

پیش‌بینی تقاضای سالانه سفر ریلی با استفاده از مدل پویایی‌شناسی سیستم؛ مطالعه موردی: سازمان رجا

صمد کاظمی^۱، مهدی غضنفری^۲، میرسامان پیشوایی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ (نویسنده مسئول)

^۲ استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

امروزه به دلیل مسافت زیاد بین شهرها، افزایش سوانح جاده‌ای و هوایی و مخاطره‌آمیز بودن جابه‌جایی مسافر از طریق هوایی و جاده‌ای، اهمیت حمل‌ونقل ریلی بیش از پیش نمایان می‌گردد. پیچیدگی مدیریت سیستم حمل‌ونقل ریلی به دلیل تعداد زیاد فاکتورها و اجزای تاثیرگذار بر آن است که به صورت غیرخطی و پویا بر همدیگر تاثیر می‌گذارند. هدف اصلی این پژوهش، پیش‌بینی تقاضای سالانه سفر ریلی در یک بازه هفت ساله از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲ و تجزیه و تحلیل اثر افزایش قیمت بلیط بر میزان تقاضاست. بدین منظور، یک رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی برای مدل‌سازی مسئله استفاده می‌شود. سپس، مدل توسعه داده شده به عنوان یک مطالعه موردی برای سازمان رجا و در بخش حمل‌ونقل ریلی مسافری پیاده‌سازی می‌شود. در ادامه با مقایسه داده‌های واقعی و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی به ارزیابی اعتبار مدل می‌پردازیم. پس از اطمینان از اعتبار بالای مدل، از آن برای پیش‌بینی رفتار دقیق تقاضای آینده، قیمت بلیط و میزان استفاده از خطوط ریلی استفاده کرده و مدل را برای پنج سال آتی از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ شبیه‌سازی می‌کنیم و با توجه به نتایج حاصل و با تحلیل آنها، به ارائه سیاست‌هایی برای بهبود خدمات و افزایش تقاضای سفر ریلی، قابل استفاده در سازمان رجا می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: پویایی‌شناسی سیستمی، پیش‌بینی، تقاضای سالانه سفر ریلی، طراحی سیاست

۱. مقدمه

حمل و نقل یکی از عوامل مهم توسعه اجتماعی و اقتصادی هر منطقه یا کشور به حساب می آید، به گونه ای که پیشرفت اقتصادی هر ملتی با میزان کارایی سیستم حمل و نقل آن کشور رابطه مستقیم دارد و پیشرفت هر کشور یا منطقه بدون امکانات کافی حمل و نقل مقدور نیست (صفرزاده و معصومی، ۱۳۹۳). در طول تاریخ، بهبود سیستم حمل و نقل همواره از عوامل مهم رفاه اجتماعی بوده، اما متأسفانه حمل و نقل با خطرات محیطی و تهدید سلامت انسان همراه است (رومبوتوس و کاپروس، ۲۰۰۸). شیوه های مختلف حمل و نقل هر یک خصوصیات، مزایا و معایب خاص خود را دارند. در این میان، حمل و نقل ریلی از ابتدای ظهور به دلیل ایمنی، پاکي و حتی در برخی موارد، سرعت برتری های قابل توجهی نسبت به سایر روش های حمل و نقل پیدا کرده است که باعث می شود از معایب اندک آن چشمپوشی و آن را یک گزینه برتر لحاظ کنیم. از این رو، توسعه زیرساخت های ریلی اعم از خطوط ریلی، ناوگان و ... افزایش میزان استفاده از خطوط ریلی و نیز برنامه ریزی حمل و نقل در سطوح استراتژیک و عملیاتی نیاز به اطلاعات تقاضای آینده سفر دارد و به همین دلیل پیش بینی تقاضای سفر ریلی از اهمیت و موضوعیت خاصی برخوردار است (امین ناصری و بهنام، ۱۳۹۱).

به علت تعدد اجزای سیستم حمل و نقل ریلی کشور و همچنین روابط پیچیده و اغلب غیرخطی بین اجزا که دو جز ضروری برای پیچیده بودن یک سیستم هستند؛ پیش بینی تقاضای سفر سالانه از طریق حمل و نقل ریلی باید با در نظر گرفتن تمامی این اجزا و عوامل و روابط بین آنها صورت گیرد. در این شرایط با توجه به ساختارهای بازخوردی و حلقه های علی- معلولی بین متغیرها که رفتار پویای سیستم را موجب می شوند و نیز عدم کارایی مطلوب روش های کمی سخت؛ از رویکرد پویایی شناسی سیستمی برای شبیه سازی رفتار متغیرهای مذکور طی زمان استفاده می شود.

از رویکرد پویایی شناسی سیستمی می توان هم در بخش مسافری و هم در بخش باری راه آهن و سیستم حمل و نقل ریلی بهره گرفت که در این پژوهش، با استفاده از این رویکرد در بخش مسافری، قصد پیش بینی و بررسی رفتار متغیر حالت اصلی سیستم یعنی تقاضای سالانه سفر ریلی را داریم.

بدین منظور ابتدا در قسمت پیشینه پژوهش به توضیحی پیرامون پژوهش های قبلی صورت گرفته در این حوزه می پردازیم. با بررسی مقالات مرتبط، مشاهده می شود که دو حوزه حمل و نقل ریلی (باری و مسافری) و حمل و نقل شهری با رویکرد پویایی- شناسی سیستمی بیشترین فراوانی را دارند. پژوهش های انجام شده با رویکرد پویایی شناسی سیستمی در حوزه حمل و نقل شهری، دربردارنده موضوعاتی چون بررسی و کنترل ترافیک شهری، مدیریت تقاضای حمل و نقل شهری، سیاست های موثر بر توسعه پایدار و کاهش آلودگی هوا بوده است. برخی مقالات به پیش بینی تقاضای سفر هوایی، تخمین مساحت مورد نیاز برای باند و ترمینال فرودگاه و نیز ارزیابی کارایی فرودگاه با رویکرد پویایی شناسی سیستمی پرداخته اند. سایر مقالاتی که به نوعی مرتبط با حمل و نقل ریلی هستند؛ بیشتر مرتبط با پیش بینی تقاضای سفر ریلی بین شهری با رویکردهای غیر از پویایی شناسی سیستمی مانند روش های رگرسیونی، شبکه های عصبی، فازی و سایر مدل های اقتصادی هستند. آن مقالاتی هم که از ابزار پویایی شناسی سیستمی در حوزه حمل و نقل ریلی استفاده کرده اند، یا به بررسی اثرات توسعه حمل و نقل ریلی شهری (مترو) در توسعه پایدار شهرها پرداخته اند یا حمل و نقل ریلی باری را مدنظر قرار داده اند و هیچ مقاله ای به طور مستقیم به پیش بینی تقاضای سالانه سفر ریلی بین شهری با استفاده صرف از ابزار پویایی شناسی سیستمی نپرداخته است.

ما در راستای پر کردن این شکاف تحقیقاتی و با محور قراردادن استفاده از ابزار پویایی شناسی سیستمی، سعی در پیش بینی میزان تقاضای سفر سالانه ریلی در بخش بین شهری خواهیم داشت. از این رو به بیان توضیحاتی پیرامون فرایند مدل سازی، اهمیت به کارگیری رویکرد پویایی شناسی سیستمی و مزایای آن در پیش بینی پرداخته و ضمن بیان صورت مسئله و ابهامات موجود، در ادامه با رسم نمودار علی- معلولی^۱ و کمی سازی روابط و رسم نمودار حالت- جریان^۲ در نرم افزار ونسیم^۳، مدل را طی افق زمانی انتخاب شده شبیه سازی کرده و با بررسی اعتبار مدل از طریق مقایسه خطای حاصل از شبیه سازی و داده های واقعی و تضمین معتبر بودن مدل، از آن برای پیش بینی تقاضای سفر ریلی پنج سال آینده یعنی تا سال ۱۳۹۷ استفاده کرده و

^۱ Causal Loop Diagram

^۲ Stock and Flow Diagram

^۳ Vensim PLE

با تحلیل نتایج حاصل از پیش‌بینی رفتار متغیرهای اصلی مسئله به ارائه راهکارها و طراحی سیاست‌های بهبوددهنده می‌پردازیم. سازمان رجا می‌تواند از نتایج حاصل از این شبیه‌سازی برای بهبود خدمات سفر و افزایش تقاضای سفر ریلی هم‌زمان با افزایش سود خود از طریق افزایش قیمت بلیط استفاده کند.

۲. پیشینه پژوهش

رشد سریع حمل‌ونقل ریلی در کنار سایر روش‌های حمل‌ونقل مخصوصاً حمل‌ونقل هوایی، توجه محققین این حوزه را بیش از پیش به خود جلب کرده است. افزایش تعداد پروازها و سیرهای قطار، تحلیل تقاضا را برای سفر به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. لازم به ذکر است در مبحث حمل‌ونقل با توجه به گستردگی ابعاد و تنوع روش‌ها از قبیل: ریلی، جاده‌ای، هوایی، دریایی و ... و همچنین نوع مسئله و ابهام تعریف شده (با رویکرد توسعه پایدار و الگوهای زیست‌محیطی، بررسی و پیش‌بینی تقاضای سفر، بررسی کارایی پایانه‌های مسافری، تعیین ظرفیت بهینه کشتی‌ها در بنادر و اسکله‌ها و ...) در هر یک از این روش‌ها، به بررسی چندین مقاله متنوع در این حوزه‌ها می‌پردازیم.

قهرمانی و همکاران (۱۳۸۹) بخشهای اصلی سیستم راه‌آهن کشور را که شامل بازار حمل‌ونقل، زیرساخت و قیمت‌گذاری است؛ مدل‌سازی کرده‌اند. سپس سیستم حمل‌ونقل ریلی کشور را به مدت ۳۰ سال شبیه‌سازی و بعد از اعتبارسنجی، به تحلیل حساسیت روی پارامترها و سیاست‌ها پرداخته‌اند.

ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) با استناد به داده‌های آماری به تجزیه و تحلیل آماری یافته‌ها با استفاده از روش‌های آماری رگرسیون خطی، تحلیل واریانس، سری‌های زمانی و مدل جاذبه پرداخته‌اند، تا بدین سوال که «چه عواملی در تولید سفرهای هوایی به فرودگاه اصفهان تاثیرگذار بوده است» پاسخ دهند. بدین منظور، مدل‌های تحلیلی برنامه‌ریزی تولید سفر و حمل‌ونقل هوایی را نیز مورد استفاده قرار داده‌اند.

استادی جعفری و رصافی (۱۳۹۱) در یک مطالعه موردی برای شهر مشهد، سعی در یافتن یک رابطه علی- معلولی میان حمل‌ونقل و سایر بخشهای توسعه پایدار دارند. بدین‌منظور هفت شاخص زیست‌محیطی را برای سنجش سطح پایداری مدل حمل‌ونقل پایدار شهری در نظر گرفته و روند تغییرات آنها را با شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ونسیم طی یک افق ۲۰ ساله (۱۳۸۸-۱۴۰۸) مشخص کرده و با بررسی و ارزیابی ۱۵ سناریوی مختلف، یک الگوی مدیریتی مناسب را براساس بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی در این شهر پیشنهاد داده‌اند.

تیموری و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از الگوریتم‌های شبکه عصبی سعی در برآورد کل تقاضای ریلی دارند. شبکه عصبی استفاده شده، شبکه پس‌خورانی Feed Forward می‌باشد. شبکه عصبی طراحی شده دارای چهار گره ورودی GDP، جمعیت، متوسط هزینه‌های خانوار و متوسط درآمد هر خانوار می‌باشد. ایده اصلی این مدل مبتنی بر این است که مسافرین قطار بخشی از مجموعه مسافرین را تشکیل می‌دهند که دارای رفتار تقریباً یکسانی هستند.

امین‌ناصری و بهنام (۱۳۹۱) با انتخاب محور ریلی خراسان که پرترددترین محور ریلی کشور است؛ سعی در پیش‌بینی تقاضای سفر در زمان اوج (فروردین و شهریور) دارند. آنان با شناسایی عوامل موثر بر تقاضای سفر در زمان اوج، با استفاده از روش‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی، میزان تاثیر این عوامل را در شرایط غیراوج به‌دست آورده و سپس با در نظر گرفتن این متغیرها در شرایط اوج، میزان تقاضای اوج را برآورد می‌کنند.

جیفنگ و همکاران^۱ (۲۰۰۸) یک مدل علی- معلولی مبتنی بر رویکرد پویایی‌های سیستمی ارائه دادند که مشتمل بر ۷ زیرمدل جمعیت، رشد اقتصادی، تعداد وسایل نقلیه، تاثیر محیطی، تقاضای سفر، عرضه حمل‌ونقل و ازدحام ترافیکی است. سپس این مدل را به‌عنوان یک مطالعه موردی، در شهر دالیان چین طی یک افق زمانی ۵ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۵۰ با دوره زمانی یک ساله، اعمال کرده‌اند. در ادامه نیز پنج سیاست مختلف را تعریف کرده و تاثیر هر یک از آنها را روی زیرمدل‌های معرفی شده بررسی و بهترین و کاراترین سیاست را انتخاب می‌کنند.

استادی جعفری و حبیبیان (۱۳۹۳)، در یک مطالعه موردی در شهر مشهد و با بهره‌گیری از پویایی‌شناسی سیستمی به‌دنبال

^۱ Jifeng et al.

ارزیابی بلندمدت اثر ترکیبی سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل و بررسی روند اثرات متقابل متغیرهای مختلف در طول زمان هستند. آنها سه سیاست افزایش سوخت اتومبیل شخصی، قیمت‌گذاری ساعتی پارکینگ و قیمت‌گذاری ورود به محدوده طرح ترافیک را هرکدام در قالب چهار سطح مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند و برای ارزیابی نتایج بلندمدت، مدل خود را در یک بازه زمانی ۲۰ ساله (۱۳۸۸-۱۴۰۸) شبیه‌سازی می‌کنند و در نهایت ترکیب بهینه سیاست‌های فوق را با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای کاهش هزینه‌های تحمیل‌شده به جامعه انتخاب می‌کنند.

احدی و ضیاتبار احمدی (۱۳۹۲)، با انتخاب محور سرخس - بندرعباس به‌عنوان یکی از کریدورهای ترانزیت ریلی بار، سعی در انتخاب پارامترهای موثر بر مطلوبیت این کریدورها با استفاده از پویایی‌شناسی سیستمی دارند. بدین‌منظور آنها تابع مطلوبیت کریدورهای ترانزیت ریلی بار را با بررسی مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار و با استفاده از پویایی‌شناسی سیستمی، ارائه و مدل خود را تا سال ۱۳۸۸ تا سال ۱۴۰۴ و در بازه‌های یک‌ساله شبیه‌سازی می‌کنند. در نهایت سناریوهایی برای افزایش مطلوبیت مسیر مورد نظر پیشنهاد داده و با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، ترکیبی از سیاست‌های بهینه را برای افزایش میزان تقاضای ترانزیت ریلی بار پیشنهاد می‌دهند.

فرتوک‌زاده و نهوجی (۱۳۹۱)، با استفاده از تحلیل دینامیکی در قالب پویایی‌شناسی سیستمی، با انتخاب شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی، مسئله ترافیک را در ابعاد کلان و استراتژیک مدل کرده و رفتار آن را با شبیه‌سازی مدل، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند. سپس از این مدل برای شبیه‌سازی رفتار ۱۵ سال آینده سیستم استفاده می‌کنند. در ادامه با بررسی روند تغییرات رفتار سیستم در بلندمدت، سیاست و راهکارهایی برای کنترل و بهبود ترافیک تهران ارائه می‌دهند.

مالیک و همکاران^۱ (۲۰۱۴) براین عقیده‌اند که حجم قابل توجهی از مصالح معدنی در ساخت، تعمیر و نگهداری جاده‌ها استفاده می‌شوند. هم‌زمان با جمع‌آوری مصالح از معادن، نیاز به انتقال آنها به نقاط مورد نظر است که اغلب نیز فواصل بسیار زیادی بین معادن و نقاط مورد نیاز وجود دارد، از این‌رو با گذشت زمان، هم‌زمان با کاهش مصالح معدنی، هزینه این انتقال (که با کامیون‌ها و وسایل نقلیه راه‌سازی انجام می‌شود) و نیز مقدار گازهای آلاینده متصاعد شده افزایش می‌یابد. هدف آنها ایجاد مدل پویایی سیستمی استوار^۲ کاهش مصالح معدنی به‌دلیل ساخت‌وساز جاده‌ها و آسفالت کردن آنها و نیز تعیین تاثیر استفاده از مصالح محلی و غیر محلی، بازیافت و کنسل کردن پروژه آسفالت‌کردن جاده‌هاست.

چنگ و همکاران^۳ (۲۰۱۵) ابتدا به بیان اهمیت پایداری و اولویت آن در توسعه شهری و لزوم توجه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای علی‌الخصوص کربن دی‌اکسید به‌عنوان یک عامل مهم در پایداری سیستم‌های حمل‌ونقل شهری می‌پردازند. در ادامه شهر کائو‌سیونگ را در تایوان به‌دلیل اینکه یک شهر صنعتی و دومین ابرشهر تایوان است؛ به‌عنوان یک مطالعه موردی انتخاب و سه سیاست مالیات سوخت، مدیریت پارک کردن موتورسیکلت و اتوبوس‌های رایگان را تعریف می‌کنند تا تاثیر آنها را بر کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه و کربن‌دی‌اکسید انتشاریافته در یک افق زمانی ۳۰ ساله بررسی کنند.

پارک و همکاران^۴ (۲۰۱۴) روی مسئله تعیین سرمایه موردنیاز کشتی‌ها برای دولت‌ها و صنایع کشتی‌سازی تمرکز کرده‌اند. از آن‌جا که هزینه سرمایه‌گذاری در این صنعت بسیار سنگین بوده و بازگشت سرمایه اولیه نیز در مدت زمانی طولانی رخ می‌دهد، به ارائه یک مدل پویایی‌شناسی سیستمی برای تسهیل کار صنایع کشتی‌سازی و دولت‌ها در اتخاذ تصمیم‌های استراتژیک پرداخته‌اند. بدین‌منظور خدمات کشتی‌های مسافری ساحلی را بین جزایر اینچئون و بانگنیونگ در کره جنوبی به‌عنوان یک مطالعه موردی مورد بررسی قرار داده‌اند. سپس دو سیاست تاثیر اندازه کشتی‌ها و تاثیر نوع کشتی‌ها را با مقایسه درآمد و هزینه لحاظ می‌کنند. در ادامه نیز حجم مسافر و بار را طی یک افق ۱۳ ساله از ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵ با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی پیش‌بینی می‌کنند.

چائو و زیشان^۵ (۲۰۱۳) به بررسی تکامل ساختار حمل‌ونقل شهری با رویکرد پویایی سیستمی می‌پردازند. بدین‌منظور شهر شانگهای را به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته‌اند. آنان هدف اصلی از مدل‌سازی را ایجاد یک مدل پویایی‌شناسی سیستمی

¹ Mallick et al.

² Robust

³ Cheng et al.

⁴ Park et al.

⁵ Chao and Zishan

موثر و واقعی از تکامل ساختار حمل‌ونقل شهری شانگهای با مطالعه ارتباط علی بین عوامل اقتصادی-اجتماعی، عرضه ترافیک، تقاضای ترافیک، عملیات ترافیک و سیاست‌های ترافیک، بیان می‌کنند.

حق‌شناس و همکاران^۱ (۲۰۱۴) سنگ بنای تحقیق خود را شناسایی سیاست‌های موفق در حمل‌ونقل پایدار با مطالعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهرهای مختلف و تاثیرات اجتماعی، اقتصادی و محیطی آن قرار داده‌اند. دیتابیس این تحقیق برپایه تعداد کمی از دیتابیس‌های جامع شهرهای گوناگون طی ۴ دهه شکل گرفته است. بر این اساس ۹ شاخص حمل‌ونقل پایدار شهری را انتخاب می‌کنند. در ادامه یک شاخص ترکیبی که دربردارنده شاخص‌های قبلی است، معرفی می‌شود. این شاخص‌ها برای ارزیابی اثرات سیاست‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدل به‌نحوی توسعه داده می‌شود که این شاخص‌ها خروجی آن باشند.

یانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۴) به بیان اهمیت سیستم حمل‌ونقل ریلی شهری (مترو و قطارهای سبک) و تاثیر آن بر کاهش ازدحام ترافیک و توسعه پایدار سیستم ترافیک شهری می‌پردازند. آنها تاثیرات گسترش حمل‌ونقل ریلی شهری را بر کلان-شهرها در چهار حوزه ترافیک شهری، اقتصاد، اجتماع و محیط بررسی می‌کنند که ترافیک شهری، مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند. برای انجام شبیه‌سازی، یک بازه ۲۰ ساله از ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵ را با فاصله زمانی یک سال و متغیر مقیاس ساخت سیستم حمل‌ونقل ریلی شهری^۳ را متغیر کنترلی در نظر می‌گیرند.

لوبیس و همکاران^۴ (۲۰۰۵) ابتدا به توضیحی پیرامون تاریخچه شرکت راه‌آهن اندونزی، تغییرات ساختاری آن، سازمان‌های مالک آن و ... می‌پردازند. آنان به دنبال توسعه یک مدل پویایی‌شناسی سیستمی برای آنالیز سیاست‌های مختلف در سیستم راه‌آهن هستند. بخش‌های اصلی این مدل شامل بازار حمل‌ونقل، مالی، زیرساختار، تعرفه و سیاست‌های دولت است. در ادامه دو سیاست تعریف می‌کنند و با شبیه‌سازی رفتار کیفیت زیرساخت‌های راه‌آهن در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ تحت دو سیاست مذکور مشاهده می‌شود که کیفیت زیرساخت‌ها تحت اعمال سیاست نخست، افزایش چشمگیری را نسبت به سیاست دوم نشان می‌دهد.

سوریانی و همکاران^۵ (۲۰۱۰) در پی توسعه مدلی برای پیش‌بینی تقاضای سفرهای هوایی و ارزیابی چند سناریوی سیاست مرتبط با ظرفیت پایانه مسافری و باند فرودگاه برای مواجهه با تقاضای آتی هستند. آنان تاثیر هزینه سفر هوایی، سطح تاثیر خدمت، تولید ناخالص داخلی، جمعیت، تعداد پروازها در روز و زمان اقامت را متغیرهایی در نظر می‌گیرند که نقشی عمده در تعیین حجم مسافرت هوایی، استفاده از باند فرودگاه و ناحیه اضافی موردنیاز برای گسترش ظرفیت پایانه ایفا می‌کنند.

اوبافیل و همکاران^۶ (۲۰۰۰) یک مدل برای پیش‌بینی تقاضای درازمدت برای تقاضای سفر هوایی داخلی در عربستان سعودی ارائه دادند. آنان چندین متغیر توضیحی مانند مخارج کل و جمعیت را برای فرمولاسیون مدل به‌کار گرفتند.

جیمز و گالوین^۷ (۲۰۰۲) از رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی برای تعیین رفتار آینده اجزای اصلی سیستم کنترل ترافیک هوایی^۸ طی زمان استفاده کردند.

سای و همکاران^۹ (۲۰۰۹) دو ساختار شبکه عصبی جدید را برای پیش‌بینی تقاضای سفر ریلی کوتاه‌مدت بررسی می‌کنند. سپس نتایج حاصل از مدل‌های جداگانه با یکدیگر ادغام شده تا پیش‌بینی نهایی صورت گیرد.

۳. فرایند مدل‌سازی

گرچه پیش‌بینی تقاضا با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم امری دشوار است، اما به‌کارگیری آن به‌دلایل زیر مهم است (لی نیس،

¹ Haghshenas et al.

² Yang et al.

³ Urban Rail Transit (URT)

⁴ Lubis et al.

⁵ Suryani et al.

⁶ O. Ba-Fail et al.

⁷ James and Galvin

⁸ Air Traffic Control

⁹ Tsai et al.

(۲۰۰۰):

- پیش‌بینی‌ها از مدل‌های پویایی‌شناسی سیستمی کالیبره شده حاصل می‌شوند به‌گونه‌ای که از نتایج سایر رویکردها، بهتر و مفیدترند.
 - این رویکرد نسبت به رویکردهای آماری، برای پیش‌بینی‌های کوتاه تا میان‌مدت مناسب‌ترند و در نتیجه به تصمیمات بهتری منجر می‌شوند.
 - این رویکرد، ابزاری برای تعیین حساسیت‌های کلیدی و در نتیجه توسعه سناریوها و حساسیت‌های پایدارتر (Robust) را فراهم می‌آورد.
- مدل‌های پویایی‌شناسی سیستمی می‌توانند وضعیت متغیرها را در مقاطع زمانی مختلف بررسی کرده و تاخیرهای زمانی آنی و طولانی را برای تغییر سایر پارامترها در نظر گیرند (کوچنیکر). مطالعات نشان می‌دهند که این خصوصیت مدل‌های پویایی-شناسی سیستمی باعث شده است تا به‌عنوان روشی قابل اتکا برای ارزیابی‌های بلندمدت قلمداد شوند (گوزمان و همکاران، ۲۰۰۸).
- در ادامه به توضیح مختصری پیرامون گامهای مختلف فرایند مدل‌سازی می‌پردازیم.
- گام اول فرایند مدل‌سازی و بنیان ابتدایی کار، چارچوب‌بندی مسئله است که خود شامل تعریف مسئله و ابهامات، تعیین افق زمانی و تعیین رفتار متغیرهای حالت مسئله با توجه به داده‌های تاریخی است.

۳-۱. چارچوب‌بندی مسئله

۳-۱-۱. تعریف مسئله و ابهامات

همان‌طور که قبلاً گفته شد، ما به دنبال پیش‌بینی میزان تقاضای سالانه سفر از طریق خطوط حمل‌ونقل ریلی هستیم. در نگاه اول شاید به نظر برسد که با گذشت زمان و افزایش جمعیت و نیز رشد چشمگیر تعداد سوانح جاده‌ای و هوایی، این تقاضا به‌علت ایمن‌تر بودن حمل‌ونقل ریلی نیز به‌صورت فزاینده خواهد بود. در حالی که با مشاهده داده‌های واقعی تقاضای سفر ریلی، عکس این قضیه مشاهده می‌شود. همچنین از دید عموم مردم، کاهش قیمت بلیط قطار (نسبت به تورم همان سال) عامل موثری برای افزایش قیمت بلیط قطار طی سالهای آینده خواهد بود. اما همان‌طور که در قسمت پیش‌بینی رفتار متغیر قیمت بلیط خواهیم دید، حتی با وجود افزایش قیمت بلیط طی بازه شبیه‌سازی، باز هم تمایل به سفر ریلی یا به‌طور دقیق‌تر تقاضای سالانه سفر ریلی (از سال ۱۳۹۷ به بعد) شیبی صعودی خواهد داشت. این تناقضات و عدم انطباق با فرضهای ساده و اولیه، لزوم بهره‌گیری از تفکر درون‌زا و ساختار بازخوردی میان تمام متغیرهای دخیل در مسئله را از طریق رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی ایجاب می‌کند.

در واقع با توجه به غیرخطی و پیچیده بودن سیستم مورد بررسی و همچنین وجود ساختارهای بازخوردی که رفتار متغیرها را ناشی از برهم‌کنش‌های داخل سیستم می‌داند (تفکر درون‌زا)؛ برای رفع ابهام مسئله باید روابط میان تمام متغیرهای دخیل از جمله قیمت بلیط، تاثیر قیمت بلیط، میزان استفاده از خطوط ریلی^۱، ظرفیت ریل، ازدحام خطوط، سطح خدمت و ... را مشخص کرد.

همان‌طور که در بخش افزایش تقاضای سفر ریلی نمودار علی- معلولی خواهیم دید اگر متغیر «میزان استفاده از خطوط ریلی» را در نظر نگیریم، یک حلقه افزایشی خواهیم داشت به‌گونه‌ای که افزایش اولیه در نرخ تقاضای سفر، به‌طور فزاینده موجب افزایش تقاضای سالانه سفر ریلی می‌شود که دور از واقعیت است. از طرفی با در نظر گرفتن این متغیر، یک حلقه منفی به‌وجود می‌آید که افزایش اولیه در نرخ تقاضای سفر ریلی، در نهایت موجب کاهش تقاضای سالانه سفر ریلی می‌شود، با این‌که این نتیجه منطقی‌تر از نتیجه قبلی و به‌واقعیت نزدیک‌تر است ولی با مشاهده نمودار حاصل از داده‌های واقعی تقاضای سالانه سفر ریلی و نزول تقاضا از سال ۱۳۸۹ به بعد، خلاف هر دو مورد مشاهده می‌شود. پس لازم است با در نظر گرفتن سایر

¹ Rail Utilization

متغیرها و عوامل تاثیرگذار از طریق ساختارهای بازخوردی، به بررسی رفتار متغیر اصلی مسئله که همان تقاضای سالانه سفر ریلی است؛ پردازیم. این امر با طرح فرضیه پویایی و رسم نمودارهای علی- معلولی و حالت- جریان در قسمت بعدی میسر می‌گردد.

افق زمانی مسئله نیز از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲ در نظر گرفته شده است و شبیه‌سازی به مدت پنج سال، از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ صورت می‌گیرد.

۳-۱-۲. مفروضات مسئله

برای ساده‌سازی مسئله، مفروضاتی به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

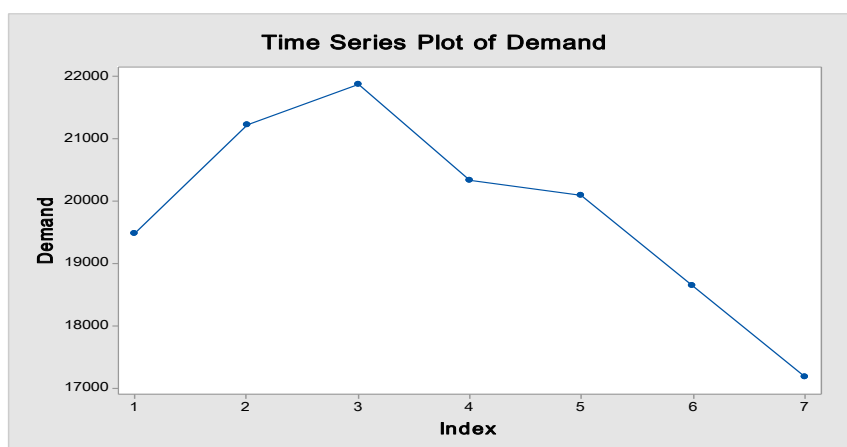
ظرفیتی که در حمل‌ونقل ریلی در نظر گرفته می‌شود، از ظرفیت قطار (ناوگان)، ظرفیت ایستگاه و ظرفیت ریل تشکیل شده است، که برای ساده‌سازی در مدل‌سازی مسئله، کمترین مقدار این پارامترها یعنی ظرفیت قطار را در نظر گرفته‌ایم. پس منظور از ظرفیت ریل، همان ظرفیت قطار است. قیمت بلیط قطار میان شهرهای مختلف کشور با توجه به مسافت‌ها متفاوت است که برای ساده‌سازی در مدل‌سازی مسئله، قیمت بلیط، قیمت تهران- مشهد در سالهای مختلف در نظر گرفته شده است. هنگامی که افزایش سالانه قیمت بلیط نسبت به تورم کلی چشمگیر نباشد، مردم حساسیت زیادی نسبت به افزایش قیمت بلیط از خود نشان نمی‌دهند و در نتیجه تقاضا کاهش نخواهد یافت. این ویژگی با متغیر برون‌زای «حساسیت مردم نسبت به افزایش قیمت بلیط در مقابل تورم هر سال» در مدل آورده شده است. این متغیر، کیفی بوده و به عوامل متعددی بستگی دارد که در این پژوهش به صورت تخمینی و با مصاحبه با افراد خبره تعیین شده است.

در فرمول مربوط به پارامتر تاثیر قیمت بلیط، به متوسط قیمت بلیط نیاز داشتیم که در این مدل به طور میانگین ۲۰ هزار تومان در نظر گرفته شده است. علاوه بر متغیرهای لحاظ شده در مدل، پارامترهای متعدد دیگری از جمله سطح خدمت، ارائه سرویس خدمه قطار و ... نیز در میزان تقاضای سالانه سفر در حمل‌ونقل ریلی موثر هستند که برای جلوگیری از پیچیدگی مدل، این متغیرها تحت عنوان «تاثیر چند متغیره بر تقاضا» در مدل آورده شده که با مصاحبه با کارمندان شرکت رجا و افراد خبره این حوزه تعیین شده است.

همچنین از آن‌جا که هدف اصلی مسئله پیش‌بینی میزان تقاضای سالانه سفر است؛ از آوردن متغیرهای درون‌زای مرتبط با ارزیابی کارایی و تعیین ظرفیت ترمینال مانند ظرفیت ریل اضافی در نمودارهای علی- معلولی و حالت- جریان صرف‌نظر شده است.

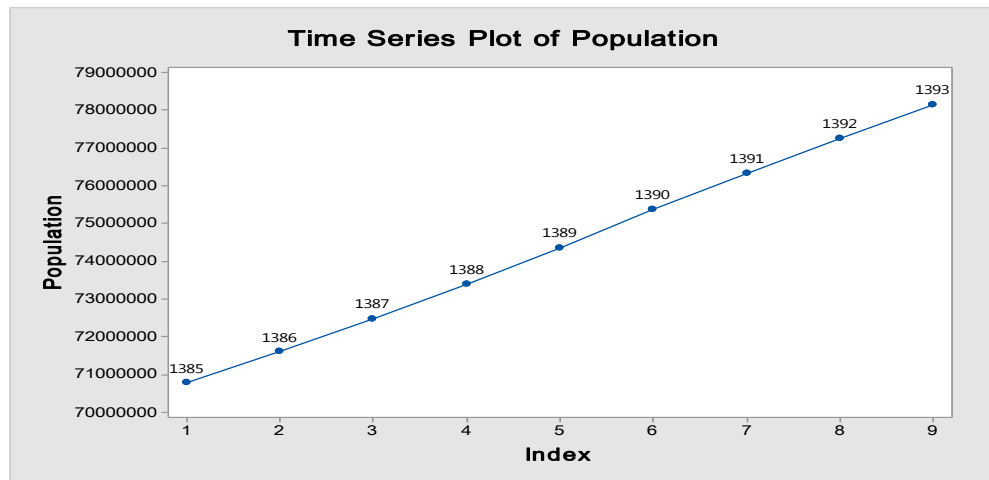
۳-۱-۳. رفتار مرجع متغیرهای حالت بر اساس آمار پایگاه اینترنتی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران

۳-۱-۳-۱. متغیر تقاضای سفر ریلی



شکل ۱. نمودار رفتار متغیر تقاضای سفر ریلی از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲

۲-۳-۱-۳. متغیر جمعیت کشور



شکل ۲. نمودار رفتار متغیر جمعیت کشور از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳

در جمع‌آوری داده‌های مربوط به جمعیت، تولید ناخالص داخلی و قیمت‌های سوخت و بلیط، از منابع اطلاعاتی وابسته به بانک مرکزی و سازمان ملی آمار ایران و همچنین مصاحبه و مشورت با مسئولین سازمان رجا، استفاده شده است.

۲-۳. طرح فرضیه پویایی

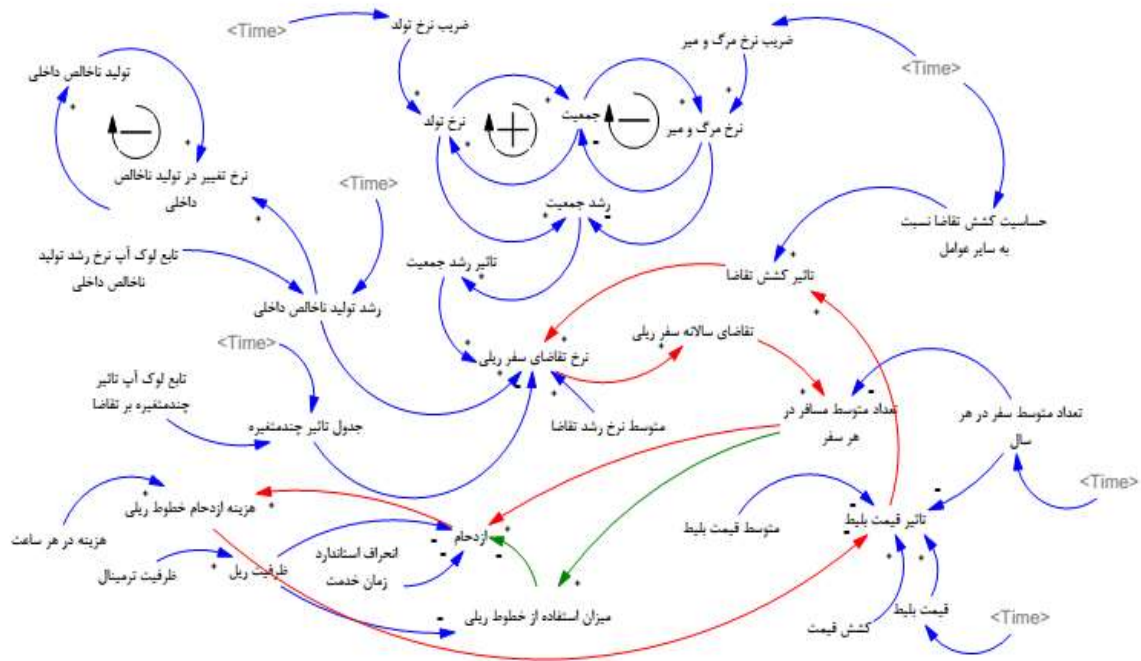
به دنبال یافتن پاسخ برای این سوال هستیم که چرا تقاضای سالانه سفر از طریق حمل‌ونقل ریلی با وجود شرایط حال حاضر (افزایش جمعیت، افزایش سوانح جاده‌ای و هوایی، ایمنی بیشتر حمل‌ونقل ریلی و هزینه کمتر آن نسبت به حمل‌ونقل هوایی) در حال کاهش است. یکی از اصلی‌ترین عوامل را می‌توان تاثیر قیمت بلیط بر نرخ تقاضای سفر ریلی دانست که به خصوص در سالیان اخیر با رشد شدید تورم و کاهش شدید نرخ رشد تولید ناخالص داخلی و در نتیجه کاهش نرخ رشد اقتصادی و بالتبع کاهش قدرت مالی مردم، تمایل مردم به سفرهای ریلی را کاهش داده یا به عبارتی مطلوبیت سفر ریلی نسبت به جاده‌ای در حال کاهش است که نمود آن را در افزایش بی‌رویه تعداد خودروهای شخصی و حجم زیاد مسافران در جاده‌های بین‌شهری علی‌الخصوص در ایام تعطیل و مناسبت‌های مذهبی می‌بینیم. حال با استفاده از ابزارهای مفید پویایی‌شناسی سیستم از قبیل نمودارهای حالت- جریان و علی- معلولی می‌خواهیم این فرضیه را به عنوان نتیجه درونی ساختارهای بازخوردی سیستم مورد بررسی مورد آزمایش قرار دهیم.

۱-۲-۳. نمودار علی - معلولی

شکل ۳ نمودار علی - معلولی مسئله را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار ونسیم رسم شده است. هدف از رسم این نمودار، تعیین رابطه علیت میان متغیرهای مسئله و تعیین قطبیت حلقه‌هاست. همان‌طور که از شکل بالا پیداست، پنج حلقه اصلی بازخوردی در مسئله وجود دارد که علامت سه تای آنها در شکل مشخص شده است. در مورد دو حلقه دیگر به علت شلوغی بیش از حد و کمبود جا برای تعیین علامت حلقه از رنگهای قرمز و سبز برای کمان‌های تشکیل‌دهنده حلقه‌ها استفاده شده است که در آن، متغیر میزان استفاده از خطوط ریلی که کمان‌های متصل بدان با رنگ سبز مشخص شده است، وجه تمایز بین این دو حلقه است. در زیر به توضیح این دو حلقه می‌پردازیم.

با افزایش نرخ تقاضای سفر ریلی، تقاضای سالانه سفر ریلی افزایش و تعداد متوسط مسافر در هر سفر افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان استفاده از خطوط ریلی افزایش می‌یابد که این افزایش به نوبه خود باعث افزایش ظرفیت اضافی مورد نیاز و در نتیجه

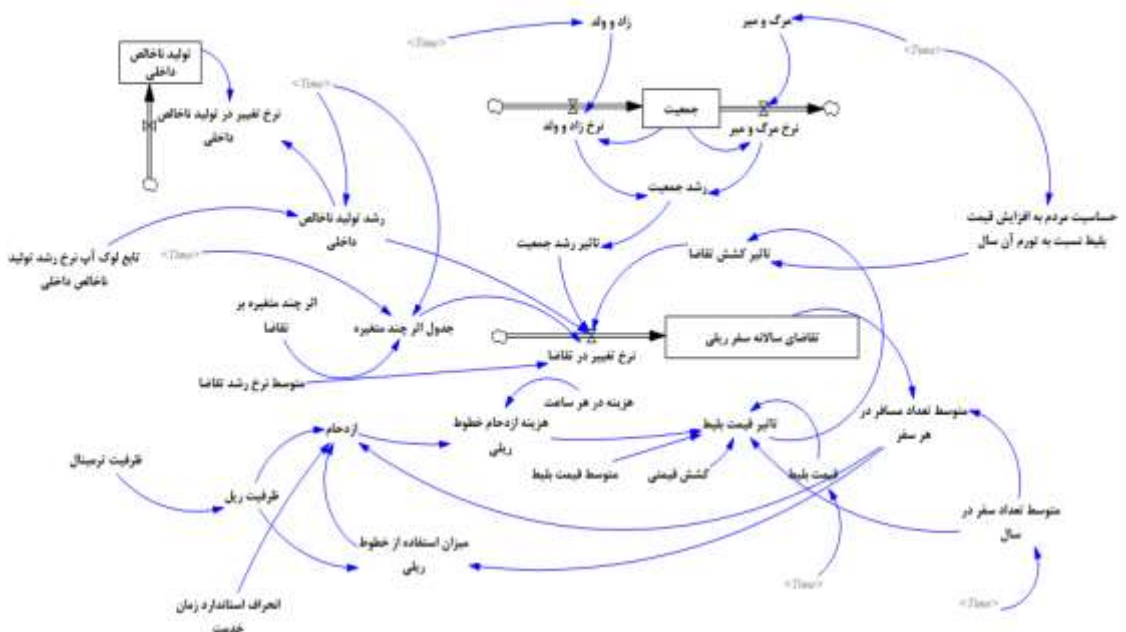
کاهش ازدحام خطوط ریلی می‌گردد. این کاهش، موجب کاهش هزینه ازدحام خطوط ریلی و در نتیجه افزایش تاثیر قیمت بلیط (با توجه به قطبیت منفی بین این دو متغیر) و افزایش تاثیر کشش تقاضا می‌شود. افزایش تاثیر کشش تقاضا نیز موجب افزایش نرخ تقاضای سفر ریلی می‌شود. پس افزایش نرخ تقاضای سفر ریلی با عبور از این ساختار بازخوردی، در نهایت موجب افزایش خودش می‌شود. پس در این جا با یک حلقه کاهنده مواجهیم. حال با توجه به توضیحات فوق اگر متغیر میزان استفاده از خطوط ریلی را در نظر بگیریم، یک حلقه دیگر مشابه حلقه بالایی اما از نوع کاهشی خواهیم داشت با این تفاوت که این حلقه مثبت بوده و توضیحات آن دقیقاً مشابه حلقه بالایی است. یعنی افزایش نرخ تقاضای سفر ریلی در نهایت موجب کاهش بیشتر این متغیر با عبور از این حلقه بازخوردی می‌شود.



شکل ۳. نمودار علی - معلولی

۳-۲-۲. نمودار حالت - جریان

برای کمی‌سازی روابط بین متغیرها و فرمول‌بندی مسئله نیاز به رسم نمودار حالت- جریان در نرم‌افزار ونسیم داریم.



همان‌طور که از شکل بالا پیداست، چهار زیرمدل GDP، جمعیت، تقاضای سفر و هزینه‌ها وجود دارد. و از آن‌جا که تقاضای

شکل ۴. نمودار حالت - جریان

سفر ریلی زیرمدل اصلی این سیستم است، به بررسی فرمول‌های مربوط به آن می‌پردازیم.
 ۳-۲-۱. زیرمدل تقاضای سفر

$$\text{Annual railway passenger demand}(t) = \text{Annual railway passenger demand}(t-dt) + \text{rate of demand} \times dt \quad (1)$$

(۲)

$$\text{Rate of demand} = (\text{Average growth rate of demand} \times \text{Effect of population growth} \times \text{GDP growth} \times \text{Effect of demand elasticity}) / \text{Multi variable effect table} \\ \text{Multi variable effect table} = \text{Effect of multi variable on demand}(\text{Time}) \quad (3)$$

مقدار متغیر Effect of multi variable on demand به صورت تابع Lookup وارد شده است.

$$\text{Effect of demand elasticity} = (-1 \times \text{Sensitivity of people to price increase towards inflation}) \times \text{Effect of ticket price} \times 1000 \quad (4)$$

مقدار متغیر Sensitivity of people to price increase towards inflation به صورت تابع Lookup وارد شده است.

$$\text{Average number of passengers per year} = \text{Annual railway passenger demand} / \text{Average number of travels per year} \quad (5)$$

مقدار متغیر Average number of travels per year به صورت تابع Lookup وارد شده است.

از آنجا که تمامی فرمول‌ها و عبارات در نرم‌افزار ونسیم، به صورت انگلیسی وارد می‌شود، در این‌جا نیز از معادل انگلیسی متغیرهای به کاررفته در مسئله استفاده کرده‌ایم.

جدول ۱ مقادیر مربوط به تخمین پارامترهای به کاررفته در مدل سازی را که از طریق مصاحبه با کارکنان سازمان رجا، روش‌های آماری و استفاده از داده‌های قبلی به دست آورده شده است؛ نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر مربوط به تخمین پارامترها

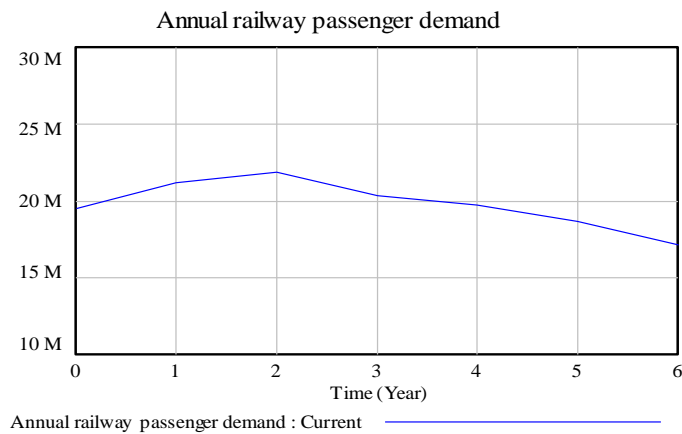
نام پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
متوسط قیمت بلیط	۲۰۰۰۰	تومان
انحراف استاندارد زمان خدمت	۰.۰۲	ساعت
متوسط نرخ رشد تقاضا	۲۰۰	مسافر/ سال
هزینه در هر ساعت	۵۰۰۰	تومان/ سال
کشش قیمتی	۰.۶	-
مقدار اولیه تقاضای سفر ریلی	۱۹۰۰۰۰۰۰	مسافر
مقدار اولیه تولید ناخالص داخلی در سال ۱۳۸۶	۳۰۷۲۸۵۳۵۰	میلیون تومان

مقدار اولیه جمعیت در سال ۱۳۸۶	۷۱۵۹۰۸۰۰	نفر
ظرفیت ترمینال	۵۰۰	نفر

۴. شبیه‌سازی مدل

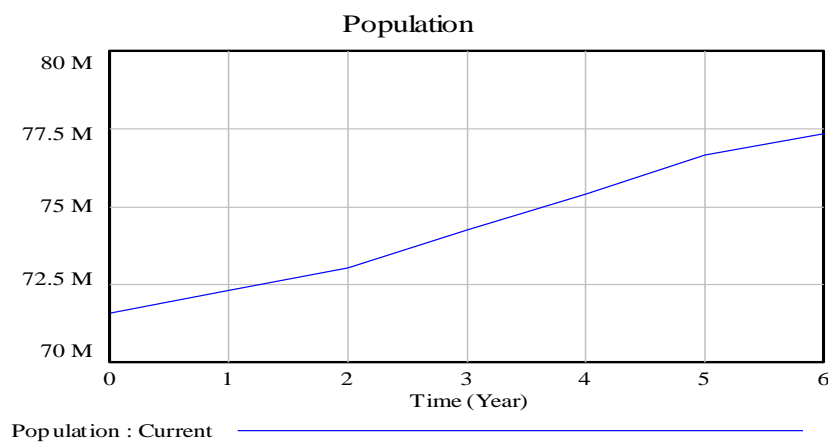
پس از ساخت مدل و کمی‌سازی روابط بین متغیرها، با شبیه‌سازی مدل برای دو متغیر حالت تقاضای سفر و جمعیت به نتایج زیر خواهیم رسید.

۴-۱. شبیه‌سازی تقاضای سالانه سفر ریلی



شکل ۵. نمودار حاصل از شبیه‌سازی تقاضای سالانه سفر ریلی از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲

۴-۲. شبیه‌سازی جمعیت کشور



شکل ۶. نمودار حاصل از شبیه‌سازی جمعیت کشور از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲

۴-۳. نتایج اعتبارسنجی مدل

تقاضای سالانه سفر ریلی به‌عنوان متغیر حالت اصلی مسئله از سال ۱۳۸۶ (دوره صفر) تا سال ۱۳۹۲ (دوره ششم) شبیه‌سازی شده است. با مقایسه این نمودار با نمودار حاصل از رسم داده‌های واقعی در شکل ۷ که با رنگ قرمز مشخص شده است؛ اعتبار

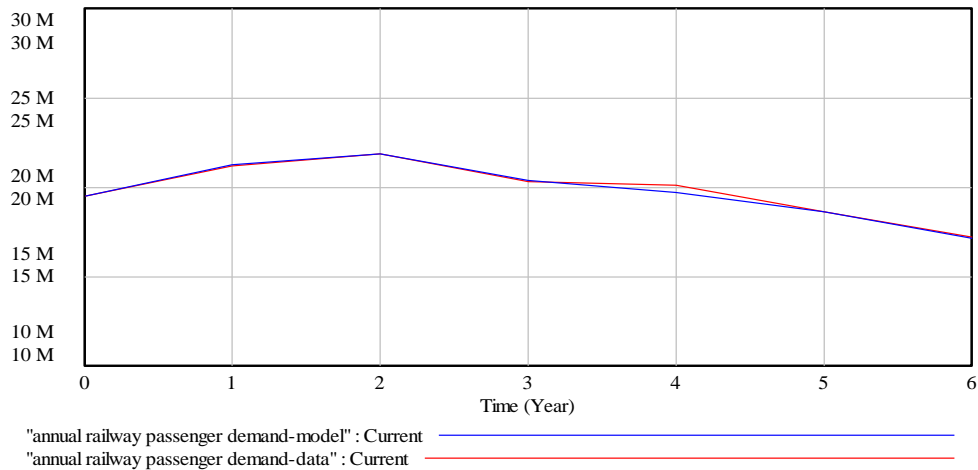
بالای مدل مشخص می‌گردد. در شکل ۸ نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی متغیر حالت جمعیت از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲ شبیه‌سازی و با داده‌های واقعی جمعیت مقایسه شده است. باز هم با توجه به اختلاف ناچیز دو نمودار، اعتبار بالای مدل تضمین می‌گردد.

برای محاسبه مقدار خطای مدل که مقدار آن نشانگر میزان اعتبار مدل است؛ با توجه به فرمول زیر خواهیم داشت:

$$Errorrate = \frac{|\bar{S} - \bar{A}|}{\bar{A}}$$

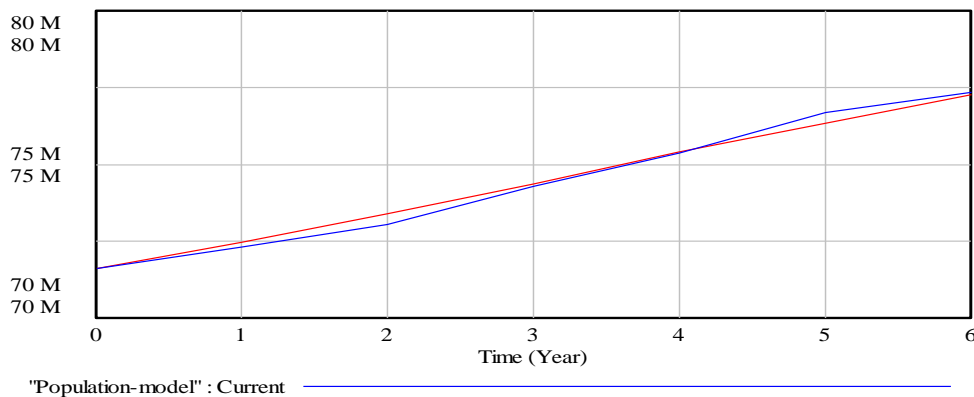
که در آن \bar{A} و \bar{S} به ترتیب میانگین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی مدل هستند. طبق نظر بارلاس (۱۹۹۴) مدلی که خطای آن کمتر از ۵٪ باشد معتبر است [۲۷]. با محاسبه خطا برای دو متغیر حالت تقاضای سالانه سفر ریلی و جمعیت کشور، به ترتیب مقادیر ۰.۲۷۳۷٪ و ۰.۰۳۵۳٪ به دست می‌آید که نشانگر اعتبار بالای این مدل است.

Comparison between model and data of annual railway passenger demand



شکل ۷. نمودار حاصل از شبیه‌سازی تقاضای سالانه سفر ریلی از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲

Comparison between model and data of population

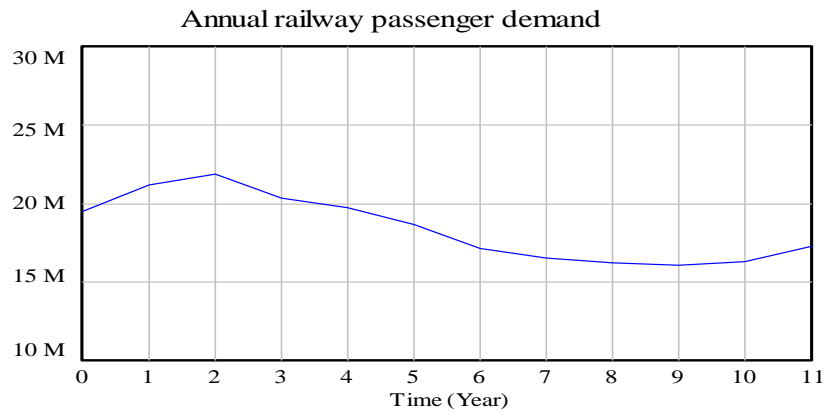


شکل ۸. نمودار حاصل از شبیه‌سازی جمعیت کشور از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲

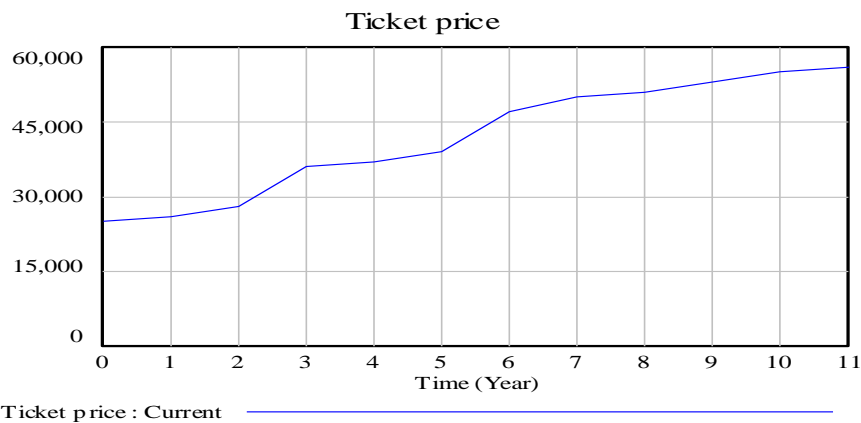
۵. پیش‌بینی رفتار و طراحی سیاست

پس از حصول اطمینان از اعتبار مدل در قسمت قبل، مدل را برای پنج سال دیگر یعنی تا سال ۱۳۹۷ شبیه‌سازی کرده تا اثر

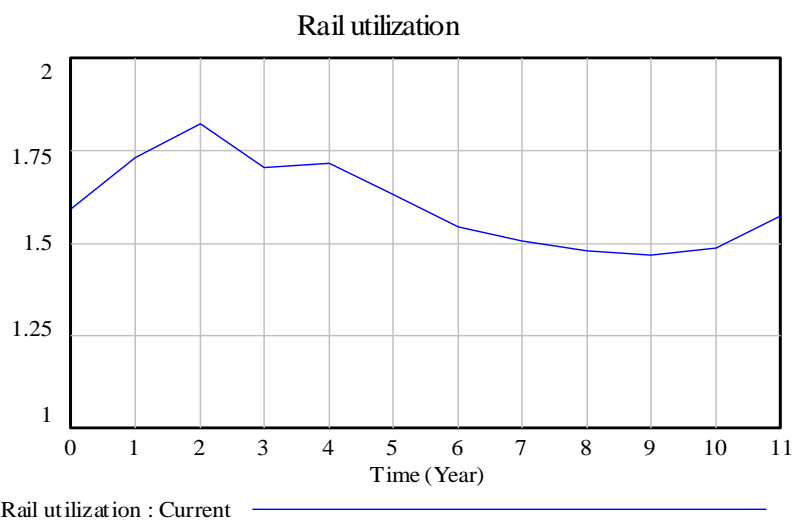
طراحی دو سیاست کاهش حساسیت مردم نسبت به افزایش قیمت بلیط نسبت به تورم آن سال و نیز افزایش میزان استفاده از خطوط ریلی را بر افزایش تقاضای سالانه سفر ریلی بررسی کنیم.



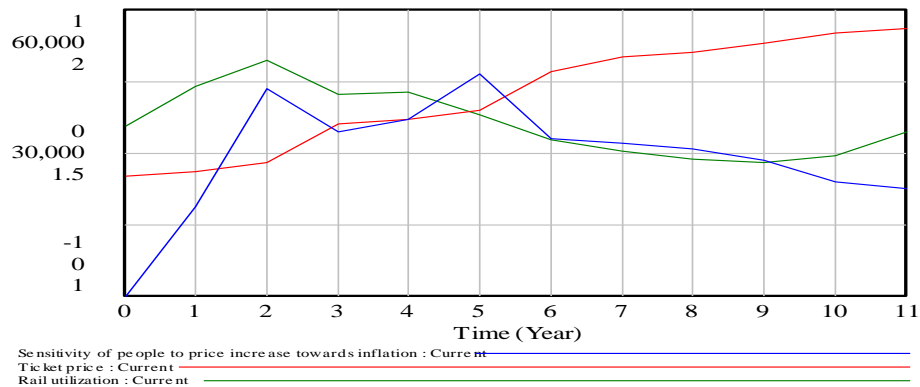
شکل ۹. نمودار حاصل از شبیه‌سازی تقاضای سالانه سفر ریلی از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷



شکل ۱۰. نمودار حاصل از شبیه‌سازی قیمت بلیط از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷

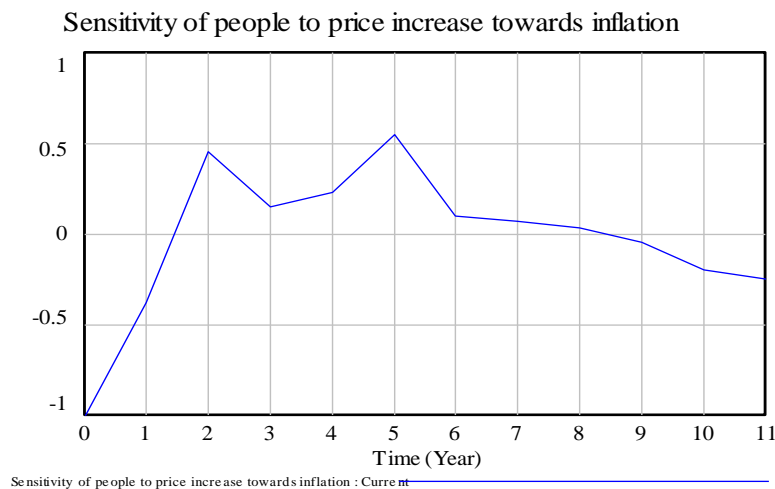


شکل ۱۱. نمودار حاصل از شبیه‌سازی میزان استفاده از خطوط ریلی از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷



شکل ۱۲. نمودار حاصل از شبیه‌سازی حساسیت مردم نسبت به افزایش قیمت بلیط نسبت به تورم کشور از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷

با رسم همزمان نمودارهای میزان استفاده از خطوط ریلی، قیمت بلیط و حساسیت مردم به افزایش قیمت نسبت به تورم آن سال کشور در یک شکل، خواهیم داشت:



شکل ۱۳. نمودار حاصل از شبیه‌سازی رفتار سه متغیر میزان استفاده از خطوط ریلی، قیمت بلیط و حساسیت مردم نسبت به افزایش قیمت بلیط نسبت به تورم کشور

در این شکل، رنگ قرمز بیانگر رفتار متغیر قیمت بلیط، رنگ سبز بیانگر رفتار متغیر میزان استفاده از خطوط ریلی و رنگ آبی بیانگر رفتار متغیر حساسیت مردم نسبت به افزایش قیمت بلیط نسبت به تورم کشور است. همان‌گونه که از نمودار بالا مشاهده می‌شود، هم‌زمان با افزایش قیمت بلیط با شیب ملایم از سال ۹۲ تا ۹۷ (اعداد ۶ تا ۱۱ محور افقی)، حساسیت مردم نسبت به افزایش قیمت نسبت به تورم کشور با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر مردم حساسیت کمتری نسبت به افزایش قیمت بلیط قطار خواهند داشت که بیانگر این مطلب است که تقاضا به مرور زمان افزایش خواهد یافت. صحت این امر نیز با مشاهده رفتار تقاضای سالانه سفر ریلی بعد از سال ۱۳۹۶ (عدد ۹ به بعد در محور افقی شکل ۹) مشخص می‌شود و اگر مدل را برای سالهای آینده (بزرگتر از ۱۳۹۷) شبیه‌سازی کنیم؛ رفتار صعودی متغیر تقاضای سالانه سفر واضح خواهد بود. از طرفی با مقایسه اشکال ۱۳ و ۹ مشخص می‌گردد که از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ (اعداد ۶ تا ۱۰ محور افقی)، میزان استفاده از

خطوط ریلی و میزان تقاضای سالانه سفر ریلی با شیب بسیار کمی در حال کاهش هستند و هم‌زمان با افزایش میزان استفاده از خطوط ریلی و نیز افزایش قیمت با شیب کم و متناسب با تورم از سال ۱۳۹۶ به بعد، میزان تقاضای سالانه سفر ریلی نیز با شیب ملایمی افزایش می‌یابد.

ضمناً در قسمت نمودار علی - معلولی بیان شد که اگر متغیر میزان استفاده از خطوط ریلی را در نظر بگیریم، با یک حلقه بازخوردی مثبت مواجه خواهیم شد که در آن تغییر متغیر تقاضای سالانه سفر ریلی متناسب و هم‌راستا با تغییر متغیر میزان استفاده از خطوط ریلی خواهد بود و با افزایش تقاضای سالانه سفر ریلی، میزان استفاده از خطوط ریلی نیز افزایش می‌یابد که صحت این ادعا نیز با مشاهده اشکال ۹ و ۱۱ و رفتار بسیار نزدیک دو متغیر تایید می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از ابزار پویایی‌شناسی سیستمی و با تمرکز بر تفکر درون‌زا و توجه ویژه به ساختارهای بازخوردی متغیرهای مسئله، مدل پویایی‌شناسی سیستمی مسئله موردنظر یعنی پیش‌بینی میزان تقاضای سالانه سفر ریلی را ساخته و با رسم نمودارهای علی - معلولی و حالت - جریان در نرم‌افزار ونسیم و کمی‌سازی روابط بین متغیرها به شبیه‌سازی مدل طی هفت سال (از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲) پرداختیم. سپس با بررسی اعتبار مدل و نتایج حاصل، نتیجه گرفتیم که مدل از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار متغیر اصلی سیستم (تقاضای سالانه سفر ریلی) طی سالهای آینده نیز بهره گرفت. بدین‌منظور سیستم را به مدت پنج سال دیگر (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷) شبیه‌سازی کردیم. با مشاهده نمودارهای حاصل، می‌توان گفت که برای افزایش تقاضای سالانه سفر ریلی در سالهای آینده، باید سیاست افزایش میزان استفاده از خطوط ریلی در دستور کار راه‌آهن جمهوری اسلامی قرار گیرد. همچنین افزایش قیمت بلیط با شیب ملایم، متناسب با تورم کشور نیز اثر چندانی بر کاهش تقاضا نداشته و مردم باز هم با وجود افزایش قیمت بلیط (به‌خصوص از سال ۱۳۹۷ به بعد) تمایل به سفر ریلی خواهند داشت. در نتیجه، سازمان رجا با کاهش هزینه‌های خود و بهبود خدمات ارائه‌شده به مسافری در کنار دو سیاست کاهش حساسیت مردم نسبت به افزایش قیمت بلیط نسبت به تورم آن سال (و نه لزوماً کاهش قیمت بلیط) و افزایش میزان استفاده از خطوط ریلی می‌تواند سودآوری خود را از طریق افزایش هر چه بیشتر تقاضای سالانه سفر ریلی افزایش دهد.

مراجع

۱. صفارزاده، محمود، معصومی، غلامرضا. (۱۳۹۳). برنامه‌ریزی و طراحی فرودگاه، پژوهشکده حمل‌ونقل، جلد اول.
۲. امین‌ناصری، محمدرضا، بهنام، فرنام. (۱۳۹۱). پیش‌بینی تقاضای سفر ریلی در مسیر تهران مشهد. پژوهش‌نامه حمل‌ونقل، سال نهم، شماره اول، صص ۱۵-۲۹.
۳. قهرمانی، سعید، نیکو، نریمان، و یحیی‌بی. محمدسعید. (۱۳۸۹). بررسی بازار حمل‌ونقل ریلی باری در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران با دیدگاه سیستم دینامیکی، دهمین کنفرانس بین‌المللی حمل‌ونقل و ترافیک، تهران.
۴. ابراهیم‌زاده، عیسی، سقایی، محسن، و ایزدفر. نجمه و الهام. (۱۳۹۰). مدل تحلیلی برنامه‌ریزی تولید سفر و حمل‌ونقل هوایی در کشور مطالعه موردی: فرودگاه بین‌المللی شهیدبهبشتی اصفهان، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، سال سوم، شماره دهم، صص ۸۱-۹۴.
۵. استادی جعفری، مهدی، رصافی، امیرعباس. (۱۳۹۱). الگوی زیست‌محیطی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری با استفاده از مدل‌های سیستم پویایی، علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، سال چهاردهم، شماره سوم، صص ۱۱-۲۸.
۶. تیموری، ابراهیم، احمدی، مجید، و ابوالحسن‌زاده. کاوه. (۱۳۸۶). پیش‌بینی تقاضای سفر با قطار با استفاده از شبکه‌های عصبی، نهمین همایش حمل‌ونقل ریلی، تهران.

۷. استادی جعفری، مهدی، حبیبیان، میقات. (۱۳۹۳). ارزیابی بلندمدت اثر ترکیبی سیاست‌های مدیریت تقاضای حمل‌ونقل با استفاده از مدل پویایی سیستم (مطالعه موردی: کلانشهر مشهد)، مهندسی حمل‌ونقل، سال ششم، شماره اول، صص ۲۱-۳۴.
۸. احدی، حمیدرضا، ضیاتبار احمدی، سیدحسین. (۱۳۹۲). تحلیل دینامیکی پارامترهای موثر در مطلوبیت کریدورهای ترانزیت ریلی بار؛ مطالعه موردی محور سرخس - بندرعباس، مهندسی حمل‌ونقل، سال پنجم، شماره دوم، صص ۱۵۳-۱۶۵.
۹. فرتوک‌زاده، حمیدرضا، رجبی نهوجی، میثم. (۱۳۹۱). مدل‌سازی پویای کلانشهرها به‌منظور ارائه سیاست‌های بهبود حمل‌ونقل (نمونه موردی کلانشهر تهران)، پژوهش‌نامه حمل‌ونقل، سال نهم، شماره اول، صص ۶۳-۸۱.

10. Roumboutsos, A., & Kapros, S. (2008). A game theory approach to urban public transport integration policy. *Transport Policy*, 15(4), 209-215.
11. 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.
12. Mallick, R. B., Radzicki, M. J., Zaumanis, M., & Frank, R. (2014). Use of system dynamics for proper conservation and recycling of aggregates for sustainable road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 61-73.
13. Cheng, Y. H., Chang, Y. H., & Lu, I. J. (2015). Urban transportation energy and carbon dioxide emission reduction strategies. *Applied Energy*, 157, 953-973.
14. Park, S. I., Wang, Y., Yeo, G. T., & Ng, A. K. (2014). System Dynamics Modeling for Determining Optimal Ship Sizes and Types in Coastal Liner Services. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 30(1), 31-50.
15. Chao, Y., & Zishan, M. (2013). system dynamics model of Shanghai passenger transportation structure evolution. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 1110-1118.
16. Haghshenas, H., Vaziri, M., & Gholamialam, A. (2015). Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan. *Cities*, 45, 104-115.
17. Yang, Y., Zhang, P., & Ni, S. (2014). Assessment of the Impacts of Urban Rail Transit on Metropolitan Regions Using System Dynamics Model. *Transportation Research Procedia*, 4, 521-534.
18. Lubis, H. A. R. S., Tasrif, M. (2005). Rail Sector Policy Analysis. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportaion Studies*, 5, 159-174.
19. 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.
20. Ba-Fail, A. O., Abed, S. Y., & Jasimuddin, S. M. (2000). The determinants of domestic air travel demand in the Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Air Transportation World Wide*, 5(2), 72-86.

21. Galvin Jr, J. J. (2002). Air traffic control resource management strategies and the small aircraft transportation system: a system dynamics perspective (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).
22. Tsai, T. H., Lee, C. K., & Wei, C. H. (2009). Neural network based temporal feature models for short-term railway passenger demand forecasting. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3728-3736.
23. Lyneis, J. M. (2000). System dynamics for market forecasting and structural analysis. *System Dynamics Review*, 16(1), 3.
24. Guzman, L. A., de la Hoz, D., Pfaffenbichler, P., and Shepherd, S. (2008). Impacts of fuel consumption taxes on mobility patterns and CO2 emission using a system dynamic approach. 10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation, Athens.
25. Barlas, Y. (1994, July). Model validation in system dynamics. In *Proceedings of the 1994 international system dynamics conference* (pp. 1-10). Sterling, Scotland.