

## مدل سازی ترافیک شهر تهران و بررسی راهکارهای بهبود پایدار آن

### با رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها

#### مقاله علمی - پژوهشی

محسن پورسید آقایی\*، استادیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سعید نبی زاده، پژوهشگر، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: maghaee@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰

صفحه ۳۶۱-۳۷۸

#### چکیده

یکی از بزرگ‌ترین و اصلی‌ترین مشکلات شهرها به‌ویژه شهرهای بزرگ، مسئله ترافیک شهری است. با توجه به آثار ترافیک شهری بر ابعاد مختلف زندگی شهروندان و اهمیت حمل و نقل به‌عنوان نبض حیات شهرها، تعیین راهبرد و سیاست‌گذاری برای کنترل و کاهش ترافیک اهمیت فراوانی دارد. همچنین به دنبال مسئله حمل و نقل شهری موضوعاتی مانند آلودگی هوا، مصرف سوخت و ازدحام ترافیکی نیز مطرح می‌شوند. این تحقیق، به مسئله ترافیک شهری، با رویکرد مدل‌سازی دینامیکی و پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌پردازد. در این پژوهش ابتدا به مدل‌سازی دینامیکی رفتار ترافیکی در شهرهای بزرگ و تعاریف موردنیاز پرداخته شده و سپس با داده‌های شهر تهران مدل شبیه‌سازی شده و در نهایت سیاست‌هایی جهت بهبود ترافیک شهر تهران ارائه شده است. برای به دست آوردن رابطه بین متغیرها نیز، از روش رگرسیون و مصاحبه با نخبگان استفاده شده است. در بین سیاست‌های شبیه‌سازی شده کم‌اثرترین آن‌ها، سیاست افزایش طول معابر شهری بوده و نتایج مدل نشان می‌دهد که افزایش طول خط مترو نیز به تنهایی موجب کاهش ترافیک بلند مدت در شهرها نخواهد شد. بهترین سیاست‌ها نیز شامل سیاست افزایش هزینه استفاده از حمل و نقل شخصی، سیاست ایجاد شهر الکترونیک، سیاست توسعه مبتنی بر حمل و نقل همگانی و تعادل فاصله محل کار و تحصیل با محل زندگی است.

واژه‌های کلیدی: ترافیک شهری، پویایی‌شناسی سیستم‌ها، سیاست‌گذاری شهری، مدل‌سازی ترافیک، حمل و نقل شهری تهران

#### ۱- مقدمه

ترافیک شهری مسئله اجتماعی مهمی تلقی می‌شود. حمل و نقل شهری بر ابعاد مختلف زندگی شهروندان اثرگذار است و یکی از عمده‌ابزارهای اصلی توسعه است. همچنین می‌توان از آثار حمل و نقل، به مهم‌ترین معیارهای کیفیت زندگی تحت تأثیر حمل و نقل شهری مثل سلامت، خانواده، قضاوت اجتماعی، آزادی، امنیت، آموزش، هویت فردی، حفظ حریم خصوصی، کیفیت محیط‌زیست، روابط اجتماعی، کار، امنیت، اوقات فراغت، درآمد و راحتی اشاره کرد. البته دسته‌بندی‌های مختلفی از عوامل کیفیت زندگی شهری ارائه شده است. اما بسیاری از

اگرچه پیشرفت انسان در حوزه‌های مختلف زندگی، بسیاری از مشکلات را کاهش داده است، اما تقریباً به همان میزان، مسائل و مشکلات جدیدی نیز در پی داشته است. روند رو به رشد شهرنشینی، معضلات فراوانی را به همراه داشته که در بسیاری موارد بسیار پیچیده‌اند. در طول تاریخ، بهبود سیستم حمل و نقل همواره از عوامل مهم رفاه اجتماعی بوده است؛ اما متأسفانه حمل و نقل همراه با خطرات محیطی و تهدید سلامت انسان می‌باشد. یکی از بزرگ‌ترین و اصلی‌ترین مشکلات شهرها، به‌ویژه شهرهای بزرگ، معضل ترافیک است. بنابراین، معضل

تقسیم‌بندی‌ها ۳ حوزه کلیدی اثرگذاری حمل‌ونقل شهری بر زندگی شهروندان را حوزه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مطرح می‌کنند. سیاست‌گذاران همواره در دوره‌های مسئولیت خود به ارائه راهکارهایی پرداخته‌اند؛ اما این سیاست‌ها نتوانسته در بلندمدت پاسخگو به این مسئله باشد. در این تحقیق به مسئله ترافیک با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها نگاه می‌شود تا با در نظر گرفتن نتیجه سیاست‌ها در بلندمدت به ارائه بهترین راهکارها پردازد. روش به کار گرفته شده در این پژوهش، رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها است؛ زیرا اصولاً ترافیک یک پدیده پویا است و عوامل زیادی روی آن اثر می‌گذارند و پویایی‌شناسی سیستم‌ها قادر به تجزیه و تحلیل رابطه بین مولفه‌ها، علت‌ها و اثرات، تعیین شاخص‌های عملکرد کلیدی و شبیه‌سازی اثر تغییرات در طراحی فرآیندها و سیاست‌ها است. رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها به‌طور کلی تمام جنبه‌های سیستم را در نظر می‌گیرد و رفتار میان اجزای کل سیستم را برای سناریوهای مختلف در طول زمان تجزیه و تحلیل می‌کند.

## ۲- پیشینه تحقیق

در این بخش به بررسی مطالعات و مقالات انجام‌شده در حوزه حمل‌ونقل شهری و مسائل مربوط به آن با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها پرداخته شده است. سعی بر آن بوده تا مقالات به‌روز از مجلات معتبر در خارج و داخل ایران، مورد بررسی قرار گیرد. در انتخاب مقالات خارجی سعی شده است مقالاتی انتخاب شود که ژورنال آن مقاله حداقل در یکی از دو پایگاه معتبر *Web of Science* و *Scopus* نمایه شده باشد. ژورنال‌های مقالات داخلی انتخاب‌شده نیز دارای بالاترین درجه نشریات دانشگاهی در ایران یعنی علمی-پژوهشی است.

حمیدرضا فرتوک‌زاده و میثم رجبی نهوجی در سال ۱۳۹۱ به موضوع مدل‌سازی پویای ترافیک کلان‌شهرها به‌منظور ارائه سیاست‌های بهبود حمل‌ونقل با مطالعه موردی کلان‌شهر تهران پرداخته‌اند. در این پژوهش، با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی مسئله ترافیک در ابعاد کلان و استراتژیک مدل شده سپس با استفاده از نرم‌افزار ونسیم شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار سیستمی مسئله ترافیک تهران در افق زمانی ۱۹ ساله انجام شده است. با آزمون راهکارهای مختلف در محیط شبیه‌سازی، سیاست‌ها و راهکارهایی برای کنترل و بهبود ترافیک کلان‌شهر تهران ارائه شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: اصلاح

معماری شهری، توسعه خدمات الکترونیک، افزایش قیمت پارکینگ حاشیه خیابان‌ها، اختصاص مسیرهای ویژه، توسعه مترو، حذف یارانه سوخت. همچنین نتایج شبیه‌سازی اثر راهکارهای مختلف بر اساس مدل در محیط نرم‌افزار، تأثیر هر یک از سیاست‌ها را بر متوسط سرعت خودرو، نشان داده و نمودار تغییر سرعت متوسط خودرو با اعمال تک‌تک سیاست‌ها رسم شده است. از نکات قابل‌توجه دیگر این مقاله توجه به لایه‌های پنهان مسئله می‌باشد. برای مثال توسعه معابر شهری هرچند در ظاهر می‌تواند باعث کاهش ترافیک شود ولی در نهایت به دلیل افزایش جذابیت سفر باعث افزایش ترافیک می‌شود. در این تحقیق برای کمی‌سازی مفهوم ترافیک از متوسط سرعت خودرو استفاده شده است و متغیر اصلی بیان‌گر مسئله که وضعیت سیستم را بیان می‌کند، متوسط سرعت خودرو در ساعات اوج ترافیک در نظر گرفته شده است. (فرتوک زاده و رجبی نهوجی، ۱۳۹۱)

مهدی استادی جعفری و امیرعباس رصافی به ارزیابی سیاست‌های توسعه پایدار در بخش حمل‌ونقل شهری با استفاده از مدل‌های سیستم پویایی و مطالعه موردی شهر مشهد پرداخته‌اند. در این ارزیابی مشخص گردیده سیاست‌های هم‌پیمایی، کاهش خودروهای فرسوده و افزایش کیفیت وسایل نقلیه همگانی، بیشترین تأثیر را بر روی شاخص‌های پایداری گذاشته و توانسته معضلات ناشی از حمل‌ونقل را طی ۲۰ سال آینده کمینه نماید. از نظر نویسندگان مقاله، پیشنهادهای ارائه گردیده در این مقاله می‌تواند در تصمیم‌گیری گردانندگان حمل‌ونقل شهری جهت دستیابی به حمل‌ونقل پایدار مؤثر واقع شود. (استادی‌جعفری و رصافی، ۱۳۹۲)

حسین حق‌شناس و همکاران در سال ۱۳۹۳ به ارزیابی سیاست پایدار در حمل‌ونقل شهری با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم و داده‌های شهرهای جهان با مطالعه موردی شهر اصفهان پرداخته‌اند. بر اساس پایگاه داده مطالعه، از هر گروه کلیدی از پایداری (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) ۳ شاخص انتخاب شدند که در مجموع ۹ شاخص حمل‌ونقل پایدار شهری انتخاب‌شده‌اند. در این پژوهش، روابط متغیرهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی حمل‌ونقل شهری با استفاده از پایگاه داده شهرهای جهان برآورد شده است. برخی از روابط از تعریف متغیرها و برخی دیگر با استفاده از مدل‌های آماری برآورد شده است. معادلات شامل معادلات خطی و غیرخطی بوده و برای

با خدمات حمل و نقل عمومی با کیفیت بالا و الگوهای سکونت‌گاهی همسو با استفاده از حمل و نقل عمومی است. برای ساخت مدل شبیه‌سازی پویای کلان‌شهر ترانزیت از چهار زیر سیستم اقتصاد، جامعه، محیط‌زیست و عرضه و تقاضای حمل و نقل استفاده شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، نرخ مالکیت وسایل نقلیه موتوری شهر نانچانگ به صورت خطی افزایش یافته است. تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۲۰، تعداد وسایل نقلیه موتوری در شهر نانچانگ به ۱,۱۳ میلیون و کل جمعیت شهری به ۵,۷۱ میلیون نفر خواهد رسید. بر اساس این روند، مشکلات ترافیکی در نانچانگ بیش از پیش آشکار خواهد شد؛ بنابراین لازم است کلان‌شهر ترانزیتی احداث شود (Xue et al., 2020) سوریانی و همکاران در اندونزی به یک مدل شبیه‌سازی با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم برای برنامه‌ریزی حمل و نقل شهری و یک مطالعه موردی پرداخته‌اند. این مطالعه در سورابایا در جاوه شرقی اندونزی که چهارمین شهر پرآزدحام جهان است، انجام شده است.

نتایج شبیه‌سازی ازدحام ترافیکی نیز بر پایه‌ی شرایط موجود به دست آمده است که نشان می‌دهد این شاخص در سال ۲۰۰۹ شروع به پیش‌روی از مرز ۱۰۰٪ کرده است و در سال ۲۰۱۷ به ۱۴۰٪ رسیده است که این می‌تواند به دلیل عبور و مرور روزانه و ظرفیت جاده به‌عنوان دو عامل داخلی و رویدادهای خارجی مثل رویدادهای خاص، نواحی کاری، تصادفات ترافیکی و کنترل ترافیک ضعیف باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این مقدار می‌تواند به وسیله کاهش عوامل داخلی و خارجی تأثیرگذار تا مرز ۶۱٪ کاهش یابد. این کاهش در رویدادهای خارجی می‌تواند از طریق فناوری اطلاعات و ارتباطات برای کنترل ترافیک و مسیریابی صورت گیرد و در عوامل داخلی این امر با مدیریت تقاضا از طریق سیاست پارکینگ، مسیریابی جاده و محدودیت‌های فیزیکی می‌تواند انجام شود (Suryani et al., 2020) رضا صیادی و انجلی عوسی به یک رویکرد یکپارچه مبتنی بر پویایی سیستم و فرآیند تحلیلی شبکه برای ارزیابی سیاست‌های حمل و نقل پایدار پرداختند در این مقاله یک مطالعه عددی ارائه شده است و نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های مبتنی بر اشتراک سفر (ادغام سفرهای شخصی در اتومبیل‌های شخصی) در مقایسه با سایر سیاست‌های دستیابی به پایداری در سیستم حمل و نقل عملکرد بهتری دارند و در مرحله بعد سیاست‌هایی پیشنهاد می‌شود که قصد دارد فاصله سفرها و نرخ سفرهای

برآورد برخی از آن‌ها، برآزش منحنی و تحلیل همبستگی انجام شده است. پس از شبیه‌سازی آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که ادغام انواع روش‌ها، قیمت‌گذاری کارآمد و کنترل استفاده از خودرو به‌جای سرمایه‌گذاری در حمل و نقل خصوصی، باعث ارتقای شاخص حمل و نقل پایدار در اصفهان است. (Haghshenas et al., 2015)

علی محمد احمدوند و همکاران به ارائه مدلی پویا برای سیستم حمل و نقل شهری با توجه به مفهوم سیستم حمل و نقل شهری پایدار پرداخته‌اند. نویسنده با بررسی مقالات در این حوزه، مجموعه متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر مدل سیستم حمل و نقل شهری را ۱۰ مورد اعلام کرده که از جمله آن‌ها می‌توان به جمعیت، تراکم ترافیک و آلودگی هوا اشاره کرد. سناریوهای به‌کاربرده شده به شرح زیر است.

- ادامه وضع موجود

- افزایش تقاضای سفر در بخش حمل و نقل عمومی: سیاست در نظر گرفته‌شده در این بخش، افزایش تقاضای سفر در بخش حمل و نقل عمومی از طریق کاهش متوسط زمان سفر با حمل و نقل عمومی به همراه افزایش کیفیت خدمات بخش حمل و نقل عمومی از جمله ایمنی و راحتی سفر با حمل و نقل عمومی و همچنین پوشش مسیرهای سفر می‌باشد.

- کاهش تقاضای سفرهای درون‌شهری: سیاست در نظر گرفته‌شده در این بخش، کاهش تقاضای سفر درون‌شهری از طریق بهبود برنامه‌ریزی شهری، بهبود طراحی شهری و افزایش ارائه خدمات الکترونیک می‌باشد.

- بسته‌سیاستی: اعمال هم‌زمان سیاست‌های ۲ و ۳

هم‌چنین، با اتخاذ سیاست‌های مذکور علاوه بر بهبود متوسط سرعت خودرو در حمل و نقل شخصی، از خسارات ناشی از تراکم ترافیک کاسته شده و شاخص‌های اقتصادی اجتماعی و زیست‌محیطی بهبود می‌یابد. برای مثال نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با اعمال بسته‌سیاستی انتشار دی‌اکسید کربن نسبت به حالت پایه، کاهش چشم‌گیری کرده و در مقابل تولید ناخالص داخلی با شدت بیش‌تری افزایش می‌یابد. (احمدوند و همکاران، ۱۳۹۴)

یونچیانگ ژو و همکاران در پژوهشی به تجزیه و تحلیل رابطه بین ساخت کلان‌شهر ترانزیت و توسعه پایدار حمل و نقل شهری با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها و مطالعه موردی شهر نانچانگ چین پرداخته‌اند. منظور از کلان‌شهر ترانزیت یک منطقه شهری

است که سیاست تجمیع بلوک‌های ترافیکی پایدارترین و اساسی‌ترین اقدام برای کنترل تراکم ترافیک است (Zhang, 2022)

### ۳- مدل‌سازی

در این قسمت به مدل‌سازی ترافیک شهر تهران با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها پرداخته می‌شود. ابتدا نمودار علی معلولی رسم می‌شود و متغیرهای دخیل در آن و روابط بین آن‌ها توضیح داده می‌شود و سپس نمودار جریان موجودی رسم شده و به نحوه رسیدن به روابط اشاره می‌شود. سپس با چند روش به اعتبارسنجی مدل پرداخته می‌شود و در نهایت سیاست‌هایی جهت بهبود ترافیک شهر تهران ارائه و اثرات هر یک بررسی می‌شود.

### تعیین متغیرها

متغیرهای موثر بر ترافیک و نحوه بدست آوردن آنها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. متغیرهای موثر بر ترافیک

نحوه به دست آوردن	نام متغیر
مرور ادبیات	سرانه مالکیت خودرو سواری
مرور ادبیات	افزایش طول خط مترو
مرور ادبیات	افزایش طول خط BRT
مصاحبه با نخبگان	هزینه استفاده از حمل و نقل شخصی
مرور ادبیات	افزایش تعداد ایستگاه مترو
مرور ادبیات	افزایش تعداد ایستگاه BRT
مرور ادبیات-مصاحبه با نخبگان	سرعت متوسط شبکه
مرور ادبیات	متوسط طول سفر
مرور ادبیات	طول معابر
مرور ادبیات	سرانه ایجاد سفر
مرور ادبیات	جمعیت

### نمودار علی معلولی

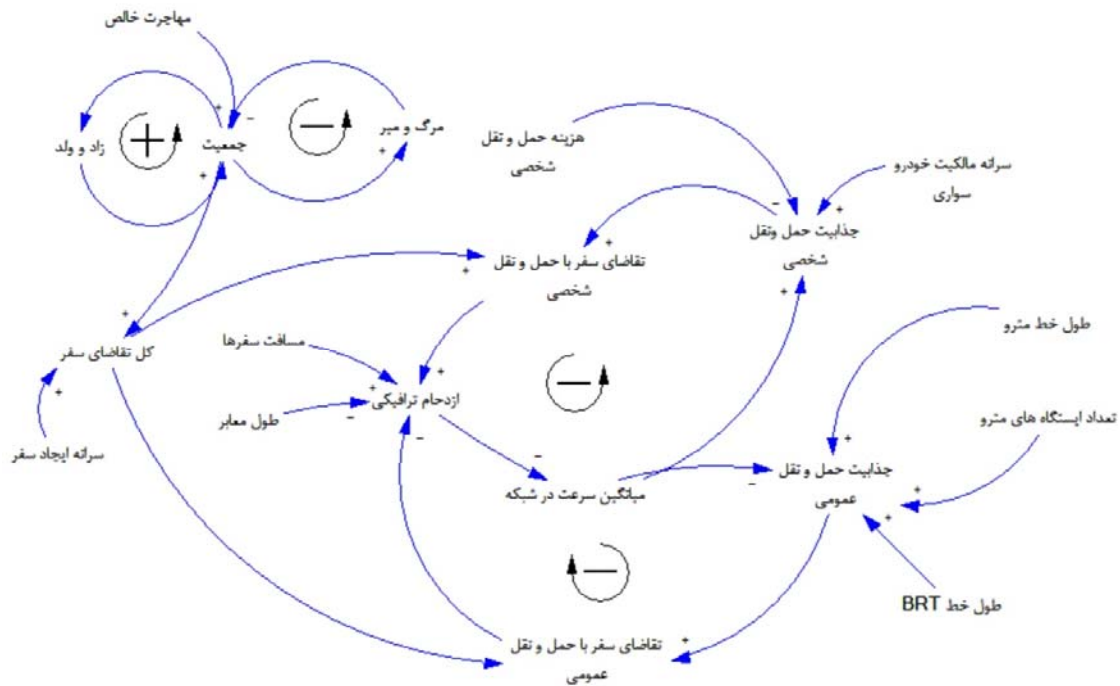
شروع نمودار علی معلولی و تعریف متغیرها با متغیر جمعیت است؛ زیرا فرض این پژوهش این است که شروع تقاضای سفر با جمعیت شکل می‌گیرد. متغیر جمعیت از دو حلقه تأثیر می‌پذیرد.

شهری را کاهش دهد (Sayyadi and Awasthi, 2020) ونجینگ ژانگ به بررسی اقدامات متقابل برای ازدحام ترافیک شهری در چین از منظر پویایی سیستم پرداخته‌است. علت مستقیم ازدحام ترافیک، عدم تعادل بین تقاضای سفر با خودرو و تأمین امکانات جاده‌ای است. در دهه‌های اخیر، روند شهرنشینی چین تسریع شده است. تعداد فزاینده‌ای از مردم وارد شهرها شده‌اند و استانداردهای زندگی به‌طور مداوم بهبود یافته است. خودروهای شخصی به تدریج از کالاهای لوکس به کالاهای پرمصرف تبدیل شده‌اند. تحت نیروی ترکیبی افزایش پایه جمعیت و افزایش نرخ مالکیت خودروهای شخصی، تقاضا برای سفر با خودرو افزایش یافته است، در نتیجه زیرساخت‌های حمل‌ونقل در بسیاری از شهرها برای حمایت از این تغییر ناکافی است و در نتیجه تراکم ترافیک اضافه می‌شود. در این گزارش با انتقاد از ناپایداری سیاست‌های سخت گیرانه‌ای مانند محدودیت شماره‌گذاری خودروها و ایجاد جاده‌های موازی برای کنترل تراکم ترافیک، به بررسی ۵ سیاست اتخاذ شده از سوی دولت برای کاهش تراکم ترافیک پرداخته شده و به این نتیجه رسیده

از بین متغیرهای جدول ۱، متغیر افزایش تعداد ایستگاه BRT در رگسیون، دارای تأثیر بسیار کم بوده و در ادامه مدل‌سازی حذف شد.

تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی باعث افزایش ازدحام ترافیک می‌شود؛ که هم‌زمان دو متغیر مسافت سفرها و طول معابر نیز به ترتیب بر آن اثر مثبت و اثر منفی می‌گذارد. افزایش ازدحام ترافیکی باعث کاهش میانگین سرعت در شبکه می‌شود. کاهش میانگین سرعت در شبکه باعث کاهش جذابیت حمل و نقل شخصی شده و کاهش جذابیت حمل و نقل شخصی باعث کاهش تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی می‌شود که با این اتفاق حلقه‌ی دیگری تشکیل می‌شود که از نوع تعادلی است و مهم‌ترین حلقه‌ی مدل پژوهش نیز محسوب می‌شود. بر متغیر جذابیت حمل و نقل شخصی دو متغیر هزینه حمل و نقل و سرانه مالکیت خودرو سواری به ترتیب اثر منفی و مثبت می‌گذارند. اما افزایش تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی باعث کاهش ازدحام ترافیکی شده و در نتیجه باعث افزایش میانگین سرعت در شبکه شده و این اتفاق موجب کاهش جذابیت حمل و نقل عمومی شده و در نتیجه باعث کاهش تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی می‌شود. پس در این جا هم یک حلقه تعادلی دیگر مشاهده می‌شود؛ اما مواردی دیگر نیز در خارج از این حلقه بر جذابیت حمل و نقل عمومی تأثیر می‌گذارند که شامل متغیرهای طول خطوط مترو، تعداد ایستگاه‌های مترو و طول خطوط BRT می‌باشد. با کنار هم قرارگیری تمام متغیرهایی که توضیح داده شد، نمودار علی معلولی نهایی به صورت شکل زیر می‌شود.

اولین حلقه شامل متغیرهای زاد و ولد و جمعیت است. عملکرد این حلقه به‌طور بیست که دائم در حال تقویت خود و فزاینده است و باعث افزایش جمعیت می‌شود. حلقه بعدی شامل متغیرهای مرگ و میر و جمعیت است. عملکرد این حلقه به نحو بیست که سعی در به تعادل رسیدن دارد؛ به‌نحوی که با افزایش جمعیت مرگ و میر افزایش می‌یابد و با افزایش مرگ و میر جمعیت کاهش می‌یابد و این بار با کاهش جمعیت مرگ و میر نیز کاهش می‌یابد و به همین ترتیب عملکرد حلقه ادامه پیدا می‌کند. اما متغیر دیگری نیز بر جمعیت تأثیرگذار است و آن مهاجرت خالص است. مهاجرت خالص برابر است با اختلاف مهاجرت از تهران و مهاجرت به تهران. مهاجرت از - مهاجرت به = مهاجرت خالص که در صورتی که مقدار مهاجرت خالص مثبت باشد باعث افزایش جمعیت تهران و در صورتی که منفی باشد، باعث کاهش جمعیت تهران می‌شود. در ادامه مدل علی معلولی به تعریف تقاضای سفر پرداخته می‌شود که حاصل اثرگذاری جمعیت و سرانه ایجاد سفر، به شکل زیر می‌باشد. حال در ادامه مدل فرض می‌شود که تقاضای سفر ایجاد شده حاصل از جمعیت، از دو طریق حمل و نقل عمومی و حمل و نقل شخصی برآورده می‌شود؛ به عبارت دیگر، کل تقاضای سفر باعث افزایش تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی و افزایش تقاضای حمل و نقل شخصی می‌شود.

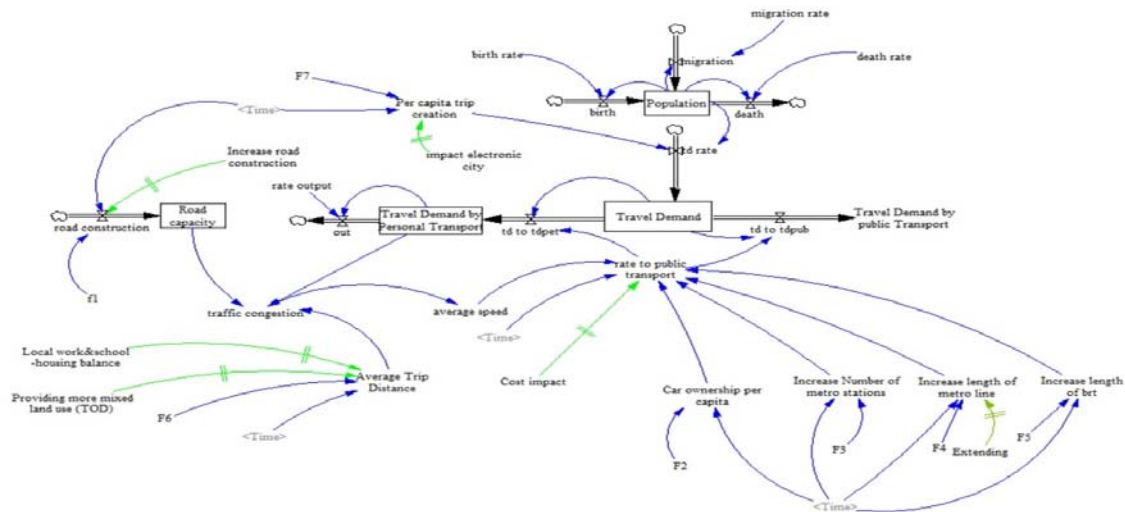


شکل ۱. نمودار علی معلولی کلی

### نمودار جریان موجودی

تبدیل به حمل و نقل عمومی است. در این پژوهش فرض شده است که همه تقاضای سفری که از جمعیت و سرانه ایجاد سفر به وجود می‌آید، برآورده می‌شود و به دو قسمت حمل و نقل عمومی و حمل و نقل شخصی تقسیم می‌شود؛ و این متغیر "نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی" برای تقسیم تقاضا به دو شیوه نامبرده استفاده می‌گردد. حال تمام مواردی که به جذابیت حمل و نقل شخصی و جذابیت حمل و نقل عمومی متصل بودند، به این متغیر وصل شده‌اند و مقدار این متغیر را تعیین می‌کنند. نمودار جریان به دست آمده به شکل زیر است.

تا این جای کار نمودار علی معلولی رسم شد؛ اما این نمودار قابلیت شبیه‌سازی و به دست آوردن نتایج را ندارد. برای شبیه‌سازی باید نمودار جریان موجودی رسم شده و روابط ریاضی بین متغیرها مشخص شود. برای رسم نمودار جریان از روی نمودار علی معلولی، ناگزیر شکل مدل کمی تغییر می‌کند؛ زیرا نمودار جریان روش خاص خود را دارد و نوع متغیرها در آن می‌تواند با یکدیگر متفاوت باشند. از متغیرهایی که در نمودار علی وجود نداشت و در نمودار جریان اضافه شده متغیر "نرخ



شکل ۲. نمودار جریان موجودی

### تعیین روابط ریاضی

برخی روابط ریاضی بین متغیرها از روش رگرسیون خطی، برخی از روی تعریف متغیر و برخی نیز از طریق مصاحبه با خبرگان به دست آمده است. داده‌های تاریخی پژوهش، داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ است که از سازمان حمل و نقل و ترافیک شهر تهران به دست آمده است.

متغیر ازدحام ترافیکی که به عنوان شاخصی جهت ترافیک تعریف شده است از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\text{traffic congestion} = ((\text{Travel Demand by Personal Transport}) / (\text{Road capacity})) * \text{Average Trip Distance}$$

متغیر سرعت متوسط از طریق رگرسیون با داده‌های گذشته و به کمک متغیر ازدحام ترافیکی به دست آمده است.

$$\text{average speed} = \text{IF THEN ELSE}(\text{traffic congestion} > 1.93e+07, 0, -\text{traffic congestion} * 2.248e-06 + 58.2)$$

متغیر نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی نیز از طریق رگرسیون با داده‌های گذشته و به کمک متغیرهایی که در نمودار جریان به آن

متصل هستند، یعنی مقدار افزایش طول خطوط مترو در سال، افزایش طول خطوط BRT، افزایش تعداد ایستگاه‌های مترو، سرانه مالکیت خودروی سواری و میانگین سرعت شبکه به دست آمده است.

$$\text{rate to public transport} = -\text{average speed} * 0.012025 - \text{Car ownership per capita} * 0.374945 + \text{Increase length of brt} * 0.0003853 + \text{Increase length of metro line} * 0.0043331 + \text{Increase Number of metro stations} * 0.0001705 + 0.691335$$

جمعیت نیز با نرخ‌های نسبی زاد ولد، مرگ و میر و مهاجرت خالص به ترتیب ۰،۰۰۰۸۷۵۸۳۵ و ۰،۰۰۰۵۶، ۰،۰۱۸۵، در طول زمان به دست می‌آید.

سایر متغیرهای برون‌زای مدل از طریق قابلیت **lookup** نرم‌افزار و داده‌های گذشته که مربوط به سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ است، تخمین زده می‌شود.

تصویر زیر، خروجی مدل رگرسیون در نرم‌افزار **spss** برای محاسبه متغیر نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی می‌باشد.

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.6913350	.061		6.438	.003
	LM	.0043331	.003	.343	1.268	.273
	CO	-.3749453	.152	-.617	-2.460	.070
	AS	-.0120250	.003	-.031	-.419	.696
	LB	.0003853	.000	.109	1.686	.167
	NM	.0001705	.000930326	.010	.183	.863

a. Dependent Variable: rate

شکل ۳. خروجی نرم‌افزار **spss**

سرمایه‌گذاری‌ها در شبیه‌سازی ثانویه در قسمت سیاست‌گذاری بررسی می‌شود.

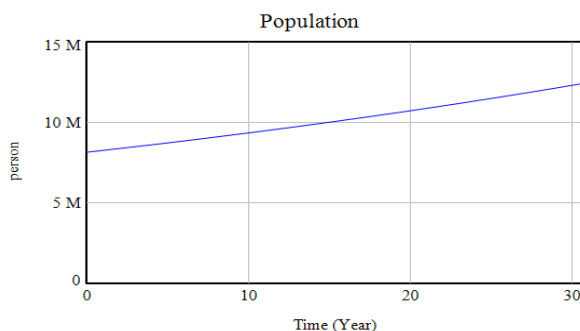
#### جمعیت

رفتار متغیر جمعیت تهران، در طول دوره شبیه‌سازی به شکل زیر است. طبق شکل زیر مدل پیش‌بینی می‌کند که جمعیت تهران تا سال ۱۴۲۰ به حدود ۱۲/۵ میلیون نفر می‌رسد.

#### شبیه‌سازی مدل

حال که نمودار جریان موجودی به‌طور کامل به دست آمده است و روابط ریاضی بین متغیرها نیز در نرم‌افزار وارد شده است، مدل آماده شبیه‌سازی است. سال پایه مدل سال ۱۳۸۹ در نظر گرفته شده است و مدت شبیه‌سازی نیز ۳۱ سال یعنی تا سال ۱۴۲۰ می‌باشد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی مدل و رفتار متغیرها در طول زمان بررسی می‌شود.

در شبیه‌سازی اولیه فرض شده است که شرایط یکسان باشد و هیچ‌گونه سرمایه‌گذاری در هیچ بخشی انجام نمی‌شود.

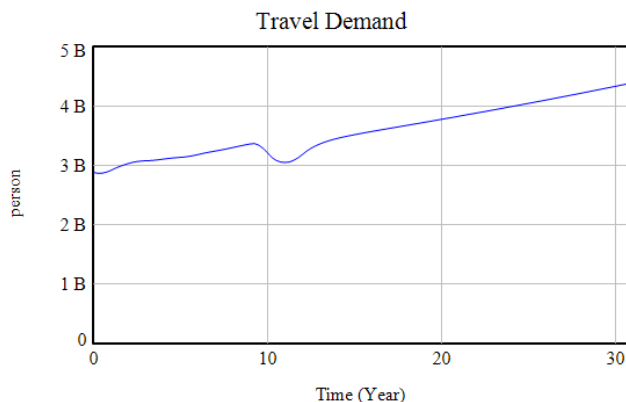


شکل ۴. رفتار جمعیت

### تقاضای سفر

سال ۱۳۹۹ رفتار تقاضای سفر نزولی می‌شود این است که در این سال به علت شیوع پاندمی کرونا و همچنین غیرحضور شدن برخی فعالیت‌ها، سرانه ایجاد سفر کاهش یافته است.

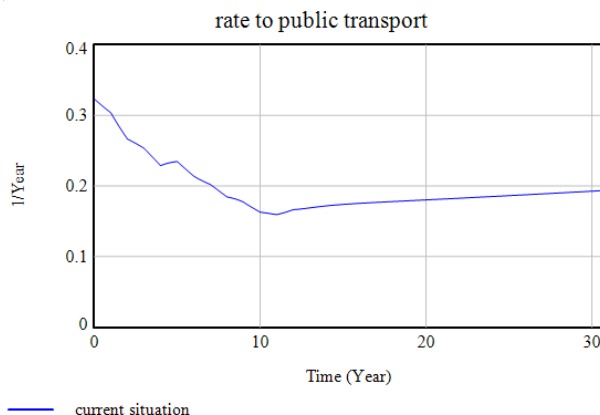
رفتار متغیر تقاضای سفر در تهران، در طول دوره شبیه‌سازی به شکل زیر است. همان طور که مشاهده می‌شود رفتار این متغیر نیز به دلیل افزایش جمعیت، در طول زمان صعودی است. علت این که در برهه‌ای از زمان (حوالی سال دهم شبیه‌سازی برابر با



شکل ۵. رفتار تقاضای سفر

### نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی

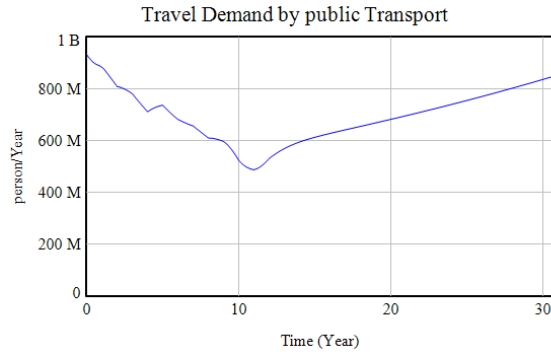
رفتار این متغیر در طول زمان به شکل زیر است.



شکل ۶. رفتار نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی

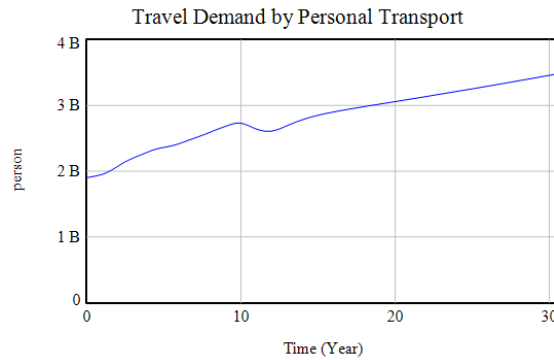
سایر پارامترهای تقویت‌کننده حمل و نقل عمومی است؛ اما برای سال‌های آینده با توجه به ثابت در نظر گرفتن شرایط و کاهش سرعت متوسط شبکه، روند نزولی این نرخ متوقف شده و افزایش می‌یابد. در ادامه رفتار متغیرهای تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی و شخصی مشاهده می‌شود.

همان طور که مشاهده می‌شود، رفتار متغیر از سال پایه (۱۳۸۹) تا حدود ۱۲ سال به شکل کاملاً نزولی است. با توجه به رابطه ریاضی این متغیر و عوامل موثر بر آن، دلیل این رفتار نزولی، افزایش بی‌رویه نرخ مالکیت خودروی سواری در سال‌های اخیر از ۰/۲۷ به حدود ۰/۴۹ و کاهش نرخ افزایش طول خط مترو و



شکل ۷. رفتار تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی

با توجه به ثبات نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی و افزایش جمعیت مقدار تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی برای آینده صعودی است؛ اما تقاضای حمل و نقل شخصی که دلیل ازدحام ترافیکی می باشد نیز به دلیل افزایش جمعیت، صعودی است.

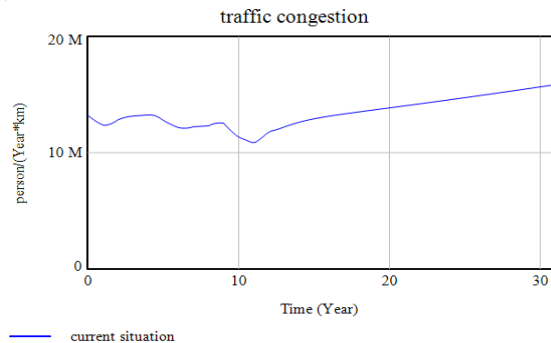


شکل ۸. رفتار تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی

همان طور که گفته شد افزایش این متغیر و ثابت بودن ظرفیت جاده باعث افزایش شاخص ازدحام ترافیکی شده که در ادامه نمایش داده می شود.

#### شاخص ازدحام ترافیکی

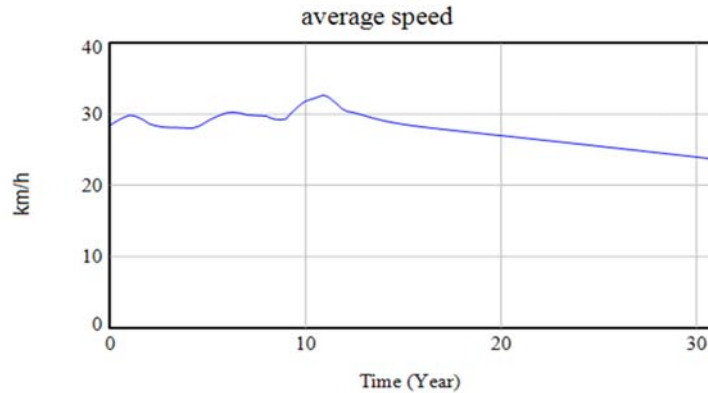
برای سالهای آینده فرض شده است که ظرفیت جاده (طول معابر) ثابت می ماند.



شکل ۹. رفتار ازدحام ترافیکی

### سرعت متوسط شبکه

این متغیر هم که حاصل رگرسیون‌گیری با شاخص ازدحام ترافیکی است، رفتاری به شکل زیر از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. رفتار میانگین سرعت شبکه

حدی استواری خود را حفظ کرده و از خود رفتار منطقی بروز دهد.

### تست شرایط حدی متغیر ظرفیت جاده

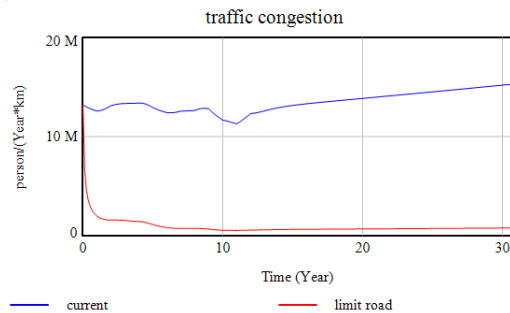
مثلاً فرض می‌شود ظرفیت جاده یا طول معابر ۱۰۰ برابر شود. با این وضع انتظار می‌رود که دیگر مشکلی در ترافیک وجود نداشته باشد. نتیجه شبیه‌سازی این امر به شکل زیر است.

### اعتبارسنجی

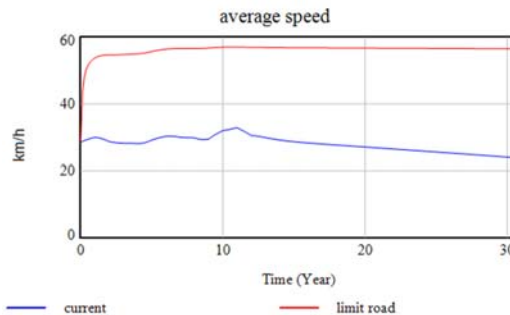
روش‌های متفاوتی برای اعتبارسنجی یک مدل پویا وجود دارد که در ادامه برخی از این روش‌ها پیاده‌سازی می‌شوند.

### تست شرایط حدی

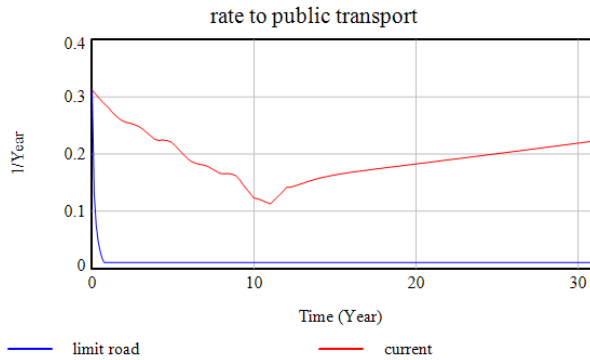
در این تست رفتار مدل در شرایطی که پارامترهای ورودی مقادیر حدی می‌گیرند، بررسی می‌گردد. مدل باید در شرایط



شکل ۱۱. ازدحام ترافیکی در تست شرایط حدی متغیر ظرفیت جاده



شکل ۱۲. میانگین سرعت شبکه در تست شرایط حدی متغیر ظرفیت جاده



شکل ۱۳. نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی در تست شرایط حدی متغیر ظرفیت جاده

همان طور که پیش بینی می شود با افزایش بیش از حد طول معابر شاخص ازدحام ترافیکی به صفر میل کرده و میانگین سرعت متوسط شبکه نیز به حد مطلوب رسیده است. هم چنین نرخ تبدیل تقاضا به حمل و نقل عمومی به صفر میل کرده و در این شرایط تقریباً همه از حمل و نقل شخصی استفاده می کنند.

تست بازتولید رفتار

یکی از مهم ترین تست ها برای بررسی اعتبار مدل تست بازتولید رفتار است که بررسی می کند رفتار مدل چقدر با سیستم واقعی مطابقت دارد. این تست با برخی شاخص ها انجام می شود که در ادامه آمده است. شاخص های زیر برای متغیرهای جمعیت، نرخ تبدیل تقاضا به حمل و نقل عمومی و میانگین سرعت شبکه بررسی شده اند و نتایج آن در جدول آمده است. لازم به ذکر است که داده واقعی مربوط به داده های سال های ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ است که با داده های سال های ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ مدل که با شبیه سازی به دست آمده است، مقایسه شده است. شاخص  $R^2$ :

$$R^2 = \left( \frac{1}{n} \sum \frac{(X_d - \bar{X}_d)(X_m - \bar{X}_m)}{S_d S_m} \right)^2$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|X_m - X_d|}{X_d}$$

$$\frac{MAE}{MEAN} = \frac{MAE}{\bar{X}_d}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |X_m - X_d|$$

تست های ارزیابی ساختار

مدل باید با اطلاعات و دانش در دسترس درباره سیستم حقیقی مورد مطالعه سازگار باشد. نتایج مدل با قوانین پایه و بدیهی باید سازگار باشد. در واقع یافتن ناسازگاری ها و مفروضات غلط و نقض قوانین خلقت باعث بی اعتباری مدل می شود؛ مثلاً در مدل حاضر منفی شدن جمعیت یا سرعت شبکه باعث از بین رفتن

شاخص  $MAPE$

شاخص  $\frac{MAE}{MEAN}$

جدول ۳. نتایج شاخص‌های بازتولید رفتار

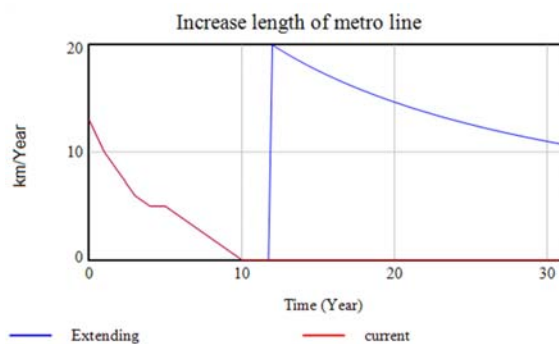
مقدار	شاخص	متغیر
۰/۹۷۲	$R^2$	جمعیت
۰/۰۲۶	MAPE	
۰/۰۲۶	$\frac{MAE}{MEAN}$	
۰/۹۵۵	$R^2$	نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی
۰/۱۶۰	MAPE	
۰/۱۵۲	$\frac{MAE}{MEAN}$	
۰/۶۸	$R^2$	میانگین سرعت شبکه
۰/۰۷۶	MAPE	
۰/۰۷۶	$\frac{MAE}{MEAN}$	
۰/۶۴	$R^2$	ازدحام ترافیکی
۰/۰۷۹	MAPE	
۰/۰۸۰	$\frac{MAE}{MEAN}$	

مقادیر به‌دست آمده برای شاخص‌ها کاملاً مناسب بوده و نشان از دقت بالای مدل دارد.

### طراحی و ارزیابی سیاست

طول خط مترو پرداخته می‌شود. برای این امر فرض می‌شود سال اول ۲۰ کیلومتر به طول خط مترو افزوده می‌شود و این افزایش در طی سال‌ها ادامه داشته ولی مقدار آن کم شده و طی ۲۰ سال به ۱۰ کیلومتر افزایش در سال می‌رسد.

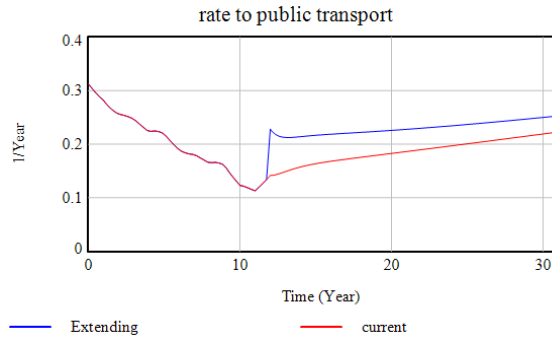
پس از اعتبار سنجی مدل و اطمینان از نتایج تست مدل اکنون به شبیه‌سازی سیاست‌های مختلف می‌پردازیم. ۱- افزایش طول خط مترو: در این سیاست که با متغیر Extending نشان داده می‌شود، به توسعه خط مترو و افزایش



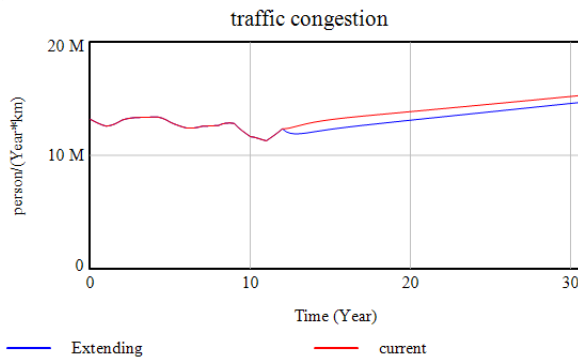
شکل ۱۴. نحوه توسعه خط مترو

می‌شود سال اول ۲۰ کیلومتر به طول معابر افزوده می‌شود و این افزایش در طی سال‌ها ادامه داشته ولی مقدار آن کم شده و طی ۲۰ سال به ۱۰ کیلومتر افزایش در سال می‌رسد.

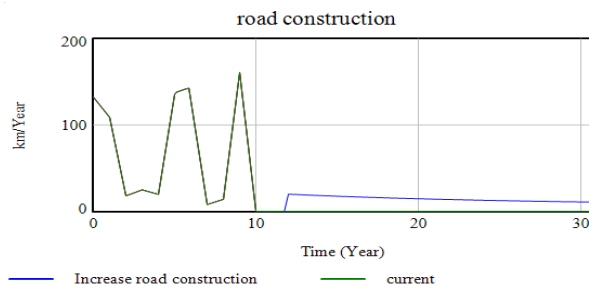
تأثیر این سیاست، روی متغیرهای اصلی مسئله به شکل زیر است. ۲- افزایش طول معابر شهری: در این سیاست که با متغیر Increase road construction نشان داده می‌شود، به توسعه جاده و افزایش طول معابر پرداخته می‌شود. برای این امر فرض



شکل ۱۵. نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی با توسعه مترو

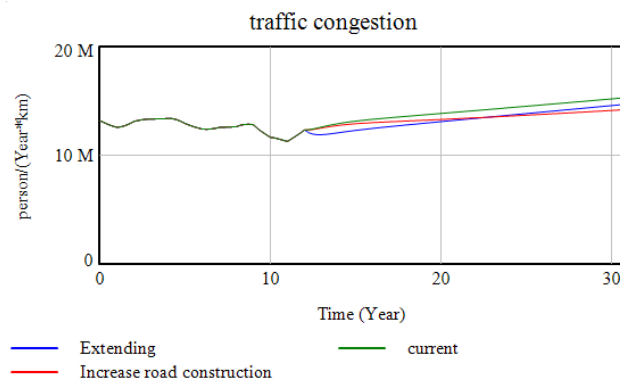


شکل ۱۶. ازدحام ترافیکی با توسعه مترو



شکل ۱۷. افزایش احداث جاده

تأثیر این سیاست، روی متغیرهای اصلی مسئله به شکل زیر است.

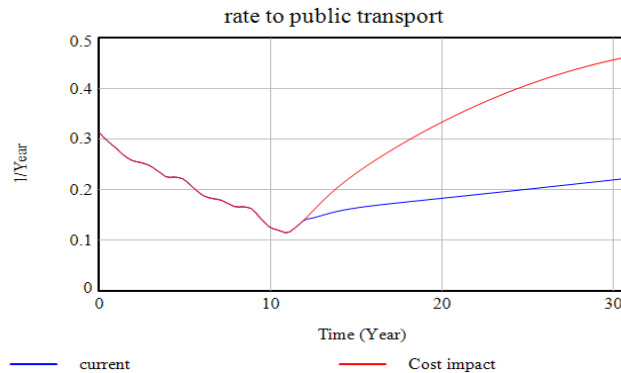


شکل ۱۸. رفتار ازدحام ترافیکی با افزایش جاده

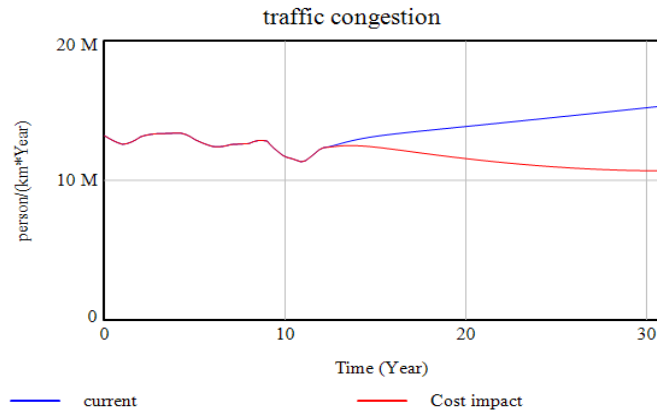
بیش تری اثر می‌گذارد و به مرور از شیب آن کاسته می‌شود. این افزایش را می‌توان با افزایش قیمت سوخت، افزایش هزینه پارکینگ در مقصد، افزایش هزینه طرح ترافیک و بزرگ کردن ناحیه طرح ترافیک محقق کرد.

در صورتی که افزایش هزینه تغییر نرخ به شکل بالا در نرخ تبدیل حمل و نقل عمومی ایجاد کند، ازدحام ترافیکی به شکل زیر می‌شود. رنگ قرمز نمودار مربوط به اجرای این سناریو است.

۳- افزایش هزینه استفاده از حمل و نقل شخصی: در این سیاست که با متغیر **Cost impact** نشان داده می‌شود، فرض می‌شود که با افزایش هزینه استفاده از حمل و نقل شخصی مقدار استفاده از حمل و نقل شخصی کاهش می‌یابد. در این سناریو فرض می‌شود که هزینه حمل و نقل شخصی به قدری بالا رود که نرخ تبدیل تقاضا به حمل و نقل عمومی افزایش یابد. هم‌چنین فرض می‌شود این افزایش در ابتدا که سیاست اجرا می‌شود با شیب



شکل ۱۹. رفتار نرخ تبدیل به حمل و نقل عمومی با افزایش هزینه شخصی



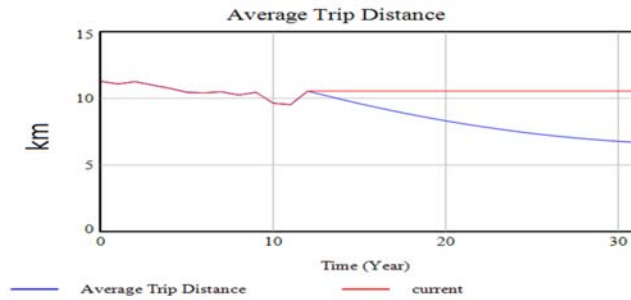
شکل ۲۰. رفتار ازدحام ترافیکی با افزایش هزینه شخصی

سیاست تعادل فاصله محل کار، تحصیل با محل زندگی: برای اجرای این سیاست، می‌توان دانش‌آموزان فقط اجازه ثبت نام در مدارس داشته باشند که نزدیک‌ترین فاصله را با محل زندگی‌شان داشته باشند. یا برای نزدیکی محل کار و محل زندگی تسهیلاتی فراهم شود که افرادی که به‌خصوص از شهرهای اطراف برای کار روزانه به تهران رفت‌وآمد می‌کنند، در نزدیکی محل زندگی‌شان فرصت اشتغال داشته باشند.

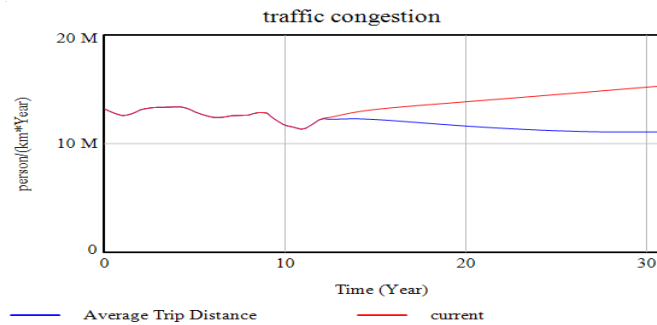
در صورتی که با این دو سیاست متوسط مسافت سفرها به شکل نمودار آبی‌رنگ بالا ایجاد کند، ازدحام ترافیکی و میانگین سرعت شبکه به شکل زیر می‌شود. رنگ آبی نمودار مربوط به اجرای این سناریو است.

۴- کاهش متوسط مسافت سفرها: این سیاست که با متغیرهای **"Local work&school-housing balance"** و **"Providing more mixed land use (TOD)"** نمایش داده می‌شود، در واقع با همین دو راهکار محقق می‌شود.

سیاست توسعه مبتنی بر حمل و نقل همگانی: توسعه مبتنی بر حمل و نقل همگانی (**Transit Oriented Development**) عبارت است از یک الگوی مترکم کاربری زمین شامل مسکن، پارک‌های عمومی و میدین، کاربری‌های تجاری و خدماتی که همگی در امتداد نقاط کلیدی سامانه حمل و نقل همگانی (مترو) واقع شده باشند.



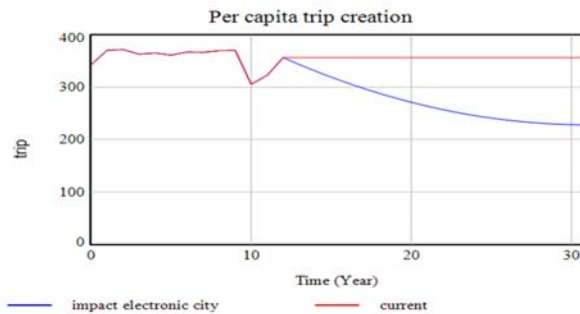
شکل ۲۱. کاهش متوسط مسافت سفر



شکل ۲۲. رفتار ازدحام ترافیکی با کاهش متوسط مسافت سفر

می‌شود با ایجاد و استفاده از شهر الکترونیک سرانه ایجاد سفر تا حدی کاهش یابد. شهر الکترونیک عبارت است از ارائه دسترسی الکترونیکی شهروندان به سازمان‌های اداری یک شهر برای رفع تمامی نیازهای آن‌ها به صورت شبانه‌روزی و هفت روز هفته به شیوه‌ای سریع، باثبات، قابل اطمینان، امن و محرمانه.

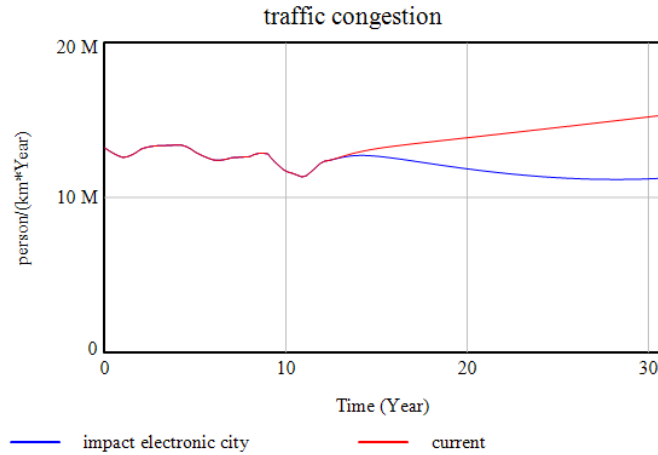
۵- کاهش سرانه ایجاد سفر از طریق ایجاد بستر شهر الکترونیک: این سیاست با متغیر *impact electronic city* نشان داده می‌شود و بر روی متغیر سرانه ایجاد سفر تأثیر می‌گذارد. برای این امر یک سناریو فرض می‌شود که با اجرای این سیاست سرانه ایجاد سفر به شکل نمودار زیر شود. در این سیاست فرض



شکل ۲۳. کاهش سرانه ایجاد سفر

به شکل زیر می‌شود. رنگ آبی نمودار مربوط به اجرای این سناریو است.

در صورتی که با این سیاست سرانه ایجاد سفرها به شکل نمودار آبی‌رنگ بالا شود، ازدحام ترافیکی و میانگین سرعت شبکه

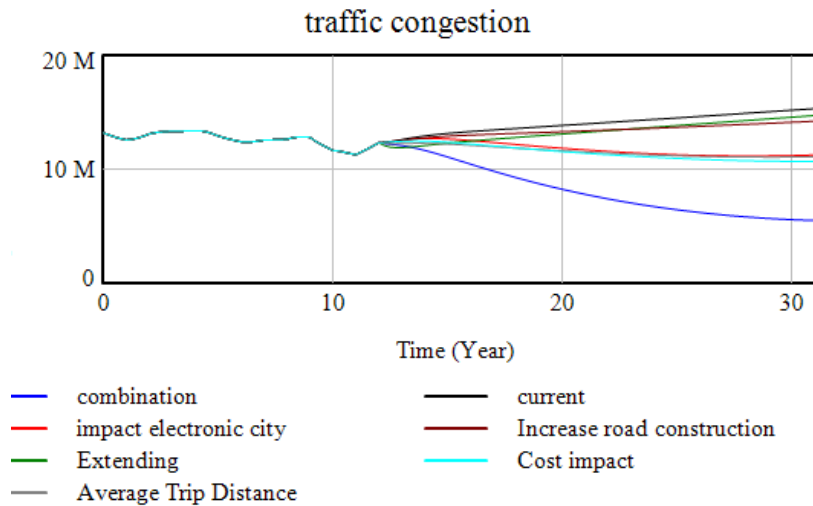


شکل ۲۴. رفتار ازدحام ترافیکی با کاهش سرانه ایجاد سفر

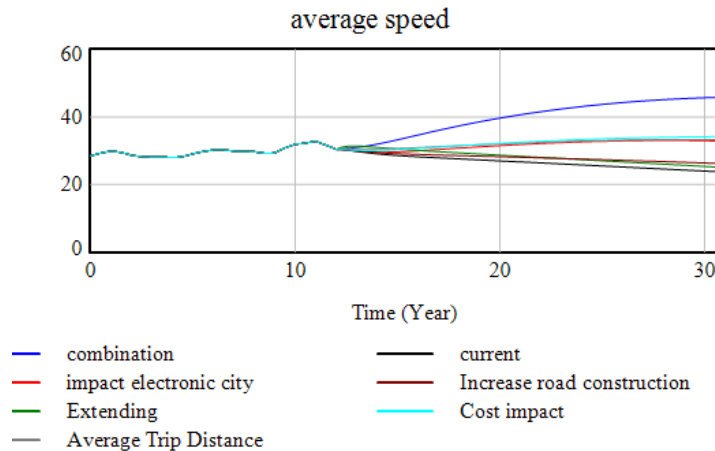
### ۵- نتیجه گیری

هزینه حمل و نقل شخصی، کاهش متوسط مسافت سفرها از طریق سیاست توسعه مبتنی بر حمل و نقل همگانی (TOD) و تعادل فاصله محل کار، تحصیل با محل زندگی و سیاست کاهش سرانه ایجاد سفر از طریق ایجاد شهر الکترونیک است. اکنون نتیجه ترکیب این سه سیاست به طور همزمان و تأثیر آن بر شاخص ترافیک نشان داده می شود. ترکیب همزمان این سیاست ها اثر به سزایی در ترافیک می تواند داشته باشد و سرعت متوسط شبکه را به بیش از ۴۰ کیلومتر بر ساعت می رساند.

همان طور که از بررسی نمودارها مشخص می شود سیاست افزایش طول معابر شهری و افزایش طول خط مترو به تنهایی، کم اثر ترین سیاست ها در بلندمدت می باشند. علت این امر این است که با افزایش طول خط مترو یا افزایش طول معابر، ترافیک ابتدا کاهش یافته ولی به دلیل افزایش جذابیت حمل و نقل شخصی، استفاده از حمل و نقل شخصی افزایش یافته و مجدداً ترافیک افزایش خواهد یافت. سودمندترین سیاست ها، سیاست افزایش نرخ تبدیل تقاضا به حمل و نقل عمومی از طریق افزایش



شکل ۲۵. رفتار ازدحام ترافیکی با در نظر گرفتن ۳ سیاست موثر به صورت همزمان



شکل ۲۶. رفتار سرعت متوسط با در نظر گرفتن ۳ سیاست موثر به صورت هم‌زمان

## ۷-مراجع

-Haghshenas, H., M. Vaziri, and A. Gholamialam, (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, 45, 104-115.

-Xue, Y .,et al., (2020). System dynamics analysis of the relationship between transit metropolis construction and sustainable development of urban transportation-case study of nanchang city, China. *Sustainability (Switzerland)*, 2020. 12. (7)  
 -Suryani, E., et al., (2020). System dynamics simulation model for urban transportation planning: A case study. *International Journal of Simulation Modelling*, 19(1): 5-16.

-Sayyadi, R. and A. Awasthi, (2020). An integrated approach based on system dynamics and ANP for evaluating sustainable transportation policies. *International Journal of Systems Science, Operations and Logistics*, 7(2), 182-191.

- Zhang, W., (2022). Countermeasures for Urban Traffic Congestion in China from the Perspective of System Dynamics. *Computational Intelligence and Neuroscience*.

-فرتوک زاده، حمیدرضا. و میثم رجیبی نهوجی (۱۳۹۱). مدل سازی پویای ترافیک کلانشهرها به منظور ارائه سیاست‌های بهبود حمل و نقل (نمونه موردی کلانشهر تهران). *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۹، (۹)، ۱ (پیاپی ۳۰)، ۶۳-۸۱.

-استادی جعفری، مهدی. و امیرعباس. رصافی، (۱۳۹۲). ارزیابی سیاست‌های توسعه پایدار در بخش حمل و نقل شهری با استفاده از مدل‌های سیستم پویایی؛ مطالعه موردی: شهر مشهد. *مدیریت شهری*، ۱۱(۳۱).

-احمدوند، علی محمد و زینب محمدیانی و حدیثه خدادادی ابیازنی مدل سازی پویای سیستم حمل و نقل شهری پایدار به منظور اصلاح و بهبود ترافیک. *پژوهش‌های مدیریت در ایران*، ۱۹(۲).

# Traffic Modeling in Tehran City and Investigating Its Sustainable Improvement Solutions with Systems Dynamics Approach

*Mohsen Pourseyed Aghaee, Assistant Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Saeed Nabizadeh, M.Sc., Grad., School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: maghaee@iust.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## ABSTRACT

One of the biggest and main problems of cities, especially big cities, is the problem of urban traffic. Considering the effects of urban traffic on various dimensions of citizens' lives and the importance of transportation as the pulse of the life of cities, it is very important to determine strategies and policies to control and reduce traffic. Also, following the issue of urban transportation, issues such as air pollution, fuel consumption and traffic congestion are also raised. In this research, firstly, the dynamic modeling of traffic behavior in big cities and the required definitions are discussed, then the model is simulated with the data of Tehran city, and finally, policies are presented to improve traffic in Tehran city. To obtain the relationship between the variables, the regression method and interviews with elites have been used. Among the simulated policies, the policy of increasing the length of urban passages is the least effective, and the results of the model show that increasing the length of the metro line alone will not reduce long-term traffic in cities. The best policies also include the policy of increasing the cost of using personal transportation, the policy of creating an electronic city, the Transit Oriented Development (TOD) and the balance of the distance between the workplace and education and the place of residence.

**Keywords:** Urban Traffic, System Dynamics, Urban Policy Making, Traffic Modeling