Inter-city Passenger with System Dynamics Approach*. (Master's thesis). Iran University of Science and Technology, Tehran, 2012. (In Persian)
- [14] Wang, Y., & Wu, L. (, June). Integrated land-use and transportation models. In *Geoinformatics, 2010 18th International Conference on*, IEEE, 2010, pp. 1-4.
- [15] Shaw, S. L., & Xin, X.; Integrated land use and transportation interaction: a temporal GIS exploratory data analysis approach. *Journal of Transport Geography*, 11(2), 2003, pp. 103-115.
- [16] Jeon, C. M., Amekudzi, A. A., & Guensler, R. L.; Sustainability assessment at the transportation planning level: Performance measures and indexes. *Transport Policy*, 25, 2013, pp. 10-21.
- [17] Zhang, J., & Zhang, C.; Research on the effect of subway construction to urban traffic based on system dynamics. In *International Conference on Business Management and Electronic Information (BMEI)*, IEEE. Vol. 5, 2011, pp. 132-136.
- [18] Han, J., & Hayashi, Y.; A system dynamics model of CO2 mitigation in China's inter-city passenger transport. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 13(5), 2008, pp. 298-305.
- [19] Egilmez, G., & Tatari, O. A dynamic modeling approach to highway sustainability:



- Strategies to reduce overall impact. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(7), 2012, pp. 1086-1096.
- [20] Chao, Y., & Zishan, M. system dynamics model of Shanghai passenger transportation structure evolution. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2013, pp. 1110-1118.
- [21] Fartook Zadeh, H., & Rajabi Nohouji, M. dynamic modeling of the traffic of metropolitan cities for presenting transportation improvement policies (Case Study: Metropolitan Tehran). *Journal of Transportation*, 9(1), 2012, pp. 63-81. (In Persian).
- [22] Stave, K. A. Using system dynamics to improve public participation in environmental decisions. *System Dynamics Review*, 18(2), 2002, pp. 139-167.
- [23] Pfaffenbichler, P., Emberger, G., & Shepherd, S. A system dynamics approach to land use transport interaction modelling: The strategic model MARS and its application. *System Dynamics Review*, 26(3), 2010, pp. 262-282.
- [24] Sushil, sh., 2012. *System dynamics: a practical approach for managerial problems* E., Teymouri, A., Nourali, & N., Valizadeh, Trans.). Tehran: Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- [25] Santos, G., Behrendt, H., & Teytelboym, A. Part II: Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, 28(1), 2010, pp. 46-91.
- [26] Bureau of transportation and secretariat of traffic coordinating supreme council of countries' cities *Introducing Integrated Public Transportation System*. 2007.
- [27] Tehran Comprehensive Transportation And Traffic Studies Co. *Tehran Transportation and Traffic at a Glance*. Retrieved from <http://oldtrafficstudy.tehran.ir/>. 2006. (In Persian)