فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۱، پاییز ۱٤۰۰، ص. ۱۲۹۷-۱۲۸۳
مقاله علمی-پژوهشی

مدل‌سازی تأثیر کاربرد خودروهای خودران در کاربری مسکونی و پراکنش جمعیت

علیرضا ماهپور (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
Email: a_mahpour@sbu.ac.ir
محمدامین ابراهیم‌زاده، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰ پذیرش: ۱٤۰۰/۰٤/۲۱

چکیده

هدف این پژوهش بررسی تأثیر عرضه خودروهای خودران بر روی پراکندگی جمعیت و کاربری مسکونی است. ظهور خودروهای خودران بر سیستم‌های حمل‌ونقل تأثیر می‌گذارد و الگوهای آتی توسعه تراکم کاربری زمین را تحت تأثیر قرار خواهد داد. بااین‌حال، تحلیل بسیار کمی از اثرات چنین تحولاتی بر عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل شهری و کاربری زمین وجود داشته است. این تأثیرات به طور بالقوه پیچیده هستند. خودروهای خودران این پتانسیل را دارد که ظرفیت جاده‌ها را افزایش دهد، رانندگی را در دسترس افراد بیشتری قرار دهد و میزان آلودگی هوا را کاهش می‌دهد. این پژوهش تأثیرات خودروهای خودران بر روی کاربری زمین و پراکندگی جمعیت را در نظر می‌گیرد. تمرکز این پژوهش عمدتاً بر روی توزیع خانوار و اشتغال و جمعیت است و خروجی این مبحث بخش مهمی از ورودی‌های مدل سیستم دینامیکی پویا برقراری تعادل بر روی کاربری‌های زمین توسط خودروهای خودران بوده است. به همین منظور مدل سیستم دینامیک پویا ارائه شده با اطلاعات مربوط به سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ ایجاد و وضعیت آن برای سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱٤۳۰ بر اساس سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش مذکور پس از ایجاد نمودار علت و معلولی و شبیه‌سازی سیستم، قبل از استفاده از مدل جهت تحلیل و سناریوپردازی، با استفاده از یک روش اعتبار مدل را مورد آزمون قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با بکارگیری خودروهای خودران می‌توان انتظار افزایش جمعیت، قیمت زمین و مسکن در حومه شهر و کاهش جمعیت و تراکم ترافیک شهری در مرکز شهر داشت.

کلمات کلیدی: خودروهای خودران، پراکندگی جمعیت، قیمت زمین، کاربری مسکونی

۱. مقدمه

خودروهای خودران در حال تبدیل‌شدن به یک مسئله مهم در زمینه حمل‌ونقل است. خودرو خودران بدون دخالت انسان هدایت می‌شوند و وضعیت جاده و ترافیک را خودشان در نظرمی‌گیرند [Fagnant, & Kockelman , 2015]. خودروهای خودران به شش سطح، از سطح صفر تا سطح ۵ بسته به درجه کنترل و توانایی سازگاری با شرایط طبقه‌بندی می‌شوند. معرفی خودروهای خودران باعث می‌شود تا درک مردم نسبت به استفاده از خودرو و هزینه‌های سفر تغییر کند [Hörl and Axhausen. 2016]. اگر افراد به زمان رانندگی محدود نمی‌شدند، تصمیم می‌گرفتند بدون توجه به فاصله از محل کار خود و سایر مکان‌های مهم، زندگی در یک منطقه ساکن با شرایط زندگی بهتر از جمله فضای سبزتر و قیمت ارزان‌تر زمین را انتخاب کنند [Hawkins and Habib, 2018] . خودروهای خودران خدمات جابه‌جایی از درب منازل در اختیار کاربران خود قرار می‌دهد و باعث حذف زمان دسترسی به ایستگاه شده و می‌توانند جایگزین حمل‌ونقل عمومی درآینده نزدیک شوند. خودروهای خودران می‌توانند سفر را راحتر وکارآمدتر کرده و باعث افزایش تراکم کاربری مسکونی درحومه شهر و پراکندگی جمعیت مرکز شهر به حومه شهر و باعث افزایش قیمت‌های مسکونی در حومه شوند [Legêne, et. al., 2020]. در یک ماشین کاملاً خودران، دیگر نیازی نیست که راننده روی جاده تمرکز کند؛ بنابراین می‌توان از زمان سفر به طور مؤثرتری استفاده کرد، به‌عنوان‌مثال برای کارکردن و یا استراحت کردن، در نتیجه، انتظار می‌رود زمان سفر درک‌شده در آن‌ها کمتر از خودروهای شخصی باشد. این امر ممکن است منجر تغییر کاربر-های و پراکنش جمعیت شود [Anderson, et. al., 2014]. سرویس خودران برای جابه‌جایی به اشتراک گذاشته شده دارای زمان انتظار پایین برای سفر می‌گردد و در محدود مقایسه با یک سفر مستقیم توسط خودرو است [OECD, 2015]. رشد یک شهر به معنای افزایش جمعیت و سطح فعالیت‌های اقتصادی است که نهایتاً منجر به مهاجرت نیروی کار از حومه به آن مناطق و درنتیجه سبب افزایش تراکم و شلوغی خواهد شد. [Alessandrini , et al , 2015] رفع مشکلات شهری در راستای توسعه پایدار نیازمند شناخت دقیق تعامل بین کاربری زمین و تکنولوژی جدید حمل‌ونقل می‌باشد. [Auld, J., et al , 2017]. مدل سیستم دینامیکی پویا برقراری تعادل بر روی کاربری مسکونی توسط خودروهای خودران، در واقع الگوی طراحی شده برای شبیه‌سازی رفتاری این ساختارها است. در این مقاله هدف ما اصلاح این مسئله با استفاده از یک مدل سیستم دینامیکی پویا به طور انتخابی برای ارزیابی اثرات احتمالی در طول زمان معرفی خودروهای خودران تحت عرضه در سال‌های متوالی در یک بازه زمانی می‌باشد. مدل دینامیک سیستم پویا که در این پژوهش استفاده شده است، برای شهر تهران طراحی شده است و ما را قادر می‌سازد تا واکنش‌های رفتاری ممکن را به تغییرات در کاربری زمین‌شهری و حومه شهری و تقاضا مسکن در حومه و تغییرات جمعیت را پیش‌بینی می‌کند. در این مقاله به ۲ سوال زیر پرداخته می‌شود.

۱) خودروهای خودران چه تأثیراتی بر روی کاربری زمین اطراف شهر خواهند داشت؟

۲) خودرو خودران تا چه اندازه باعث پراکندگی جمعیت از مرکز شهر به حومه شهر خواهند بود؟

در ادامه مقاله در بخش ۲ مروری بر ادبیات موضوع پرداخته می‌شود. در بخش ۳ روش مدل‌سازی سیستم‌های پویا و فرضیات و الگوی مرجع برای مدل ارائه شده است. در بخش ٤ به اعتبارسنجی مدل و طراحی سناریوها پرداخته شده است. در بخش ۵ نتایج مربوط به سناریو و فرضیات در بخش ٦ نتیجه‌گیری و نهایتاً در بخش ۷ پیشنهادها ارائه شده است.

۲. ادبیات پژوهش

ظهور خودروهای خودران نه‌تنها بر سیستم حمل‌ونقل تأثیر می‌گذارد و بلکه الگوهای آتی توسعه زمین نیز را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. [Boesch, P, et al , 2016] استفاده از زمین یکپارچه و مدل‌های حمل‌ونقل، ابزار مهمی در ارزیابی مسیر پیشرو با این فناوری خواهد بود. مدل تعادل عمومی فضایی مدل تعادل فضایی هلند[1] که به مدل‌های تعامل حمل‌ونقل کاربری زمین تعلق دارد برای کشور هلند ساخته شده است. این مدل تغییرات در محل خانه‌ها و مشاغل، الگوهای رفت و آمد، قیمت مسکن، منافع مصرف‌کننده و مالک زمین را برای یک کشور پرجمعیت در هلند محاسبه می‌کند [Teulings, et. al., 2017] این مطالعه تأثیر توسعه در حمل‌ونقل بر انتخاب محل مسکونی افراد و استفاده از زمین در هلند رانشان می‌دهد و این انتخاب‌های فردی کارگران دررابطه‌با محل خانه، محل کار و نحوه رفت‌وآمد آنها باتوجه‌به عرضه خودروهای خودران را بررسی می‌کند. یک تفاوت مهم در مدل کاربری زمین مدل تعادل فضایی هلند با همتایان خود این است که شامل اطلاعاتی در مورد قیمت زمین بوده و قادر به مدل کردن تعادل در بازار زمین مسکونی است. اطلاعات در مورد قیمت زمین امکان محاسبه اثرات رفاهی پیشرفت‌های مختلف در حمل‌ونقل را فراهم می‌کند. نتایج این مدل نشان می‌دهد که خودروهای خودران منجر به حاشیه‌نشینی می‌شود: شهرها جمعیت خود را به حومه و مناطق غیرشهری از دست می‌دهند. دلیل حاشیه‌نشینی این است که سفره‌ای طولانی‌تر قابل‌قبول‌تر شده‌اند. شهرهای کوچک و حومه آن‌ها بیش‌ترین تلفات جمعیت را تجربه می‌کنند، تقاضا برای مکان‌های مسکونی مختلف ممکن است تغییر کند. همان طور که در بالا بحث شد، مکان‌های حومه و غیرشهری به‌خاطر عرضه خودروهای خودران نسبتاً جذاب‌تر می‌شوند. [Chen, D, & Kockelman, K. M., 2016] به دلیل مؤلفه خودروهای خودران جذاب‌تر این مکان‌های حومه شهری برای زندگی مناسب‌تر و باعث افزایش قیمت زمین و تقاضا مسکن در سال‌های آینده با وجود این تکنولوژی برتر نسبت به جمل و نقل عمومی خواهد شد. [Hang, Guhathakurta., & Khalil, 2018]. مدل سیستم پویا برای کشور انگلستان شهر لیدز طراحی شده است. این مدل ساخته‌شده برای شهر لیدز منجر شده است که افراد نسبت به واکنش‌های رفتاری خودروهای خودران نسبت به کاهش تعداد پارکینگ، فضاهای پارک و کاهش ارزش‌های زمان سفر درون خودرو را برای کاربران که از این تکنولوژی استفاده می‌کنند را راحت‌تر کند .این مدل تأثیرات خودروهای خودران در سال‌های آتی استفاده از زمین و تراکم کاربری مسکونی را پیش‌بینی کرده است[2]. مدل سیستم پویا شهر لیدز یک مدل دینامیک، یکپارچه استفاده از زمین و تعامل حمل‌ونقل LUTI است. مدل سیستم پویا شهر لیدز مبتنی بر روش‌های دینامیک سیستم پویا است که تضمین می‌کند که تعاملات پیچیده شامل حلقه‌های بازخورد و غیرخطی بودن‌ها در رفتار در نظر گرفته می‌شوند [Legêne, et. al., 2020]. پویایی سیستم در دهه ۱۹۵۰ توسط جی‌فارس‌تر و همکارانش در دانشکده مدیریت MIT اسلون تأسیس شد، و در مراحل اولیه برای درک تغییر کاربری زمین به کار گرفته شد. مدل مدل سیستم پویا شهر لیدز شامل یک مدل حمل‌ونقل است که رفتار سفر جمعیت مربوط به مسکن و محل کار، یک مدل توسعه مسکن، یک مدل انتخاب محل خانه، یک مدل توسعه محل کار، یک مدل انتخاب محل کار را بررسی می‌کند. [Pfaffenbichler, et. al., 2008]. تمام این مدل‌ها از طریق دسترسی، توزیع فضایی مبدأ و مقصد و در دسترس بودن و قیمت زمین با یکدیگر در ارتباط هستند. نتایج مدل مدل سیستم پویا شهر لیدز نشان می‌دهد که کیلومتر خودرو در سال ۲۰۵۰ می‌تواند بیش از ۵۰ ٪ و بالاتر برای سناریوی معمول کسب‌وکار باشد. استفاده از حمل‌ونقل عمومی ممکن است تا ۱۸ ٪ کاهش یابد و دسترسی به افراد وابسته به آن را تهدید کند، درحالی‌که پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری می‌تواند تا ۱۳ ٪ کاهش یابد و مزایای سلامتی آن‌ها را کاهش

می‌دهد [Emberger and Pfaffenbichler, 2017]. مدل توسعه شهری کپنهاگ متشکل از پنج زیر مدل مختلف است که جمعیت، کاربری زمین، ترافیک، پارکینگ، و توسعه تفکیک مدل را شبیه‌سازی می‌کند. هر یک از مدل‌های فرعی برای همه ۸۶۰ منطقه در منطقه شهری پارامتری شده‌اند. این مدل از نرخ‌های نفوذ مختلف خودروهای خودران به عنوان ورودی‌های سناریو استفاده می‌کند [Nieuwenhuijsen et. al., 2018].

خودروهای خودران آسایش و ایمنی را افزایش می دهند ، اما زمان سفر های بیشتری را ایجاد می کنند و در کل مزایای بسیار محدودی برای افراد یا جامعه دارند [Hensher, 2018].

۳. روش‌شناسی

روش سیستم‌های تحلیل دینامیکی سیستم پویا برای تجزیه‌وتحلیل بازخورد سیستم‌های پیچیده طراحی شده است. این ابزار بر اساس تکنولوژی شبیه‌سازی کامپیوتری می‌تواند روابط بین عوامل مختلف، داده‌های کمی و ارائه اطلاعات در مورد ساختار بازخورد و رفتار سیستم را تجزیه‌وتحلیل کند. این درک کلی سیستم و روابط مختلف مرتبط باسیاست‌های مربوط به عملکرد پویا سیستم را ساده می‌کند. علاوه بر این سیستم‌های پویا تجزیه‌وتحلیل کمی و کیفی را ترکیب می‌کند و از استدلال ترکیب برای توصیف خصوصیات رفتاری تعریف نشده استفاده می‌کند؛ بنابراین سیستم‌های پویا گزینه بهتری در برخورد با سیستم‌های پیچیده است. بازخورد مفهوم اصلی زبان سیستم و فرایندی است که در آن تغییر یک متغیر در یک سری از ساختار حلقه –حلقه برمتغییرهای دیگر تاثیر می‌گذارد که منجر به افزایش یا کاهش می‌شود. دراین‌رابطه دو نوع پیوند علی وجود دارد. حلقه‌های بازخوری مثبت سبب ایجاد رشد شده و انحرافات را بزرگ و تغییرات را تقویت می‌کنند. حلقه‌های منفی در جستجوی توازن، تعادل و سکون‌اند. این حلقه ها برای رساندن وضعیت سیستم به هدف یا وضعیت مطلوب فعالیت می‌کنند. غالبا نرخ نزدیک شدن به هدف ثابت نیست. نوسان سومین الگو از رفتارهای پایه است که در سیستم‌های پویا مشاهده می‌شود. نوسان-ها به وسیله حلقه‌های بازخوری منفی به وجود می‌آیند. وضعیت سیستم با هدف آن مقایسه می‌شود و اقدامات اصلاحی انجام می-گیرد. در یک سیستم نوسانی، وضعیت سیستم پیوسته از هدف یا وضعیت تعادل فراتر رفته سپس باز می‌گردد. خارج شدن از حد تعادل از حضور تاخیرهای زمانی قابل توجه در حلقه منفی ناشی می‌شود. نوسان‌ها یکی از رایج‌ترین الگوهای رفتاری هستند که شامل نوسان‌های میرا، چرخه‌های محدود و آشوب هستند. تاخیرها می‌توانند در هر یک از رابطه‌های علی در یک حلقه منفی بروز کنند، هرگاه حداقل در یکی از رابطه‌ها تاخیرهایی وجود داشته باشد.

۳-۱ الگوی مرجع

در این پژوهش داده‌های موردنظر از گزیده آمار و اطلاعات حمل‌ونقل و ترافیک تهران سال ۱۳۹۷ و اطلاعات نفوس مسکن سال ۱۳۹۵ جمع‌آوری‌شده است. در کلان‌شهر تهران روزانه بیش از ۱۹ میلیون سفر در شبکه معابر جریان دارد. این تعداد سفر منشأ بسیاری از مشکلات شهر تهران است به‌طوری‌که روزانه قریب به ۱۲/۵ میلیون لیتر بنزین توسط خودروها مصرف می‌شود که این امر خود باعث افزایش آلودگی محیط‌زیست و در نتیجه کاهش ضریب ایمنی و سلامتی شهروندان است. ضمن اینکه افزایش تردد خودروها باعث افزایش تصادفات و خسارات مادی و جانی ناشی از آن می‌شود. در کلان‌شهر تهران افراد سفرهای خود را با خودرو شخصی که شامل ٦٧ درصد از سفرها انجام می‌گیرد. سیستم اتوبوس‌رانی تهران شمال ٤درصد و تاکسی شامل ۸ درصد سهم حمل‌ونقل در روز در ساعات اوج می‌باشد. سیستم مترو سالیانه ۷۲۸ میلیون سفر در سال با آن انجام می‌گیرد. امروزه مسائل حمل‌ونقل و ترافیک شهر تهران به‌صورت کلاف پیچیده و سردرگمی درآمده است که درصد تأثیر در ترافیک ساعات اوج صبح وسیله نقلیه شخصی ٦٧ درصد، اتوبوس واحد ۳/۸ ، تاکسی

۱۸/٦ و سایر وسایل ۷/۷ درصد می‌باشد. جمعیت شهر تهران طبق سرشماری سال ۱۳۹۵ بالغبر ۱۳/۲٦۷/٦۳۷ میلیون نفر بوده است که ۱۲/٤٥۲/۲۳۰ میلیون نفر در نقاط شهری و ۸۱٤,٦۹۸ در نقاط روستایی ساکن هستند. ۵/۱۷ درصد جمعیت کل کشور را در خود جای‌داده است. از این میزان، ۱۲/۲۵۲ هزار نفر در مناطق شهری و ۱٦/۱ هزار نفر در مناطق روستاییِ آن ساکن هستند. ٦/٦۳ درصد از جمعیت شهری استان تهران در شهر تهران و مابقی در ٤٤ شهر دیگر استان ساکن هستند. رشد جمعیت شهر تهران ۱/٤ درصد است که در مقایسه با دهه قبل اندکی افزایش‌یافته است.

۳-۲ فرضیه سیستم‌های پویا

در این پژوهش یک روش بر اساس تحلیل سیستم‌های پویا را ارائه شده است. هدف این است که تأثیرات مربوطه را برای که شهرهای آتی از تکنولوژی خودروهای خودران بهره می‌برند چه تأثیراتی بر روی شهر و حومه شهر خواهد داشت .در این پژوهش از مدل تحلیل سیستم‌های پویا برای تأثیرات خودرو خودران بر توسعه شهری و حومه شهر استفاده خواهد شد. این مدل تغییرات در جابه‌جایی جمعیت از شهر به حومه شهر و بالعکس و الگوهای رفت‌وآمد را نشان می‌دهد. در این مدل تراکم کاربری مسکونی، تقاضا مسکن، بررسی قیمت زمین در شهر و حومه شهر تهران را محاسبه خواهد کرد.

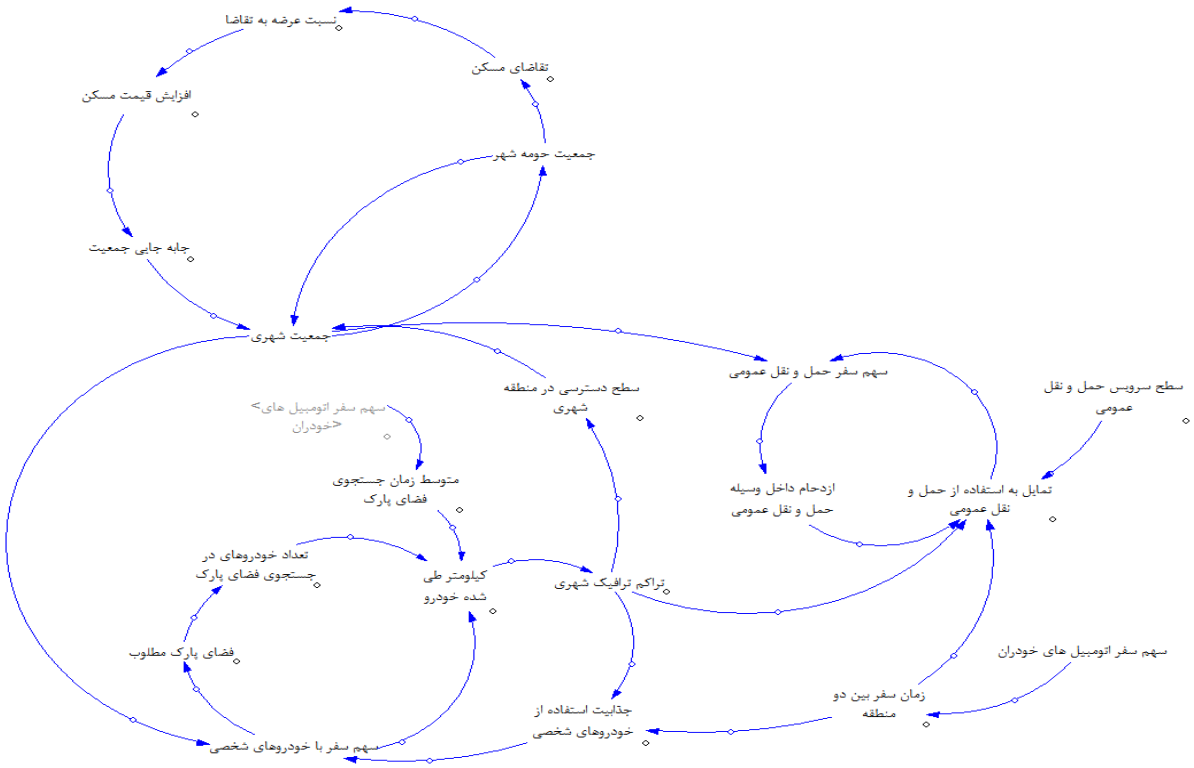
۳-۳ رابطه علت و معلول در سیستم‌های پویا

پیوند منفی تأثیر غیرمستقیم متغیر مستقل بر متغیر وابسته را نشان می‌دهد. این بدان معنی است که اگر متغیر مستقل (X) یا علت افزایش یابد، متغیر وابسته (Y) یا معلول کاهش می‌یابد. پیوند مثبت تأثیر مستقیم متغیر مستقل بر متغیر وابسته را نشان می‌دهد و این بدان معنی است که اگر متغیر مستقل (X) یا علت افزایش یابد، متغیر وابسته (Y) یا معلول نیز افزایش می‌یابد به‌علاوه، رابطه بین متغیرها خطی نیست، درحالی‌که از نوع حلقه علی و معلولی است. دو نوع حلقه وجود دارد. به‌منظور شناسایی اثرات منفی یا مثبت حلقه، باید تغییر کوچکی در یکی از متغیرهای داخل حلقه کشف شود. بنابراین، اگر بازخورد تغییر اولیه را افزایش دهد و حلقه مثبت است. در غیر این صورت منفی است. نمادهای حلقه‌های مثبت و منفی در شکل ۱ نشان‌داده‌شده است:

شکل ۱. نمادهای حلقه مثبت و منفی

۳-٤ نمایش حلقه علت و معلول در سیستم‌های پویا

اولین گام در فرایند خودروهای خودران توسعه نمودار حلقه علت و معلولی دقیق بود که اتصالات بین خودروهای خودران و جذابیت استفاده از وسایل مختلف حمل‌ونقل را مشخص می‌کرد. شکل ۲ نمودار حلقه علت و معلول خودروهای خودران حاصل را نشان می‌دهد که اثرات معرفی خودروهای خودران بر جذابیت استفاده از خودرو را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار حلقه علت و معلول سیستم‌های پویا خودروهای خودران

حلقه‌های مربوط در نمودار علت و معلول وقتی جمعیت شهری افزایش پیدا می‌کند سهم سفر با خودروهای شخصی در روز افزایش پیدا خواهد کرد به علت این‌که خاصیت جمعیت به این صورت می‌باشد و افراد با سفرهای بیشتری با خودرو شخصی خواهند داشت. [Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. 2016] وقتی این اتفاق صورت بگیرد کیلومتر طی شده توسط خودروها افزایش پیدا خواهد کرد به عبارتی مسافت‌های طولانی با خودروهای شخصی صورت می‌گیرد و باعث تراکم ترافیک شهری می‌شود. زمانی که تراکم ترافیک بالا رود سطح دسترسی کاهش پیدا خواهد کرد. Martinez, L. M., & Viegas, J. M]. [2017 جمعیت از شهر به حومه شهر انتقال پیدا می‌کند و به این حلقه متعادل‌کننده می‌گویند که در نمودار مشخص هستند. جمعیت حومه شهری زمانی که افزایش پیدا کند تقاضای مسکن در حومه شهر بالا می‌رود و نسبت عرضه به تقاضا کاهش پیدا خواهد کرد. این باعث می‌شود که قیمت مسکن در حومه شهر افزایشی شود و دوباره جمعیت به شهر انتقال پیدا می‌کنند و جمعیت شهری افزایشی می‌شود و باتوجه‌به فاکتورهای که وجود دارد [Axhausen& Gärling,. 1992] .ظرفیت برای شهر در نظر گرفته میشود و باعث انتقال جمعیت به حومه شهر خواهد شد و به‌عنوان یک حلقه در نظر گرفته می‌شود که با فلش در نمودار مشخص هستند. [Martijn F. et al ,2020] وقتی سهم سفر حمل‌ونقل عمومی افزایش پیدا کند باعث می‌شود که افراد بیشتر از آن استفاده کنند و ازدحام داخل وسایل حمل‌ونقل عمومی افزایش پیدا کند. وقتی ازدحام زیاد شود تمایل استفاده از حمل‌ونقل عمومی کمتر خواهد شد و سهم حمل‌ونقل عمومی کاهش پیدا می‌کند که به‌عنوان یک حلقه متعادل‌کننده در نظر گرفته می‌شود که در نمودار مشخص هستند. [Fagnant, D. J, & Kockelman, K. M 2014 ,وقتی سهم سفر با خودرو شخصی افزایش پیدا کند احتیاج به فضای پارک بیشتری دربر خواهد داشت. تعداد خودروهای بیشتر در جستجو پارک افزایش می‌کند و کیلومترطی

شده خودرو به نسبت بالا خواهد رفت و تراکم ترافیک شهری افزایش پیدا می‌کند. وقتی تراکم ترافیک شهری بالا رود جذابیت رانندگی با خودرو کاهشی خواهد شد و به عنوان یک حلقه متعادل‌کننده در نظر گرفته می‌شود که در نمودار مشخص هستند.]
Zhao, Y., & Kockelman, K. M, 2017]

٤. مدل سیستم دینامیک پویا

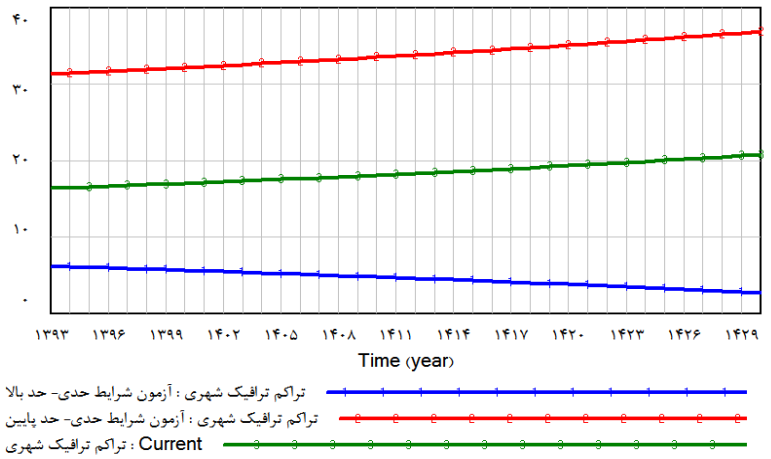
رویکرد سیستم‌های پویا در واقع به مجموعه‌ای از ابزارهای کاربردی اطلاق می‌گردد که توان بالایی در فهم و تحلیل سیستم‌های پیچیده پویا دارند. این روش مدل‌سازی غالباً برای مسائل کلان و بلندمدت کاربرد دارد و به دلیل نوع آن، از جزئیات مربوط به اجزاء تشکیل‌دهنده صرف‌نظر می‌شود و صرفاً به‌صورت مقداری نمایش داده می‌شوند. در این پژوهش برای بررسی تأثیر خودروهای خودران بر کاربری زمین و پراکنش جمعیت، از مدل سیستم‌های پویا استفاده شده است. در این راستا با استفاده از اطلاعات مربوط به سالهای ۱۳۹۳ الی ۱۳۹۸ مدل توسعه یافته و اعتبارسنجی شده است و برای سالهای ۱۳۹۹ الی ۱٤۳۰ پیش‌بینی-های انجام شده است که اساس پیش‌بینی‌های بر پایه سناریوسازی است.

٤-١ اعتبارسنجی مدل

یک روش ارزیابی مدل است که تعیین می‌نماید نتایج یک تحلیل آماری بر روی یک مجموعه داده تا چه اندازه قابل تعمیم و مستقل از داده‌های آموزشی است. این روش به طور ویژه در کاربردهای پیش‌بینی مورداستفاده قرار می‌گیرد تا مشخص شود مدل موردنظر تا چه اندازه در عمل مفید خواهد بود. به‌طورکلی یک دور از اعتبارسنجی ضربدری شامل افراز داده‌ها به دو زیرمجموعه مکمل، انجام تحلیل بر روی یکی از آن زیرمجموعه‌ها (داده‌های آموزشی) و اعتبارسنجی تحلیل با استفاده از داده‌های مجموعه دیگر است (داده‌های اعتبارسنجی یا آزمایش) برای کاهش پراکندگی، عمل اعتبارسنجی چندین بار با افرازهای مختلف انجام و از نتایج اعتبارسنجی‌ها میانگین گرفته می‌شود. در پژوهش مذکور پس از ایجاد نمودار حلقه علت و معلولی سیستم‌های پویا خودروهای خودران قبل از استفاده از مدل جهت تحلیل و سناریوپردازی، می‌بایست با استفاده از یک آزمون شرایط حدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبیه سازی مدلهای پویایی شناسی سیستم ها و پیش از سناریو سازی و اتکا به نتایج آن میبایست مدل توسعه داده شده اعتبارسنجی (بر روی آن صورت گیرد.آزمون رفتارحدی ر این روش مدل در شرایط سخت قرار میگیرد تا مشخص شود که رفتار آن چگونه است. در حقیقت هدف این روش این است که با تغییر زیاد در پارامترهای مدل مدل رفتار عجیب از خود نشان ندهد یا دچار خطا نشود.اعتبار سنجی مدل با آزمون کفایت مرز در این مدل بررسی شده است.

٤-٢ آزمون شرایط حدی

در این آزمون بررسی می‌شود که آیا مدل هنگامی‌که ورودی‌های آن در شرایط حدی مانند صفر یا بی‌نهایت قرار می‌گیرند رفتار مناسبی نشان می‌دهند یا خیر. به‌عبارت‌دیگر در این آزمون، پایداری مدل در شرایط حدی سنجیده می‌شود. برای بررسی این آزمون، متغیر فضای پارک موجود در حالات حدی خود قرار داده شد که نتایج آن در شکل ۳ نمایش‌داده‌شده است. نمودار ۳ به شکل مفهومی تراکم ترافیک شهری را نشان می‌دهد به صورت یک مفهوم بی بعد در محور قایم نشان داده شده است. در این نمودارخط سبز نشان‌دهنده وضعیت فعلی و خطوط آبی و قرمز بیانگر تراکم ترافیک در شرایط حدی بالا و پایین هستند.

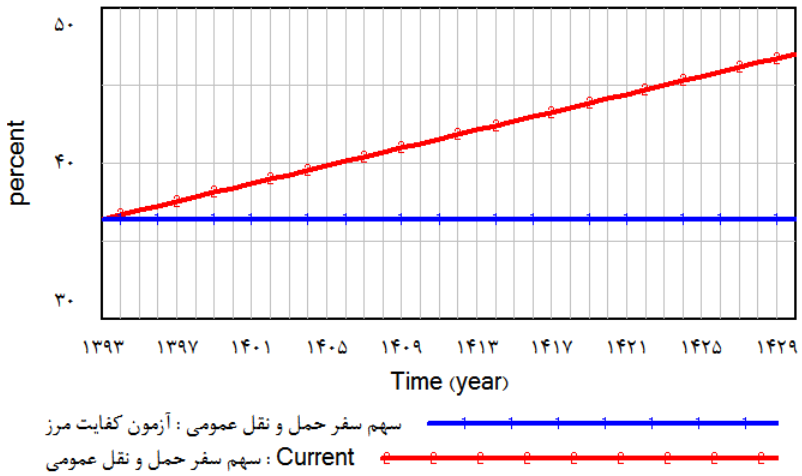


شکل ۳. آزمون شرایط حدی تراکم ترافیک شهری

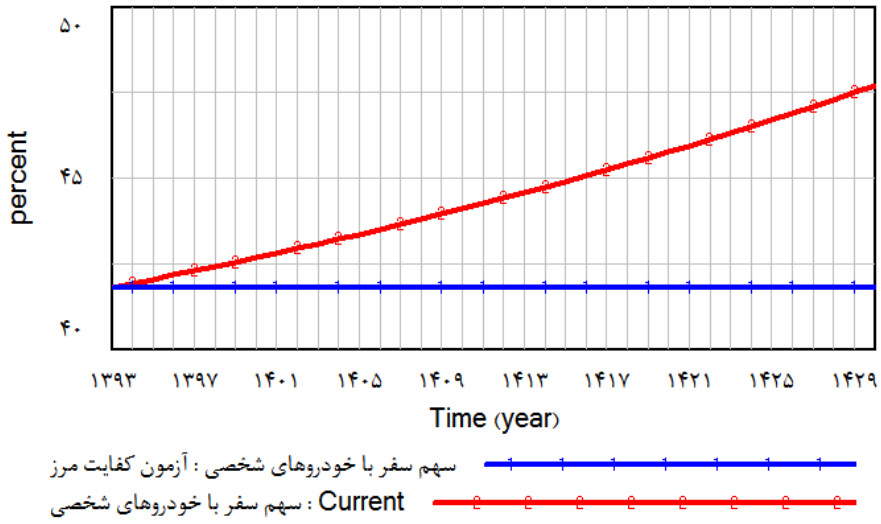
٤-۳ آزمون کفایت مرز

این آزمون بررسی می‌کند که مفاهیم مهم مرتبط با مسأله، درون مدل در نظر گرفته شده باشند. در این تحقیق، مدل پیشنهادی پس از مرور ادبیات متغیرهای کلیدی مدل را شناسایی کرده است و علاوه بر این، ضرورت و اهمیت متغیرهای اشاره شده توسط کارشناسان و خبرگان نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در جواب این سؤال که آیا رفتار مدل پس از حذف مفروضات مرز، تغییر چشمگیری نشان می‌دهد یا خیر، نتایج حاصل از مدل ارائه شده، پس از حذف قسمت‌هایی از مدل و تغییر مرز مدل مورد بررسی قرار گرفت. در شکل زیر نمودار مربوط به تاثیر حذف متغیر «جمعیت» نشان داده شده است. با حذف این عامل حجم سفرها همانطور که انتظار می‌رود هیچ تغییری نخواهد داشت و در همان مقدار اولیه ثابت خواهد بود.



شکل ٤. آزمون کفایت مرز



شکل ۵. آزمون کفایت مرز

شکل ٤ سهم سفر حمل و نقل عمومی و شکل ۵ سهم سفر خودروهای شخصی و مربوط به حالتی که جمعیت وجود داشته باشد را با زمانی که این متغیر حذف بشود مقایسه می‌کند که نشان از تاثیر قابل توجه کاربرد خودروهای خودران در سهم وسایل نقلیه شخصی و عمومی است.

٤-٤ سناریوسازی

پس از آزمون مدل میزان تغییرات متغیرهای کلیدی تحت سناریوهای زیر بررسی می‌گردد:

۱. سناریوی حفظ وضعیت فعلی
۲. سناریوی عرضه خودرو خودران
۳. سناریو رشد ثابت خودرو خودران

٤-٤-١ سناریو حفظ وضعیت فعلی

در این سناریو فرض می‌شود روند متغیرهای موجود در مدل مطابق با گذشته و بدون هیچ تغییر یا اتخاذ سیاست جدیدی دنبال می‌شود. کلیه متغیرها همانند آنچه پیش‌ازاین تعریف شده است.

٤-٤-٢ طراحی سناریو عرضه خودرو خودران

هدف این سناریو افزایش سهم سفر خودروهای خودران است به‌طوری‌که با توسعه آن، بتوان ظرفیت‌های موجود در این زمینه را شناسایی کرد چرا که این خودروها و استفاده از آن‌ها در کنترل ترافیک و بهبود وضعیت حمل‌ونقل کارا و اثربخش خواهد بود. به همین دلیل سناریوی عرضه خودروهای خودران بر همین اساس در نظر گرفته شده است و فرض می‌کند طی دوره زمانی در نظر گرفته شده تا حد مناسبی افزایش سهم سفر خودروهای خودران مدنظر قرار گیرد. این سناریو افزایش ۲۰ درصدی سهم سفر خودروهای خودران در سال ١٤٠٩ را بررسی می‌کند. در این سناریو فرض بر این است که خودروهای خودران باعث کاهش تراکم ترافیک شهری و افزایش تراکم کاربری مسکونی حومه می‌گردد و باعث تغییرات مسکن و زمین در حومه شهر خواهند بود.

٤-٤-٣ طراحی سناریو رشد ثابت خودرو خودران

در طراحی سناریو فرض بر این است که هرسال خودروهای خودران تعداد آن‌ها نسبت به سال قبل ۵ درصد افزایش خواهد داشت. در این سناریو تأثیرات خودروهای خودران بر روی پراکندگی جمعیت می‌باشد و این‌که جابه‌جایی جمعیت باعث چه تأثیراتی بر روی تقاضا مسکن و قیمت زمین می‌گردد. در این سناریو با فرض که هرسال عرضه خودروهای خودران را سالانه افزایش دهیم و سهم سفر با خودروهای خودران برای جابه‌جایی

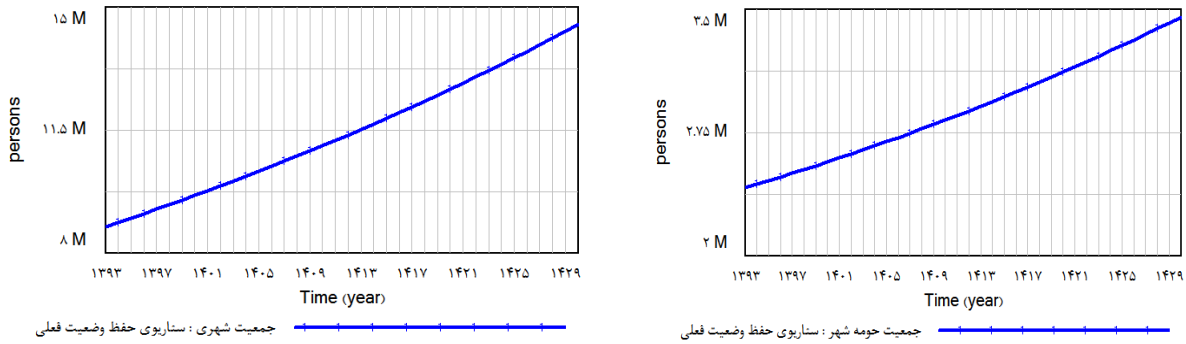
جمعیت از مرکز شهر به حومه شهر در سال‌های آتی همراه با رشد چشمگیری باشد.

۵. نتایج

پس از انجام طراحی نمودار حلقه علت و معلولی در سیستم‌های پویا و طراحی ۳ سناریو و تغییرات سهم عرضه خودروهای خودران در هر سناریو و ورود اطلاعات به بانک اطلاعاتی و تهیه پایگاه داده‌ها، در این بخش به ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی پرداخته شده است. هدف نهایی از این پژوهش بررسی تأثیرات خودروهای خودران بر روی کاربری زمین، جمعیت شهر و حومه شهر، تغییرات بر روی تراکم ترافیک شهری ارائه شده است.

۵-۱ نتایج سناریوی حفظ وضعیت فعلی

پس از انجام طراحی نمودار حلقه علت و معلولی در سیستم‌های پویا و طراحی ۳ سناریو و تغییرات سهم عرضه خودروهای خودران در هر سناریو و ورود اطلاعات به بانک اطلاعاتی و تهیه پایگاه داده‌ها، در این بخش به ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی پرداخته شده است. هدف نهایی از این پژوهش ارائه تأثیرات خودروهای خودران بر روی کاربری زمین، جمعیت شهر و حومه شهر، تغییرات بر روی تراکم ترافیک شهری ارائه شده است.



شکل ٦. نمودار سناریو حفظ وضعیت فعلی

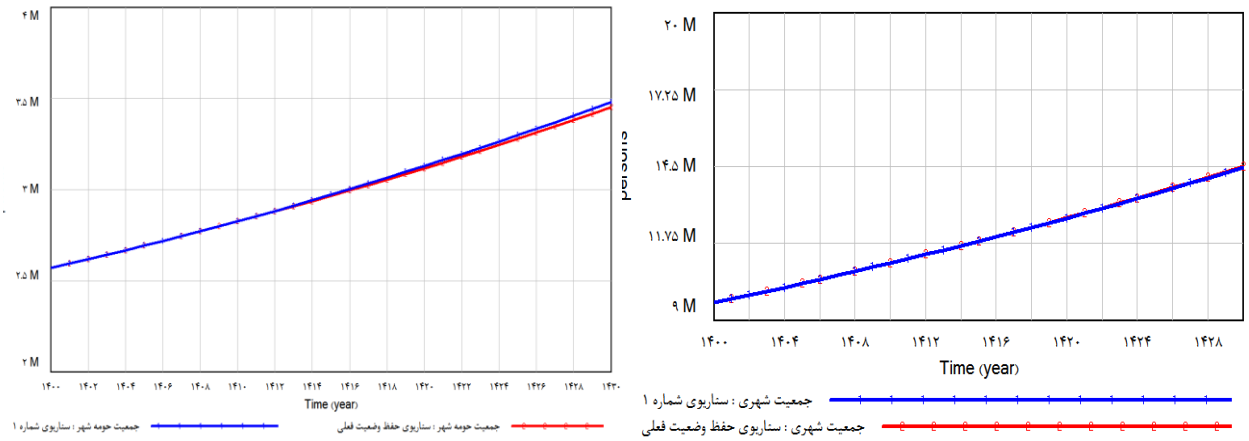
۵-۲ نتایج سناریوی عرضه خودرو خودران

باتوجه‌به عرضه ۲۰ درصدی خودروهای خودران و ویژگی‌های جذاب که این خودرو جدید دارد، تمامی افراد حتی کسانی که گواهینامه ندارند می‌تواند از آن استفاده کنند. خودروهای خودران در این سناریو باعث اثرگذاری مثبت و کاهش تراکم ترافیک شهری تهران شده است و باعث کاهش راه‌بندان‌های ساعات اوج ترافیک در سال‌های متوالی اثر مثبت داشته است. عرضه خودروهای خودران منجر به پراکندگی جمعیت از شهر به حومه شهر می‌شود. هنگامی‌که حومه شهر با افزایش جمعیت مواجه شود می‌توان انتظار رشد کاربری زمین و افزایش واحدهای مسکونی در آنجا را داشت.

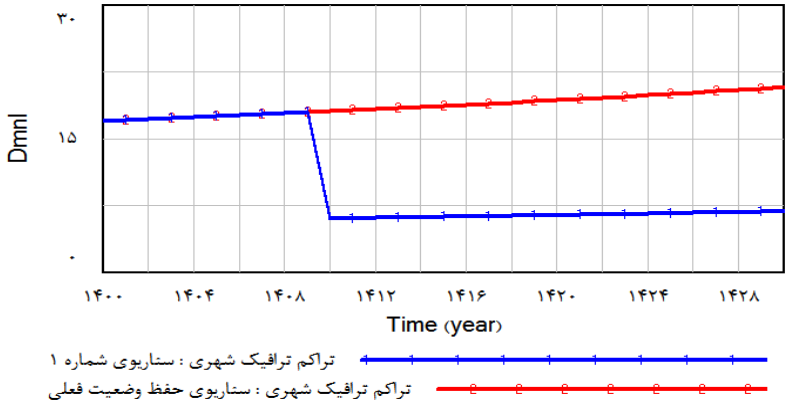
به عبارت دیگر با توجه به انتقال جمعیت از مرکزشهر به حومه شهر می‌توان انتظار افزایش قیمت مسکن و زمین در حومه شهر را داشت و نتیجتا تعادل قیمت در مناطق مرکز شهر و حومه شهر به وجود می‌آید.

از آنجایی که در عرضه ۲۰ درصدی خودروهای خودران تراکم ترافیک شهری در مناطق مرکزی کاهش پیدا می‌کند، انتظار می‌رود که آلودگی هوا نیز کاهش یافته و دسترسی به کاربری داخل محدوده مرکزی شهر نیز آسانتر شود. می‌توان انتظار داشت، افرادی که از تکنولوژی خودروهای خودران برای رفت‌وآمد خود استفاده می‌کنند مکان‌های دورتر از محل کار خود را برای زندگی انتخاب

کنند. این تغییرات در شکل ٦ و ٧ ارایه شده است. در شکل ٨ با توجه به عرضه خودروهای خودران باعث کاهش تراکم ترافیک شهری در سال های متوالی شده است و تاثیرات بالقوه برای بالا بردن افزایش ظرفیت دسترسی مرکز شهر بوده است.



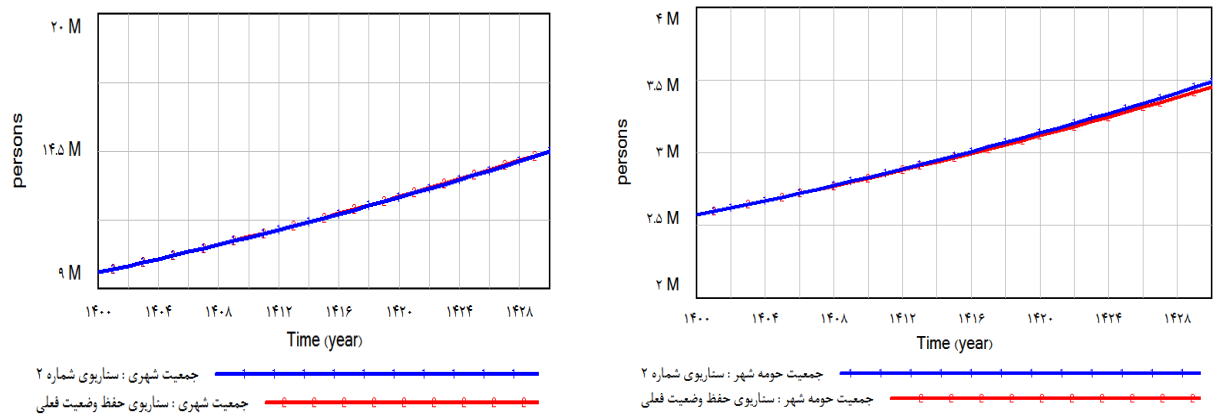
شکل ۷. نمودار تغییرات متغیرهای خودرو خودران



شکل۸. نمودار تغییرات تراکم ترافیک شهری

۵-۳ نتایج سناریو رشد ثابت خودرو خودران

در این سناریو افزایش تدریجی عرضه خودروهای خودران از سال ۱٤۰۵ تا سال ۱٤۳۰ را داشته است. باتوجه‌به فرضیات اعمال شده در مورد خودروهای خودران باعث شده که زندگی در حومه شهر توسط خودروهای خودران جذاب‌تر خواهد بود. سفر با خودروهای خودران راحت‌تر بوده و افراد به همین دلیل با وجود خودروهای خودران محل زندگی خود را از مرکز شهر به حومه شهر تغییر داده‌اند و باعث افزایش جمعیت حومه و کاهش مرکز شهر شده‌اند. باتوجه‌به جابه‌جایی جمعیت حومه تقاضای مسکن در حومه افزایشی شده است و باعث رشد زمین‌های مسکونی اطراف و افزایش قیمت خانه‌های حومه خواهد شد. باتوجه‌به انتقال جمعیت از مرکز به حومه شهر توسط خودروهای خودران باعث کاهش جمعیت در مراکز اصلی شهر می‌شود و باعث کاهش تقاضای مسکن در ناطق پرتردد در سال‌های آتی خواهد بود و با توجه به نبود تقاضا برای واحد های مسکونی و زمین در مرکز شهر با کاهش قیمت مواجهه خواهد شد.



شکل ۹. نمودار تغییرات رشد ثابت متغیرهای خودرو خودران

٦. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آثار استفاده از خودروهای خودران در تغییرات کابری و پراکنش جمعیت پرداخته شد. باتوجه‌به اثرات کاربری زمین بر پایه تغییرات در انتخاب‌های مکان افراد، مطالعات بیشتر نشان می‌دهند که خودروهای خودران به‌ویژه زمانی که کاهش ارزش زمان و ظرفیت منجر به افزایش جمعیت در حومه شهر بالعکس افزایش جمعیت در مراکز شهری می‌شود. بااین‌حال، عرضه خودروهای خودران در ترکیب با طرح راه‌های اشتراک (بدون تغییر در ارزش زمان) یا سیستم حمل‌ونقل عمومی کارآمدتر به دلیل جایگاه اتوماتیک به‌عنوان مثال خودروهای خودران رفت‌وآمد در مسیر معینی برای آخرین مایل می‌تواند منجر به افزایش جمعیت شود به‌عنوان‌مثال در مناطق شهری، یعنی دسته‌بندی جمعیت در مناطق شهری به وجود میاید. در این راستا، باید توجه داشت که چنین مدل‌هایی عموماً دارای جزئیات فضایی بالایی نیستند و تمایل دارند تنها بین مناطق شهری و حومه تمایز قایل شوند و بنابراین چنین نتایجی ممکن است محصول بیش از حد ساده و الگوهای پیچیده‌تر باشد که ممکن است با رویکردهای مدل‌سازی پیچیده‌تری در آینده به وجود آیند. خودروهای خودران خودرو منجر به جابه جایی جمعیت از مرکز شهر به حومه شهر و این امر منجر به دسته‌بندی بیشتر جمعیت در مناطق حومه شهری و افزایش اختلاف قیمت مسکونی بین شهرها و مناطق روستایی می‌شود.

۷. پیشنهادها

در آینده نزدیک، گسترش خودروهای خودران در حوزه‌های طراحی عملیاتی خاص، یعنی شرایط خاص و به نظر ممکن می‌رسد این باید به طور خاص در مطالعات آینده در نظر گرفته شود. مطالعات مروری ادبیات اولین قدم برای بررسی اثرات احتمالی تأثیرات خودروهای خودران بر روی رفتار سفر و استفاده از کاربری زمین هستند. بااین‌حال، برای درک بهتر آن‌ها نیاز به کار بیشتری است. تحقیقات آینده باید بینش بهتری نسبت به گروه‌های جمعیتی اجتماعی که از افزایش دسترسی به علت رانندگی خودران بهره‌مند می‌شوند، در چارچوب انتخاب‌های مکان مدل‌سازی، مفید واقع شوند. به‌عنوان‌مثال، کارکردن در یک خودرو برای همه مشاغل ممکن نیست و به‌ویژه به مدل‌های کاری آینده بستگی دارد که یک بررسی اولویت بیان‌شده در مورداستفاده از خودروهای خودران نشان می‌دهد و این حتی بدون درنظرگرفتن این مسئله است که الگوهای شتاب خودروها (به‌خصوص شتاب بعدی) ممکن است توانایی انجام این کار را محدود کند؛ بنابراین، تحقیقات تجربی بیشتری برای هزینه‌های سفر عمومی و درک زمان در آینده موردنیاز است.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Dutch spatial general equilibrium
2. System Dynamics Mode of Leeds

۹. منابع

– گزیده آمار و اطلاعات حمل‌ونقل و ترافیک شهر تهران سال ۱۳۹۷.

– نتایج تفصیلی سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵.

- Alessandrini, A., Campagna, A., Delle Site, P., Flilippi, F., & Persia, L. (2015). Automated Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities. Transportation Research Procedia 5 (2015) 145 – 160.

- Auld, J., Sokolov, V., & Stephens, T. S. (2017). Analysis of the effects of connected-automated vehicle technologies on travel demand. .Journal of the Transportation Research Record 2625.

- Auld, J., Verbas, O., Javanmardi, M., & Rousseau, A. (2018). Impact of privately-owned level 4 CAV technologies on travel demand and energy. Procedia Computer Science, 130, 914–919 Argonne National Laboratory, 9700 Cass Ave, Lemont, IL 60439, USA.

- Axhausen, K. W., & Gärling, T. (1992). Activity-based approaches to travel analysis: Conceptual frameworks, models, and research problems. Transport Reviews:A Transnational Transdisciplinary Journal.

- Boesch, P. M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2016). Autonomous vehicle fleet sizes required to serve different levels of demand. Transportation Research Record 2542.

- Chen, D., & Kockelman, K. M. (2016). Journal of the Transporta Management of a Shared Autonomous Electric Vehicle Fleet. implications of Pricing schemes .Transportation Research Board, 2572, 37–46.

- Correia, G., & van Arem, B. (2016). Solving the user optimum privately owned automated vehicles assignment problem (UO-POAVAP). Transportation Research Part B, 87, 64–88.

- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 40, 1–13.

- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2016). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. Transportation.

- Walter G. Hansen (1959). How Accessibility Shapes Land Use, Journal of the American Institute of. https://doi.org/10.1080/01944365908978307

- Hawkins, J., & Habib, K. N. (2018). Integrated models of land use and transportation for the autonomous vehicle revolution. Transport Reviews.
Hörl, S., Erath, A. and Axhausen, K.W., 2016.

- Simulation of autonomous taxis in a multi-modal traffic scenario with dynamic demand. *Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung, 1184*.

- Meyer, J., Becker, H., Boesch, P. M., & Axhausen, K. W. (2017). Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? Research in Transportation Economics, 62, 80–91.

- hang, W., Guhathakurta, S., & Fang, J. (2015). Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. Sustainable Cities and Society, 19, 34–45.

- Hang, W., Guhathakurta, S., & Khalil, E. B. (2018). The impact of private autonomous vehicles on vehicle ownership and unoccupied VMT generation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 90, 156–165.

- Martijn F. Legêne , Willem L. Auping , Gonçalo Homem de Almeida Correia & Bart van Arem (2020): Spatial impact of automated driving in urban areas, Journal of Simulation.

- Emberger, G., Pfaffenbichler, P., A quantitative analysis of potential impacts of automated vehicles in Austria using a dynamic integrated land use and transport interaction model, Transport Policy (2020).

- Legêne, M.F., Auping, W.L., Correia, G.H.D.A. and van Arem, B., 2020. Spatial impact of automated driving in urban areas. Journal of Simulation, 14(4), pp.295-303.

- Zhang, W., Guhathakurta, S., & Khalil, E. B. (2018). The impact of private autonomous vehicles on vehicle ownership and unoccupied VMT generation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 90, 156–165.

- Zhao, Y., & Kockelman, K. M. (2017). Anticipating the regional impacts of connected and automated vehicle travel in Austin, Texas. Paper presented at the TRB annual meeting.

- Fagnant, D.J. and K. Kockelman, 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. Transportation research part A 77: 167-181.

- Teulings, C.N., Ossokina, I.V. and H.L.F. de Groot, 2017. Land use, worker heterogeneity and welfare benefits of public goods. Second revision submitted at Journal of Urban Economics.

- Zhao, Y., & Kockelman, K. M. (2017). Anticipating the regional impacts of connected and automated vehicle travel in Austin, Texas. Paper presented at the TRB annual meeting.

- Zhang, W., & Guhathakurta, S. (2017). Parking spaces in the age of shared autonomous vehicles Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2651, 80–91.

علیرضا ماهپور، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران–عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران–برنامه‌ریزی حمل و نقل را در سال ۱۳۹۰ با رتبه ممتاز از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران–برنامه-ریزی حمل و نقل از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان تحلیل و مدلسازی تقاضای حمل و نقل، تحلیل شبکه و سیستم‌های حمل و نقل، ایمنی و تصادفات بوده و در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه شهید بهشتی است.

امین ابراهیم‌زاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران–عمران را در سال ۱۳۹۷ با رتبه ممتاز از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران–برنامه ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان تحلیل تقاضای حمل و نقل بوده و در حال حاضر دانشجوی دکتری در دانشگا آزاد واحد علوم و تحقیقات است.