Archive of SID

نشریه‌ی علمی-پژوهشی شهر ایمن
JOURNAL OF RESILIENT CITY
(JRC)

پیش‌بینی تقاضای حمل و نقل پایدار شهری در راستای مدیریت و ارتقای ایمنی شبکه معابر با استفاده از رویکرد پویایی شناسی سیستم‌ها: مطالعه موردی تهران.

پگاه نوروزیان ملکی[1*]؛حمیدرضا ایزدبخش[2]؛ نسیم غنبرطهرانی[2]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع گرایش سیستم‌های اجتماعی و اقتصادی؛ دانشگاه خوارزمی، تهران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی صنایع؛ دانشگاه خوارزمی، تهران.

واژگان کلیدی

پیش‌بینی تقاضای سفر
حمل و نقل پایدار شهری
ارتقای ایمنی
تجزیه و تحلیل سیاست‌ها
پویایی‌شناسی سیستم‌ها

چکیده

امروزه رشد شهرنشینی باعث تراکم جمعیت می‌شود و جمعیت مناطق شهری همواره به منظور انجام فعالیت-های روزانه با مساله تقاضای سفر مواجه هستند. این امر در کلانشهرها از جمله تهران بسیار حیاتی است. مهمترین مساله در تهران این است که همواره تقاضای سفر با وسایل نقلیه شخصی بالاتر از وسایل نقلیه عمومی مانند مترو و اتوبوس می‌باشد و با توجه به بالا بودن تقاضا با حمل و نقل شخصی میزان آسیب‌ها، حوادث و سوانح و مرگ و میر نیز بالا خواهد بود بنابراین ارتقای ایمنی شهروندان در شبکه معابر شهری حیاتی است. در این مطالعه به منظور بررسی رفتار متغیرهایی که بر تقاضای سفر در تهران تاثیر می‌گذارد مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی شامل چهار زیر سیستم جمعیت، تقاضای سفر، سرمایه گذاری در حوزه حمل و نقل و تراکم ترافیک می‌باشد که براساس زیرسیستم‌های پیشنهادی مدل جریان-انباشت ساخته شده، پس از پیاده سازی روابط ریاضی، شبیه‌سازی، و در نهایت مدل ساخته شده اعتبارسنجی شده است. همچنین با استفاده از مدل پیشنهادی، شبیه‌سازی سناریوهای متعددی را با استفاده از داده‌های واقعی شهر تهران شبیه‌سازی انجام شده است. از جمله سیاست‌های پیشنهادی می‌توان به کنترل کرایه‌ها، توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی و ریلی، کاهش استفاده از اتومبیل های شخصی و کنترل قیمت سوخت اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده اثربخشی سیاست‌های پیشنهادی است. با توجه به این مطالعه، کنترل قیمت کرایه و توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی و ریلی، سیاست‌های مؤثرتری در راستای مدیریت تقاضای سفر و ارتقای ایمنی شبکه معابر هستند.

مقدمه

رشد شهرها پیش‌بینی تقاضای سفر و بهره‌وری زیرساخت‌های حمل و نقل را به یک وظیفه جدی برای مدیران حمل و نقل و برنامه‌ریزان شهری ساخته است (Janelle et al, 2004، Núñez et al, 2010 و Norouzian et al, 2018). درک تقاضای سفر برای برنامه ریزی حمل و نقل به طور کلی مهم است و مساله مهم‌تر مدیریت تقاضای سفر است که شامل استراتژی های مختلفی است که بر رفتار مسافرت تاثیر می‌گذارد . عوامل بسیاری مانند جمعیت، کیفیت و قیمت تسهیلات می‌توانند بر روی تقاضای سفر تأثیر می‌گذارند و از آنجایی که تقاضای سفر به طور مستقیم تحت تاثیر جمعیت قرار دارد، تقاضای مشتق شده نامیده می‌شود. از سوی دیگر، ایجاد زیرساخت ارتباطی و دستیابی به شبکه حمل و نقل و ترافیک پیشرفته و یکپارچه، زمینه‌ی ارتقا ایمنی شبکه معابر را فراهم می‌کند یکی از عوامل مهم ارتقاء ایمنی معابر شهری، توجه به همه ریز مسائل موجود در چهارچوب برنامه ریزی و

* تهران - خیابان شهید مفتح نرسیده به انقلاب - پلاک ۴۹ - کد پستی ۱۵۷۱۹-۱۴۹۱۱ تلفن تماس: ۳-۸۸۳۲۹۲۲-۲۱-۹۸+. رایانامه: **std_pegahnorouzian@khu.ac.ir**

www.SID.ir

Archive of SID

طراحی شهری می باشد. معابر از سویی بایستی عامل اصلی جابجایی های شهر باشند و از سویی دیگر بایستی تمام عوامل پیشگیری کننده حوادث در آنها لحاظ شده باشد (احمدی-بافنده، ۱۳۹۰). در گذشته، روش‌هایی نظیر مدل چهار مرحله-ای به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گرفت (Toole et al, 2015) و مدل های حمل و نقل موجود، جنبه‌های مختلف سیستم حمل و نقل (تقاضای سفر، حمل و نقل، آلودگی هوا و غیره) را مستقل از یکدیگر در نظر می‌گیرند. هنگامی که درک درستی از حمل و نقل افزایش یافت، به این نتیجه رسیدند که جنبه‌های حمل و نقل لازم است که به صورت یکپارچه مدل سازی شود. در این خصوص تلاش شد تا این مدل های غیر مرتبط را به یک سیستم منسجم تبدیل کند (Auld et al, 2015). سیستم حمل و نقل یک سیستم پیچیده با پارامترهای متعدد، حلقه های بازخورد بین زیرسیستم ها و عوامل موثر است که مولفه ها و تعاملات آن‌ها در طول زمان با یکدیگر در حال تعامل هستند Janelle et al, 2004 و Toole et al, 2015). در سیستم‌های پیچیده مانند سیستم‌های حمل و نقل، مشکلات در ساختار اصلی سیستم بوجود می‌آید و اقداماتی که می‌تواند برای مقابله با یک مشکل انجام شود ممکن است باعث ایجاد مشکل دیگری در جای دیگر شود. به منظور پیش بینی (Auld et al, 2015 و Abbas et al, 1994) تقاضای سفر این سیستم پیچیده، استفاده از رویکرد خطی مناسب نیست. روش های متعددی برای پیش بینی تقاضای سفر وجود دارد که در این تحقیق از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده شده استزیرا پویایی‌شناسی سیستم‌ها قادر به تجزیه و تحلیل رابطه بین مولفه‌ها، تعیین شاخص‌های عملکرد کلیدی و شبیه‌سازی اثرات تغییرات در متغیرها و سیاست‌ها است.

بخشهای مختلف در این مقاله به شرح زیر است: پس از ارائه پیشینه پژوهش، روش‌شناسی پژوهش که به بیان مسئله پویایی‌شناسی سیستم‌ها، تعیین مرز و نمودار زیرسیستم پرداخته می‌شود، ادامه مقاله شامل تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش از جمله ارائه نمودار جریبان انباشت، اعتبارسنجی، شبیه‌سازی مدل و ارائه سیاست‌های راهبردی و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادها می‌باشد.

پیشینه تحقیق

امیری و همکاران (۱۳۹۴)، به کمک رویکرد آینده‌پژوهی به بهینه‌سازی مدیریت شبکه‌ی حمل و نقل اضطراری کلان شهر تهران پس از سوانح پرداخته‌اند. شناخت تهدیدها و آسیب‌ها، یکی از مهم‌ترین عوامل دستیابی به آینده و آیندپژوهی به روش سناریونویسی، یکی از کارآمدترین روش‌های مطالعه آینده است. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از آینده‌پژوهی روش‌هایی متناسب با شیوه‌های برنامه‌ریزی حمل و نقل اضطراری شهری مطرح شود که شرایط مطلوب توسعه پایدار برآورده کند (امیری و همکاران، ۱۳۹۴). هزارخانی و همکاران (۱۳۹۴)، به بررسی علل نوسانات قیمت گوشت مرغ را با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم‌ها پرداخته‌اند و بیان کرده‌اند مهم‌ترین عامل بروز نوسان در قیمت گوشت مرغ، مربوط به بازخوردهای عرضه و تقاضا است که شامل چهار بازخورد مهم اثرگذاری تقاضا، اثرگذاری عرضه داخلی، اثرگذاری واردات و اثرگذاری هزینه‌های تولید می‌باشد که منجر به تغییرات قیمت می‌شود. براساس این بازخوردها نمودار جریان-انباشت ساخته شده و براساس معادلات ریاضی پیاده شده، مدل شبیه‌سازی شده است. از جمله پیشنهادات تحقیق فوق، بکارگیری سیاست‌های کاربردی به منظور کنترل کردن بازار گوشت مرغ و جلوگیری از صدمه‌های ناشی از نوسانات قیمت و در نظر گرفتن شرایط بحرانی می‌باشد (هزارخانی و همکاران، ۱۳۹۴). ربیعه و همکاران (۱۳۹۶)، مساله‌ی رایج نوسان موجودی‌ها در زنجیره‌ی تامین را که باعث تحمیل هزینه‌های اضافی به سازمان‌های تولیدی می-شود، تحلیل کردند و به دنبال کاهش این هزینه‌ها بوده‌اند چرا که این کاهش می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری در تولید شود. به این منظور از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده کردند. سیستم مورد مطالعه ایشان، شامل چهار بخش اصلی تامین کننده قطعات، تامین کننده مواد اولیه، کنترل موجودی مواد اولیه تأمین کنندگان قطعات و بخش تأمین مالی سفارشهای مواد اولیه می‌باشد که با توجه به بخش‌های فوق نمودار جریان-انباشت را ساخته و شبیه‌سازی نموده‌اند. پس از اعتبارسنجی مدل ساخته شده، سه سیاست اشتراک گذاری اطلاعات، استفاده از بافر موجودی و ترکیب سیاست اول و دوم را به کار بردند. پس از اعمال سیاست‌های فوق دامنه نوسان موجودی کاهش یافته است (*Rabieh et al, 2017*). استادی جعفری و همکاران (۱۳۹۲)، در مقاله خود با استفاده از مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها وضعیت حمل و نقل شهر

www.SID.ir

Archive of SID

مشهد را مدل‌سازی و تحلیل کرده‌اند. در مدل آن‌ها روابط بین متغیرهای حمل و نقل پایدار بیان گردیده و در نهایت سه سیاست افزایش بهای سوخت سواری شخصی، قیمت گذاری ساعتی پارکینگ و قیمت گذاری ورود به محدوده‌ی طرح ترافیک در دوره دراز مدت پیشنهاد شده است. به علت اثر چشم‌گیر سیاست قیمت گذاری پارکینگ، اثر ترکیبی این سیاست با هر یک از سیاست‌های هزینه ورود به محدوده طرح ترافیک و سیاست افزایش بهای سوخت تاثیر معناداری بر شاخص هزینه‌های تحمیل شده بر جامعه و محیط زیست دارد، حال آنکه ترکیب دو سیاست دیگر (سیاست‌های قیمت گذاری ورودی و افزایش بهای سوخت) تاثیر چندانی بر این شاخص نداشته است. سیاست افزایش هزینه سوخت در مقایسه با سایر سیاست‌های مطالعه، به تنهایی منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های تحمیل شده به جامعه در دوره ۲۰ ساله، از طریق کاهش استفاده از وسایل نقلیه شخصی نشده و این مقدار با رشد نزولی ضعیف، تقریبا ثابت باقی می‌ماند. به نظر می‌رسد، بهای سوخت و سطوح آن نسبت به سایر سیاست‌های این مطالعه قابل ملاحظه نبوده و این سیاست در تغییر شیوه سفر شهروندان به استفاده از وسایل نقلیه همگانی موثر نبوده است. مدل ارائه شده در این مقاله با اینکه تعداد متغیرهای بسیار بالایی دارد، اما حلقه‌های در نظر گرفته شده در آن نسبتاً ناکافی و روابط علی و معلولی در نظر گرفته شده بین متغیرها در برخی موارد مبهم است. همچنین روابط ریاضی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی نیز سازگاری واحد ندارد (استادی جعفری و همکاران، ۱۳۹۲). جیفنگ[1] و همکاران (۲۰۰۸)، در مقاله خود سیستم حمل و نقل شهری را براساس رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها مدل کرده و کاربرد آن را نشان داده‌اند و اینگونه بیان کرده‌اند سیستم حمل و نقل شهری یک سیستم پیچیده با متغیرهای متعدد و حلقه های بازخورد غیر خطی و تحت تاثیر عوامل حمل و نقل، اجتماعی، اقتصادی و محیطی است. مدل پیشنهادی ایشان، شامل ۷ زیرسیستم است: جمعیت، توسعه اقتصادی، تعداد وسایل نقلیه، تاثیرات محیطی، تقاضای سفر، عرضه حمل و نقل و ازدحام ترافیک. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های شهر دالیان چین شبیه‌سازی شده است و در مدل خود ۵ سیاست به منظور توسعه وسایل نقلیه پیشنهاد داده‌اند. از جمله محدودیت‌های مقاله فوق می‌توان به عمیق نبودن متغیرها و پارامترها و واقع بینانه و ساده نبودن سیاست ها اشاره کرد (*Jifeng et al, 2008*). سوریانی[2] و همکاران، به منظور پیش‌بینی تقاضای سفر هوایی و گسترش ظرفیت ترمینال مسافر مدل مبتی بر پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه داده‌اند. وی در مقاله خود، چگونگی ایجاد یک مدل برای پیش‌بینی تقاضای مسافر هواپیما و ارزیابی برخی سیاست‌های مربوط به گسترش ظرفیت باند فرودگاه و ترمینال مسافر برای رسیدگی به تقاضای آینده، بررسی کرده است و به این نتیجه رسیده‌اند که چارچوب پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌تواند برای مدل سازی، تجزیه و تحلیل، تولید سناریو برای افزایش عملکرد سیستم به دلیل توانایی آن برای نشان دادن جریان-های فیزیکی و اطلاعات بر اساس کنترل بازخورد اطلاعات که به طور مداوم به تصمیم ها و اقدامات تبدیل می‌شود، استفاده شود. دریافتند که کرایه هواپیما، سطح خدمات، تولید ناخالص داخلی، جمعیت، تعداد پرواز در روز و زمان فرود نقش تعیین کننده ای در تعیین حجم مسافر هوایی، استفاده از باند فرودگاه و کل منطقه اضافی مورد نیاز برای گسترش ظرفیت ترمینال مسافربری اثر می‌گذارد (*Suryani et al, 2010*). سیادی[3] و همکاران ، یک مدل شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی-شناسی سیستم‌ها را برای ارزیابی سیاست های نظارتی برای برنامه ریزی حمل و نقل پایدار ارائه داده‌اند. رویکرد پیشنهادی به مدل‌ساز اجازه داده است تا به صورت کمی عملکرد سیستم و اثر سیاست های نظارتی مانند به اشتراک گذاری سفر و مالکیت خودرو را ارزیابی نماید. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که سیاست های مربوط به مالکیت خودرو، تاثیر بیشتری نسبت به سیاست های مربوط به اشتراک گذاری سفر در کاهش تعداد وسایل نقلیه خصوصی و افزایش حجم حمل و نقل عمومی دارد (*Sayyadi et al, 2017*). عباس[4] و همکاران، کاربرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها را در مدل‌سازی حمل و نقل نشان داده‌اند. تمرکز اصلی این مقاله بررسی و ارزیابی نقاط قوت و ضعف پویایی‌شناسی سیستم‌ها با توجه به تناسب و مناسب بودن آن در مدل‌سازی حمل و نقل می‌باشد. این ارزیابی کمک می‌کند به درک اینکه چگونه سبک مدل

[1] Jifeng et al.
[2] Suryani et al.
[3] Sayyadi et al.
[4] Abbas et al.

www.SID.ir

Archive of SID

سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌تواند ارتباط بین عناصر سیستم حمل و نقل را بهتر نشان دهد و این سهولت را ایجاد می‌کند که از پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌توان به عنوان ابزار مفید برای آزمایش سیاست های مرتبط با حمل و نقل استفاده کرد (*Abbas et al, 1994*). نام‌هی[5] و همکاران ، در مقاله خود به بررسی ارتباط بین حمل و نقل شهری و آلودگی هوا در سئول پرداخته‌اند. مهم‌ترین حلقه‌های این تحقیق به صورت مفهومی شامل ارتباط بین ۱) میزان ترافیک، میزان آلودگی هوا، کیفیت محیط زیست، سطح قوانین زیست محیطی و تقاضای حمل و نقل. ۲) میزان ترافیک، سرعت سفر، میزان آلودگی هوا، سطح قوانین زیست محیطی، کیفیت محیط زیست و تقاضای حمل و نقل. ۳) حجم ترافیک، سرعت سفر، ظرفیت حمل و نقل و تقاضای حمل و نقل. ۴) حجم ترافیک، سرعت سفر، تقاضا برای حمل و نقل و حجم ترافیک است. علاوه بر بیان اصلی‌ترین حلقه‌ها و مدل نهایی، میزان انتشار هر یک از گازهای ناشی از مصرف بنزین و گازوئیل به عنوان متداول‌ترین سوخت‌ها در بخش حمل و نقل است، ذکر گردیده است اگر چه مدل تحقیق شبیه‌سازی نشده‌است و محققان یک مدل علی-معلولی اکتفا کرده‌اند (*Nam Hee et al, 2001*).

در این مقاله، مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها، بر مساله پیش بینی تقاضای سفر با پیچیدگی در تهران تمرکز دارد که شامل چهار زیرسیستم اصلی الف) زیرسیستم جمعیت، ب) زیرسیستم تقاضای سفر، ج) زیرسیستم سرمایه گذاری در حوزه حمل و نقل، و د) زیر سیستم تراکم ترافیک است. اولین بار است که یک مدل پویایی شناسی سیستم‌ها برای پیش بینی تقاضای سفر تهران به منظور مدیریت شهری با توجه به تعاملات چهار زیرسیستم و در نظر گرفتن حمل و نقل عمومی (اتوبوس) و حمل و نقل ریلی (مترو) به صورت جداگانه توسعه داده شده است. مزیت قابل توجه مدل این است که علاوه بر جمعیت، متغیر جذابیت برای هر نوع حمل و نقل را در نظر می‌گیریم که بر تقاضای سفر اثر می‌گذارد. در واقع متغیرهایی مانند زمان سفر، سرمایه گذاری در حمل و نقل و غیره بر روی جذابیت حمل و نقل تأثیر می‌گذارد. یکی دیگر از مزایای این مقاله ارائه چندین سیاست جدید قابل اجرا برای مدیریت تقاضای سفر است. کنترل کرایه‌ها، توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی (مترو و اتوبوس)، کنترل قیمت سوخت و کاهش استفاده از اتومبیل های خصوصی چهار سیاست پیشنهاد شده است که مورد بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است حمل و نقل عمومی به دو زیربخش حمل و نقل با مترو و اتوبوس تقسیم شده است و تحت عنوان‌های حمل و نقل عمومی و حمل و نقل ریلی معرفی شده‌اند.

مبانی نظری

شهرنشینی بیش از ۵ هزار سال قدمت دارد. تا سال ۱۹۰۰ از هر هشت نفر، فقط یکی در مناطق شهری زندگی می‌کرد، اما در پایان قرن کنونی نیمی از جمعیت جهان شهرنشین می‌باشند. دو سوم از این جمعیت در کشورهای جان سوم زندگی می‌کنند (*Gilbert, 1992*). توسعه شهرنشینی در واقع همان افزایش جمعیت شهر است. بسیاری از فیزیکدانان از جمله پیترهاگت معیارهای زیر را برای تشخیص شهرنشینی به‌کار می‌برند: نسبت جمعیت ساکن در مراکز شهری به کل جمعیت، نسبت رشد جمعیت ساکن در مراکز شهری به کل جمعیت، تعداد افراد ساکن در مراکز شهری یک ناحیه، افزایش تعداد افراد ساکن در مراکز شهری یک ناحیه، گسترش طبیعی محدوده‌ی شهری، عوامل اجتماعی که به وسیله شهرنشینی برای یک جمعیت در نظر گرفته می‌شود. در نهایت می‌توان گفت مفهوم شهرنشینی از اصطلاحات مبهم است و تعریف صریحی از آن ارائه نشده است. گسترش شهرنشینی به عنوان یک پدیده معمول در جوامع، موجب توجه به شهر به عنوان یکی از مسائل مهم جامعه‌شناسی گردیده است (ممتاز، ۱۳۸۱). در کلان شهر تهران، میزان شهرنشینی در سال ۱۳۹۰ معادل ۹۹/۶ درصد بوده است که در سال ۱۳۹۵ به میزان ۹۹/۵ درصد رسیده است (نتایج کلی سرشماری عمومی نفوس و مسکن، ۱۳۹۵).

ویژگی عصر ما شهرنشین شدن جمعیت، افزایش جمعیت شهرها و به تبع آن توسعه شهرهای کوچک و بزرگ است. مقوله توسعه پایدار شهری در سال‌های اخیر به عنوان یک موضوع مهم علمی در کلیه جوامع مطرح بوده و بخش وسیعی از ادبیات شهری را به خود اختصاص داده است. از نظر لمن قرن بیست و یکم، مواجه با بحث جدال انگیز توسعه پایدار با الویت توسعه پایدار شهری خواهد بود. بر این اساس، شهرها

[5] Hee et al.

www.SID.ir

Archive of SID

را می‌توان موتور رشد جوامع نامید (مفیدی شمیرانی و همکاران، ۱۳۸۸). هم‌چنان که به عقیده‌ی مک‌نیل توسعه پایدار به میزان گسترده‌ای با شهر ارتباط پیدا می‌کند که از دلایل این ارتباط می‌توان توزیع جمعیت، نقش دولت‌ها، تولید، مصرف کالا و خدمات را نام برد (*McNeil, 1991*). دکتر عزیزی شهر پایدار را چنین عنوان می‌کند: « شهر پایدار شهری است که در آن بهبود در عدالت اجتماعی، تنوع و امکان زندگی با کیفیت مطلوب تحقق یابد. فرم پایدار نیز فرمی است که در آن منابع کمتری از جمله انرژی مصرف شود. شبکه‌های شهری کاراتر و قابلیت بالا برای زندگی انسان را دارا باشند» (عزیزی، ۱۳۸۰). از این رو سیاست‌های شهری می‌بایست از هر نظر پایدار باشند.

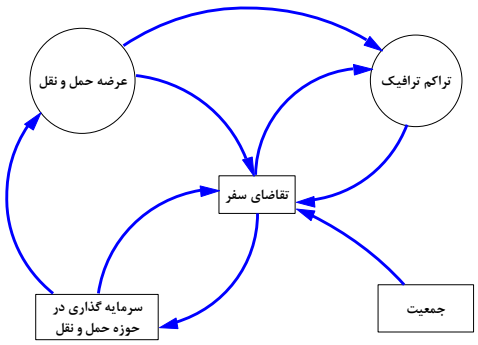
جامعه ایمن جامعه محلی است که برنامه مستمر و دراز مدت پیشگیری از آسیب در محیط‌های پرخطر انجام می‌شود و متشکل از مجموعه‌ای از سازمان‌های دولتی، غیردولتی، بین-المللی، مردمی و خصوصی است که در کنار هم بطور مشارکتی فعالیت می‌نمایند. این برنامه به طور مداوم فراوانی و علل آسیب‌ها را متندسازی نموده و با شاخص‌هی از پیش تعیین شده، ارزشیابی می‌گردد (احمدی‌بافنده، ۱۳۹۰).

روش تحقیق

در این مطالعه، پویایی‌شناسی سیستم‌ها براساس شبیه‌سازی مدل برای پیش‌بینی تقاضای سفر در تهران مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پویایی شناسی سیستم‌ها توسط فارستر[6] از *MIT* در دهه ۱۹۵۰ معرفی شده است. پویایی شناسی سیستم‌ها یک روش شناسی و مدل سازی ریاضی است تا رفتار سیستم های پیچیده را در طول زمان پیدا کند. مدل‌های مبتنی بر پویایی-شناسی سیستم‌ها با حلقه‌های بازخورد، همراه با تکنولوژی شبیه‌سازی کامپیوتری (*Sterman, 2000*) و رویکردی مناسب مدل‌های کمی و کیفی است (*Shepherd, 2014*). روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها با درنظر گرفتن حلقه‌های بازخورد، متغیرها و معادلات درک می‌شود. این روش عمدتا شامل سه نوع متغیر است: ۱) متغیر نرخ، نشان دهنده جریان فیزیکی یا اطلاعات در یک سیستم است؛ ۲) متغیر انباشت (سطح)، اساسا برابر با مقدار همان سطح در نقطه قبل در زمان و همچنین جریان ورود / خروج خالص در دوره‌های مداوم است؛ ۳) متغیرهای کمکی، عمدتا برای جمع آوری اطلاعات برای محاسبه نرخ‌ها مورد نیاز است. سه نوع متغیر با معادلات به شکل انتگرال، دیفرانسیل یا سایر انواع شکل می‌گیرند (*Abbas et al, 1994* و *Vafa-Arani, 2014*). از آنجا که سیستم حمل و نقل شهری پیچیده است، استفاده از روش معمول خطی برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل مناسب نیست. بنابراین، از روش پویایی شناسی سیستم‌ها استفاده خواهیم کرد.

مرز این مدل، کل مساحت شهر تهران است و مدت زمان مورد نظر برای مدل سازی پویا از سال ۱۳۸۶ تا ۱۴۱۰ است. ساختار مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای پیش بینی تقاضای سفر شامل چهار زیر سیستم است: زیر سیستم جمعیت، زیر سیستم تقاضای سفر، زیر سیستم سرمایه گذاری در حوزه حمل و نقل و زیر سیستم تراکم ترافیکی است. شکل ۱ روابط زیر سیستم‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۱ دیده می-شود که رشد جمعیت موجب افزایش تقاضای سفر می‌شود. افزایش تراکم ترافیکی تحت تاثیر رشد تقاضای سفر می‌باشد. از سوی دیگر، سرمایه گذاری در حوزه حمل و نقل که از رشد تقاضای سفر شکل می‌گیرد به توسعه شبکه جاده‌ای منجر و تحرک بیشتر برای خدمات حمل و نقل عمومی، حمل و نقل ریلی و دسترسی بهتر و در نتیجه تقاضای سفر افزایش می‌یابد.



شکل ۱- روابط بین زیرسیستم‌ها

افزایش ظرفیت جاده در کوتاه مدت باعث کاهش میزان تراکم می‌شود، اما در بلند مدت باعث افزایش تراکم ترافیک می‌شود. همچنین، تراکم ترافیک بر تقاضای سفر تأثیر می‌گذارد، زیرا

[6] Forrester

www.SID.ir

Archive of SID

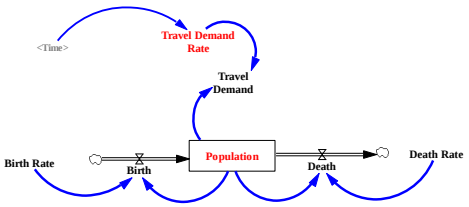
ترافیک باعث افزایش زمان سفر و زمان سفر بر روی تقاضا اثر می‌گذارد.

زیر سیستم‌ها

در این بخش، متغیرها شناسایی می‌شوند و معادلات مربوط به آن‌ها بر اساس بازخورد و حلقه های علت و معلولی تعیین می‌شوند. در ادامه به تشریح جزئیات هر سیستم پرداخته می‌شود.

زیر سیستم جمعیت

مردم در زندگی شهری نقش مهمی ایفا می‌کنند و رشد شهرنشینی، باعث افزایش غیر طبیعی جمعیت می‌شود. از طرف دیگر تقاضای سفر مستقیماً تحت تاثیر جمعیت است. در این زیر سیستم کل جمعیت را به عنوان متغیر انباشت، تولد و مرگ و میر به عنوان متغیر جریان و نرخ تولد و نرخ مرگ و میر هم به عنوان متغیر کمکی انتخاب شده است (شکل ۲).



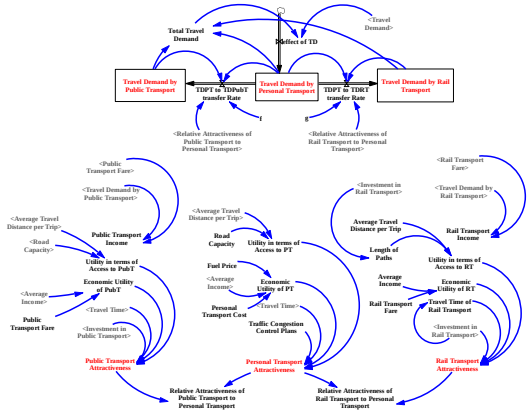
شکل ۲- زیرسیستم جمعیت

زیرسیستم تقاضای سفر

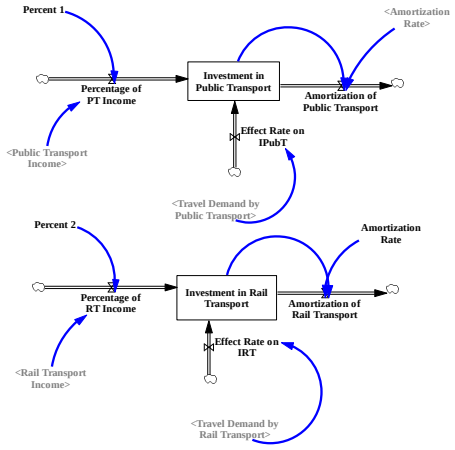
تقاضای سفر به طور مستقیم تحت تاثیر جمعیت قرار دارد و تقاضای مشتق شده نامیده می‌شود. تقاضا به سه زیربخش تقسیم شده است: ۱) تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی، ۲) تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی (اتوبوس) و ۳) تقاضای سفر با حمل و نقل ریلی (مترو). در ابتدا جمعیت اثرگذار بر روی تقاضای سفر مایل به سفر با ماشین‌های شخصی هستند که براساس شکل‌گیری جذابیت، تقاضا به سمت تقاضای سفر با مترو و اتوبوس جریان پیدا می‌کند. متغیرهایی مانند سرمایه‌گذاری، زمان سفر، مطلوبیت اقتصادی و غیره بر جذابیت حمل و نقل تاثیر می‌گذارد (شکل ۳).

زیرسیستم سرمایه‌گذاری در حوزه حمل و نقل

سرمایه‌گذاری یک عامل مهم است که بر جذابیت حمل و نقل تاثیر می‌گذارد؛ سرمایه‌گذاری در حمل و نقل به دو زیربخش تقسیم شده است: ۱) سرمایه‌گذاری در حمل و نقل عمومی و ۲) سرمایه‌گذاری در حمل و نقل ریلی. سرمایه‌گذاری در حمل و نقل شامل توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی و ریلی می‌شود. سرمایه گذاری در حمل و نقل تحت تاثیر تقاضای سفر قرار دارد و همچنین درصدی از درآمد حمل و نقل هم بر آن تاثیر می‌گذارد. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنیم، سرمایه‌گذاری در حمل و نقل عمومی و ریلی به عنوان متغیر انباشت در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، نرخ استهلاک هم در این زیر سیستم در نظر می‌گیریم. (شکل ۴).



شکل ۳- زیرسیستم تقاضای سفر



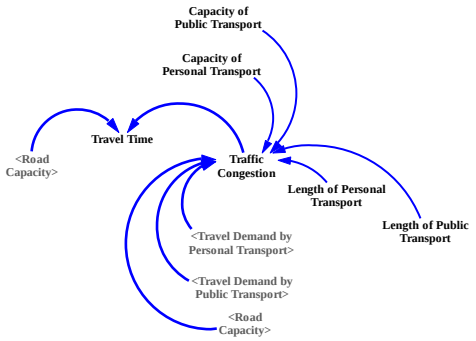
شکل ۴- زیرسیستم سرمایه‌گذاری در حوزه حمل و نقل

www.SID.ir

Archive of SID

زیرسیستم تراکم ترافیک

متغیر تراکم ترافیک را به عنوان یک متغیر کمکی در نظر می‌گیریم و تحت تاثیر متغیرهایی مانند تقاضای سفر و ظرفیت جاده‌ها قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، تراکم ترافیک و ظرفیت جاده بر زمان سفر تاثیر می‌گذارد (شکل ۵).



شکل ۵- زیرسیستم تراکم ترافیک

اعتبارسنجی

به منظور استفاده‌ی کاربردی از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مدل باید اعتبارسنجی شود. اعتبارسنجی مدل‌های پویایی-شناسی سیستم‌ها، فرآیندی برای ایجاد اطمینان نسبت به درستی و سودمندی مدل به عنوان نوعی ابزار سیاست‌گذاری است برای آزمون مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. در این بخش به منظور اطمینان از کارکرد مدل دینامیکی و میزان توانایی مدل در بازتاب رفتار واقعی سیستم مورد مطالعه، از مهم‌ترین آزمون‌های ساختاری برای اعتبارسنجی مدل سا خته شده، استفاده می‌شود.

آزمون آماری

توجه اصلی این آزمون‌ها معطوف است به اینکه آیا رفتار مدل از لحاظ آماری شبیه به داده‌های سیستم واقعی است یا خیر؟ در ادامه یک نمومه از آزمون‌های آماری ارائه می‌شود.

به منظور اعتبارسنجی از لحاظ آماری، دو شاخص درصد خطای مجذورات و ضریب نابرابری محاسبه می‌شود. براساس این شاخص‌ها میزان تفاوت بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده مشخص می‌شود و هر چه میزان خطای اندازه‌گیری شده کمتر باشد، نتایج شبیه‌سازی بیشتر مورد اعتماد قرار می‌گیرد [23].

نتایج روابط بالا برای مدل تحقیق در جداول ۱، ۲ و ۳ مشخص شده است.

جدول ۱- مقایسه داده‌های واقعی با نتایج شبیه‌سازی تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی

مقدار شبیه سازی شده	داده‌های واقعی	تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی
3507650000	*3507650000*	۱۳۸۶
3477354752	*3507650000*	۱۳۸۷
3516822016	*3666060000*	۱۳۸۸
3665841152	*3756580000*	۱۳۸۹
3864254976	*3847100000*	۱۳۹۰
4044176896	*3937620000*	۱۳۹۱
4188047872	*4005510000*	۱۳۹۲
4311925760	*4073400000*	۱۳۹۳
4393681920	*4141290000*	۱۳۹۴
RMSPE	3/694951	
IT	0/028380368	

جدول ۲- مقایسه داده‌های واقعی با نتایج شبیه‌سازی تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی

نتایج شبیه سازی	داده های واقعی	تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی
۱۱۳۱۵۰۰۰۰۰	۱۱۳۱۵۰۰۰۰۰	۱۳۸۶
۱۱۴۴۹۴۵۹۲۰	۱۱۳۱۵۰۰۰۰۰	۱۳۸۷
۱۱۵۸۳۸۵۴۰۸	۱۱۸۲۶۰۰۰۰۰	۱۳۸۸
۱۱۷۲۳۳۲۸۰۰	۱۲۱۱۸۰۰۰۰۰	۱۳۸۹
۱۱۸۷۱۶۵۹۵۲	۱۲۴۱۰۰۰۰۰۰	۱۳۹۰
۱۲۰۲۹۹۸۲۷۲	۱۲۷۰۲۰۰۰۰۰	۱۳۹۱
۱۲۱۹۶۶۶۹۴۴	۱۲۹۲۱۰۰۰۰۰	۱۳۹۲
۱۲۳۷۰۶۰۶۰۸	۱۳۱۴۰۰۰۰۰۰	۱۳۹۳
۱۲۵۵۰۵۴۵۹۲	۱۳۳۵۹۰۰۰۰۰	۱۳۹۴
۴/۵۴۶۳۶۲		RMSPE
۰/۰۳۳۸۴۳۳۵۸		IT

جدول ۳- مقایسه داده‌های واقعی با نتایج شبیه‌سازی تقاضای سفر با حمل و نقل ریلی

نتایج شبیه سازی	داده های واقعی	تقاضای سفر با حمل و نقل ریلی
۹۹۸۶۴۰۰۰۰	۹۹۸۶۴۰۰۰۰	۱۳۸۶
۱۰۱۸۴۵۷۷۲۸	۱۰۱۸۳۵۰۰۰۰	۱۳۸۷

www.SID.ir

Archive of SID

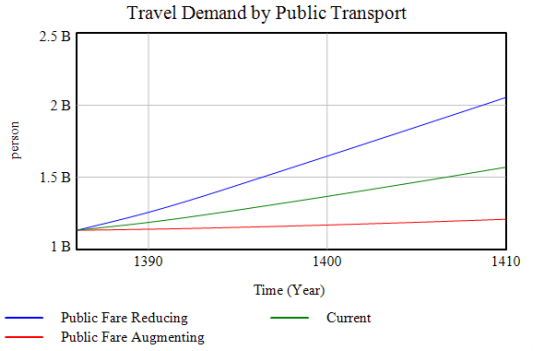
۱۳۸۸	۱۰۶۴۳۴۰۰۰۰	۱۰۳۸۷۲۲۵۶۰
۱۳۸۹	۱۰۹۰۶۲۰۰۰۰	۱۰۵۹۴۸۷۴۲۴
۱۳۹۰	۱۱۱۶۹۰۰۰۰۰	۱۰۸۰۷۹۵۶۴۸
۱۳۹۱	۱۱۴۳۱۸۰۰۰۰	۱۱۰۲۶۶۹۹۵۲
۱۳۹۲	۱۱۶۲۸۹۰۰۰۰	۱۱۲۵۱۱۳۳۴۴
۱۳۹۳	۱۱۸۲۶۰۰۰۰۰	۱۱۴۸۱۳۳۷۶۰
۱۳۹۴	۱۲۰۲۳۱۰۰۰۰	۱۱۷۱۷۳۹۰۰۸
RMSPE	۲/۷۹۴۲۰۳۸۱۵	
IT	۰/۰۲۰۳۰۷۱۲۴	

مطالعه موردی

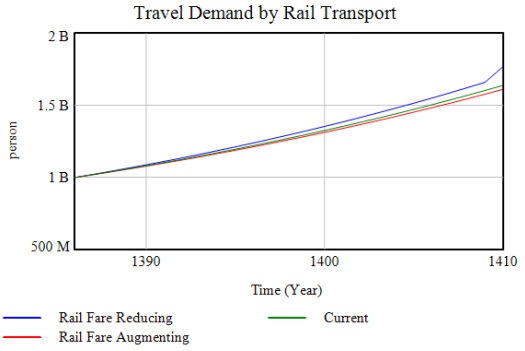
به منظور نشان دادن کاربرد واقعی مدل پیشنهادی پویایی-شناسی سیستم‌ها، تهران به عنوان یکی از پر جمعیت‌ترین شهرها در سراسر جهان، مطالعه موردی است که مدیریت تقاضای سفر یکی از مهمترین مسائل در شهر است. با توجه به شرایط فعلی، مردم تمایل به استفاده از حمل و نقل شخصی دارند، این بدان معنی است که تقاضای سفر با وسیله نقلیه شخصی معمولا بیشتر از استفاده از حمل و نقل عمومی و حمل و نقل ریلی است که باعث افزایش تراکم ترافیک می-شود. مدل پویای پیشنهادی به طور همزمان تمام ابعاد حمل و نقل را در بر می‌گیرد. رویکرد فوق، برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها، به داده های زیادی نیاز دارند که به این منظور از گزارش سالانه معاونت حمل و نقل و ترافیک تهران و شرکت بهره برداری راه آهن شهری تهران و حومه استفاده شده است. سعی شده است رفتار سیستم برای پیش‌بینی تقاضای سفر شهر تهران را در دهه آینده تحت سناریوهای مختلف شبیه-سازی شود. در این مطالعه، مدل پویایی شناسی سیستم‌های ارائه شده در *VENSIM PLE* شبیه‌سازی شده است.

یافته‌های تحقیق

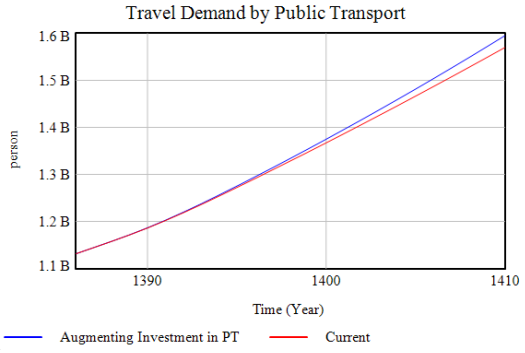
همانطور که قبلاً گفته شد، در این تحقیق، مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها بر اساس شبیه‌سازی به منظور پیش‌بینی تقاضای سفر در تهران ارائه می‌شود. مرز مدل کل شهر تهران است و دوره زمانی مورد نظر برای مدل‌سازی پویا از سال ۱۳۸۶ تا سال ۱۴۱۰ است یعنی زمان اجرا برای این مدل ۲۴ سال و *Time step* برای شبیه‌سازی ۰٫۰۶۲۵ سال است. پنج سناریو و سیاست به منظور افزایش تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی و ریلی پیشنهاد می‌شود به طوری که تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی کاهش یابد: ۱) کنترل کرایه حمل و نقل عمومی، ۲) کنترل کرایه حمل و نقل ریلی، ۳) توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی، ۴) توسعه کمی و کیفی حمل و نقل ریلی، ۵) کنترل قیمت سوخت.



نمودار ۱- اثر سیاست کنترل کرایه بر تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی



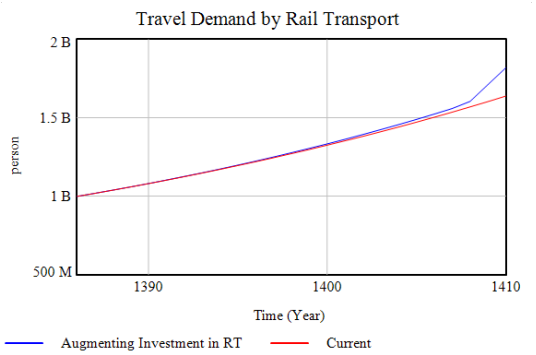
نمودار ۲- اثر سیاست کنترل کرایه بر تقاضای سفر با حمل و نقل ریلی



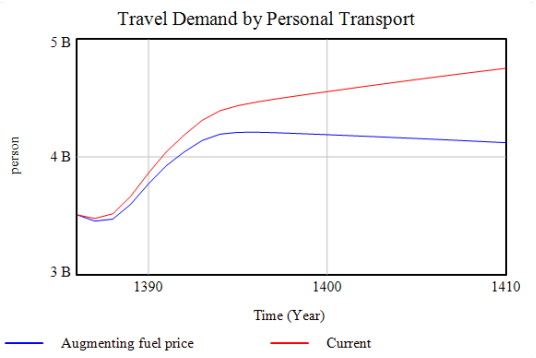
نمودار ۳- اثر سیاست توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی بر تقاضا

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار ۴- اثر سیاست توسعه کمی و کیفی حمل و نقل ریلی بر تقاضا



نمودار ۵- اثر سیاست کنترل قیمت بنزین بر تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی

نتایج سیاست‌ها در نمودارهای ۱ تا ۵ قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود، تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی، عمومی و ریلی در طول زمان افزایش می‌یابد. در همین راستا سیاست‌های مختلفی، به منظور بررسی اثر آن‌ها بر روی تقاضای سفر پیشنهاد شده است. به طوری که، با شناسایی سیاست مناسب تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی کاهش و تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی و ریلی افزایش یابد در نمودارهای ۱ و ۲، اثر سیاست افزایش و کاهش کرایه حمل و نقل عمومی و ریلی را بر تقاضا قابل مشاهده است. افزایش کرایه باعث کاهش تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی و ریلی می‌شود که در مقابل تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی افزایش می‌یابد که این از هدف تحقیق دور است. پس سیاستی که در اینجا توصیه می‌شود، سیاست کاهش کرایه می‌باشد چرا که روش مناسبی برای مدیریت تقاضای سفر است. در نمودارهای ۳ و ۴، اثر سیاست توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی و ریلی بر تقاضا دیده می‌شود و علت رفتار فوق این است که بخش حمل و نقل عمومی در طول سالیان گذشته نادیده گرفته شده است و عملکرد حمل و نقل عمومی سیر نزولی داشته است. طبیعی است که با توسعه حمل و نقل عمومی و ریلی میزان تقاضای هر کدام افزایش یابد. همچنین متناسب بودن هزینه‌ها با ارائه سوبسید و بهبود کمی و کیفی حمل و نقل عمومی و ریلی جهت توسعه استفاده از حمل و نقل عمومی و ریلی در راستای تحقق جامعه ایمن و ارتقای ایمنی بسیار موثر می‌باشد. طبق نمودار ۵، سیاست کنترل قیمت بنزین نقش مهمی در مدیریت تقاضای سفر دارد و اثر آن بیشتر از اثر سایر سیاست‌ها می‌باشد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، افزایش قیمت بنزین باعث کاهش تقاضای سفر با حمل و نقل شخصی می‌شود و در نتیجه مردم به استفاده از حمل و نقل عمومی و ریلی تشویق می‌شوند.

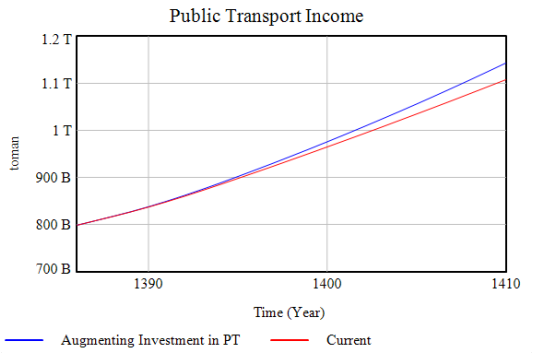
نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای مدل-سازی سیستم حمل و نقل شهری به منظور پیش‌بینی تقاضای سفر استفاد شده‌است. مطالعه موردی در این تحقیق کلان شهر تهران است با توجه به اینکه تهران به عنوان شهری که از تراکم جمعیت رنج می‌برد و پیش‌بینی و مدیریت تقاضای سفر پیچیده، دارای ارتباطات غیرخطی بین متغیرها و تاخیرهاست، پس پویایی‌شناسی سیستم‌ها رویکرد مناسبی برای پیش‌بینی تقاضای سفر و یافتن سیاست‌های موثر به منظور مدیریت تقاضای سفر است. چهار زیرسیستم در مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها پیشنهاد شده‌است که شامل زیرسیستم جمعیت، زیر سیستم تقاضای سفر، زیرسیستم سرمایه‌گذاری و زیرسیستم تراکم ترافیک می‌باشد. زیرسیستم جمعیت به طور مستقیم بر زیرسیستم تقاضای سفر تاثیر می-گذارد و زیرسیستم تقاضای سفر شامل حمل و نقل شخصی، عمومی (اتوبوس) و ریلی (مترو) در تهران می‌باشد. برای مدیریت تقاضای سفر در تهران، پنج سیاست پیشنهاد شده است. سیاست اول و دوم کنترل کرایه حمل و نقل عمومی و ریلی، سومین و چهارمین سیاست توسعه کمی و کیفی حمل و نقل عمومی و ریلی و سیاست پنجم در رابطه با کنترل قیمت سوخت می‌باشد که به عنوان یک سیاست کوتاه مدت مطرح می‌شود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، افزایش قیمت سوخت، سیاست مناسب‌تری است که تأثیر بیشتری بر تقاضای سفر در تهران دارد.

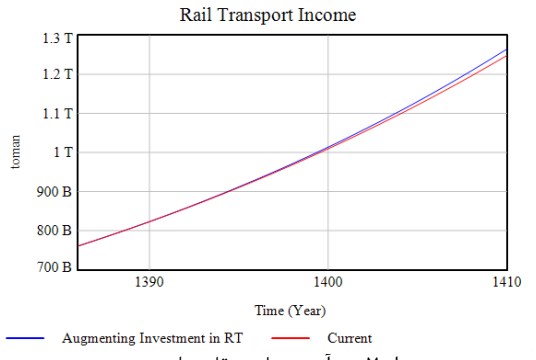
www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، پیاده‌سازی سیاست‌های مختلف و مشاهده نتایج آن‌ها بر روی سیستم حمل و نقل، از جمله توصیه‌های کاربردی به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری می‌توان به کاهش کرایه حمل و نقل ریلی و عمومی اشاره کرد که کاهش نرخ کرایه باعث جذب مردم به استفاده از مترو و اتوبوس می‌شود و می‌توان بدون وجود داشتن هیچ‌گونه وابستگی به ارگان‌ها و سازمان‌های دیگری سیاست‌های زیر را اعمال کرد که از نظر کارایی مطلوبیت لازم را دارد و نتیجه‌ی مشاهده شده بسیار نزدیک به هدف مساله و تحقیق می‌باشد. نکته‌ی دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد این است که با توجه به داده‌های واقعی موجود، فرضی که در مدل پیشنهادی صورت گرفته شده، حدوداً ده درصد از درآمد مترو و اتوبوس در سرمایه‌گذاری آن دو دخیل است در صورتی که این درصد تا حدود هفتاد یا هشتاد درصد افزایش یابد با توجه به حلقه-های موجود نه تنها تقاضای سفر با حمل و نقل عمومی و ریلی افزایش می‌یابد بلکه درآمد مترو و اتوبوس حدود ۵ و ۲ درصد افزایش خواهد داشت (نمودارهای ۶ و ۷). لازم به ذکر است بخش حمل و نقل عمومی و ریلی (اتوبوس و مترو) نیاز به توجه جدی از طرف مدیران و سیاست‌گذاران دارد.



نمودار ۶- درآمد حمل و نقل عمومی



نمودار ۷- درآمد حمل و نقل ریلی

ارتقای فرهنگ عبور و مرور شهروندان باید از جمله اهداف مدیران و سازمان‌ها به منظور مدیریت تقاضا و در راستای ارتقای ایمنی معابر در کلان شهرها مدنظر باشد و برای دستیابی به این اهداف یکی از روش‌های مناسب آموزش فرهنگ ترافیک از طریق مدارس و دانشگاه‌ها می‌باشد.

جهت بررسی نوآوری این تحقیق، قابل ذکر است که در تحقیقات سیستمی صورت گرفته در گذشته تحقیقی مبنی بر پیش‌بینی تقاضای سفر صورت نگرفته است. اما تحقیقاتی هستند که جنبه‌های مختلف حمل و نقل را مدل کرده‌اند که با بررسی هر کدام، ملاحظه گردید که از جامعیت خوبی برخوردار نبودند و مهم‌ترین شکاف‌هایی که این تحقیقات داشتند شامل نادیده گرفتن بخش حمل و نقل عمومی و ریلی، نادیده‌گیری برخی از بازخوردها، عدم شبیه‌سازی جهت تایید اعتبار فرضیات دینامیکی، ناقص بودن روابط ریاضی و عدم سازگاری واحدها در این روابط است.

این تحقیق دارای محدودیت هایی است که مطالعات آینده در باید در سه جهت انجام شود، با انتخاب عمیق متغیرها و پارامترها، مدل باید دقیق‌تر و سایر جنبه‌های مرتبط، به عنوان مثال، انرژی را شامل شود، سناریوهای پیشنهادی باید واقع بینانه‌تر و ساده‌تر باشد. مطالعه آینده شامل بهینه سازی مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌شود. به این منظور می‌توان از روش‌های بهینه سازی برای انتخاب بهترین سیاست و رتبه-بندی آن استفاده کرد که به تصمیم گیرندگان کمک می‌کند تا با انتخاب سیاست کارا بتوان تقاضای سفر را به‌نحو بهتر و کارآمدتری مدیریت کنند.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مراجع

Janelle, D. G., & Gillespie, A. (2004). Space–time constructs for linking information and communication technologies with issues in sustainable transportation. *Transport Reviews*, *24*(6), 665-677.

Nunez, F., Reyes, F., Grube, P., & Cipriano, A. (2010). Simulating railway and metropolitan rail networks: From planning to on-line control. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2(4), 18-30.

Norouzian-Maleki, S., Bell, S., Hosseini, S. B., Faizi, M., & Saleh-Sedghpour, B. (2018). A comparison of neighbourhood liveability as perceived by two groups of residents: Tehran, Iran and Tartu, Estonia. Urban forestry & urban greening, 35, 8-20.

Toole, J. L., Colak, S., Sturt, B., Alexander, L. P., Evsukoff, A., & González, M. C. (2015). The path most traveled: Travel demand estimation using big data resources. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 58, 162-177.

احمدی‌بافنده، محمد، هادی‌زاده مقدم، نرگس. (۱۳۹۰). ارتقای ایمنی شبکه معابر و نقش آن در جهانی شدن سیستم حمل و نقل و ترافیک شهری. ماهنامه حمل و نقل و توسعه، پیاپی ۴۵، ۶۵.

Auld, J., Hope, M., Ley, H., Sokolov, V., Xu, B., & Zhang, K. (2016). POLARIS: Agent-based modeling framework development and implementation for integrated travel demand and network and operations simulations. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 64, 101-116.

Abbas, K. A., & Bell, M. G. (1994). System dynamics applicability to transportation modeling. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 28(5), 373-390.

امیری، مجتبی، نوروزی، شهناز، و نجاری، علیرضا. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی مدیریت حمل و نقل اضطراری کلان شهر تهران پس از سوانح طبیعی با رویکرد آینده‌پژوهی. پژوهش‌های جغرافیای انسانی، دوره‌ی ۴۷، شماره‌ی ۱، ۱۵۷-۱۴۳.

هزارخانی، بیتا، زارعیان، رحمان، و حیدری، جعفر. (۱۳۹۴). مدل‌سازی عوامل موثر بر نوسانات قیمت در زنجیره تامین گوشت مرغ با استفاده از پویایی شناسی سیستم‌ها. دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع.

Rabieh, M., Karami, M. M., Ziaee, S. M., Yasoubi, A., & Salari, H. (2017). Dynamic Analysis of Inventory Fluctuations in Supply Chain based on System Dynamics Approach. *Ind. Manag. J.*, 9,(3): 539–561.

استادی جعفری، مهدی و میرصافی، امیرعباس. (۱۳۹۲). ارزیابی سیاست‌های توسعه پایدار در بخش حمل و نقل شهری با استفاده از مدل های سیستم پویایی؛ مطالعه موردی: شهر مشهد. *مدیریت شهری*, ۲۹۴-۱۳۹۲.

Jifeng, W. A. N. G., Huapu, L. U., & Hu, P. E. N. G. (2008). System dynamics model of urban transportation system and its application. Journal of Transportation Systems engineering and information technology, 8(3), 83-89.

Suryani, E., Chou, S. Y., & Chen, C. H. (2010). Air passenger demand forecasting and passenger terminal capacity expansion: A system dynamics framework. Expert Systems with Applications, 37(3), 2324-2339.

Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. International Journal of Modelling and Simulation, 37(1), 25-35.

www.SID.ir

Archive of SID

Nam Hee, C., Sun Kyoung, K., & Hong, M. K. (2001). Feedback Approach for the Dynamic Interactions Between Urban Transportation and Air pollution. *Proceedinga of the 19th International Conference of the System Dyanamics Society*, 1–17.

Gilbert, A. (1992). Third World cities: housing, infrastructure and servicing. Urban Studies, 29(3-4), 435-460.

ممتاز، فریده (۱۳۸۱). جامعه شناسی شهر، تهران، شرکت سهامی انتشار، چاپ دوم.

مفیدی شمیرانی، مجید. افتخاری مقدم، علی. (۱۳۸۸). توسعه پایدار شهری، دیدگاه‌ها و اصول اجرایی آن در کشورهای در حال توسعه، سال ششم، شماره ۱۲، فصلنامه بین المللی، پژوهشی ساخت شهر، ۱۵-۲۵.

McNeil, J. (1991). Sustainable development in the urban forest. Journal of Arboriculture, 17(4), 94-97.

عزیزی، محمدمهدی. (۱۳۸۰). توسعه‌ی شهری پایدار، برداشتی و تحلیلی از دیدگاه‌های جهانی، نشریه صفه. شماره ۳۳.

Vafa-Arani, H., Jahani, S., Dashti, H., Heydari, J., & Moazen, S. (2014). A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 31: 21-36.

Sterman, J.D. (2000). *Business dynamics – systems thinking and modeling for a complex world*.

Shepherd, S. (2014). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transp. B Transp. Dyn.*, 2(2): 83–105.

Rabieh, M., Karami, M., Ziaee, S., Yasoubi, A., & Salari, H. (2017). Dynamic Analysis of Traffic-Injury Problem in Iran: System Dynamics approach. *Modern Research in Decision Making*, 1(4): 71-99.

www.SID.ir

Archive of SID

*پیوست

روابط و معادلات ریاضی

$Population_t = population_{t-d} + (birth_t - death_t)dt$	(۱)
$Birth_t = population_{t-d} \times birthrate$	(۲)
$Death_t = population_{t-d} \times deathrate$	(۳)
$ETD_t = \frac{(TD_t - TTD_{t-1})}{1}$	(۴)
$TDPT_t = TDP_{t-d} + (ETD_t - PTtoPubTTR_t - PTtoRTTR_t)dt$	(۵)
$TDRT_t = TDRT_{t-d} + (PTtoRTTR_t)$	(۶)
$TDPubT_t = TDPubT_{t-d} + (PTtoPubTTR_t)$	(۷)
$ETD_t = \frac{(TD_t - TTD_{t-1})}{1}$	(۸)
$TA = a_1 \times IT + a_2 \times TT + a_3 \times UA + a_4 \times EU$	(۹)
$EU = \frac{AI}{TF}$	(۱۰)
$TTRT = -0.045632 \times IRT + 1.02953$	(۱۱)*
$TLP = 1.40347 \times IRT - 0.387789$	(۱۲) *

$ERIPubT = IFTHENELSE((-0.820336 \times TDPubT + 1.74199) > 0, -0.820336 \times TDPubT + 1.74199, 0)$	*(13)**
$APubT = IFTHENELSE(IPubT > 0, AR \times IPubT, 0)$	*(14)*
$ERIRT = IFTHENELSE((3.32472 \times TDRT - 2.48999) > 0, 3.32472 \times TDRT - 2.48999, 0)$	*(15)**

$TC = \frac{\frac{TDPT}{CPT} \times LPT + \frac{TDPubT}{CPubT} \times LPubT}{RC}$	*(16)*

مجموعه معادلات مهم مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها در لیست فوق ارائه می‌شود.

معادلات ستاره دار، حاصل تحلیل‌های و رگرسیون‌گیری به کمک نرم‌افزار *EViews* می‌باشد.

www.SID.ir