تعیین تأثیر نفوذ خودروهای خودران بر روی ظرفیت در معابر شریانی

مقاله علمی - پژوهشی

شهریار افندی زاده*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمود احمدی‌نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
آرین اکبری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵
صفحه ۳۸-۱۳

چکیده

افزایش ظرفیت شبکه ترافیک با ساخت معابر و زیرساخت‌های آن پرهزینه است. روش‌های مختلف مدیریت ترافیک برای رسیدگی به رشد سریع تقاضای سفر به روش‌های گوناگون ارائه شده است که از بین آن‌ها می‌توان اظهار نمود که وسایل نقلیه خودران نویدبخش خوبی برای پاسخگویی به تقاضای سفر می‌باشند. خودروهای خودران با توجه به کاهش خطاهای انسانی می‌تواند با کاهش فضا بین خودروها ظرفیت را افزایش دهند. قابلیت ارتباط بین آن‌ها نیز می‌تواند به این امر کمک بیشتری نماید. ازاین‌رو در این تحقیق با اعمال ویژگی‌های مدل‌های وسایل نقلیه خودران و غیرخودران در شبکه معابر بخشی از تهران که شامل بزرگراه‌ها و مسیرهای شریانی مرتبط به آن است، با روش‌های گوناگون شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل‌ها، دنبال کردن خودرو، تغییر خط و دسته‌بندی خودروهای خودران در زمانی که با مقادیر سهم مختلف در شبکه مشارکت می‌کنند، در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که در این تحقیق به عنوان خروجی در نظر گرفته شده عبارتند از میزان خودروهای عبوری از شبکه، سرعت میانگین کل شبکه و میانگین کل زمان سفر که مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، تقاضای ترافیکی مختلفی بر روی شبکه اعمال شده است تا عملکرد خودروهای خودران در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که نفوذ کامل خودروهای خودران می‌توانند حتی تا بیش از ۵۰ درصد در ظرفیت شبکه تأثیر بگذاردو نیز تغییرات مقدار سرفاصله زمانی خودروهای خودران می‌تواند در تعامل خودروهای خودران در نفوذ مختلف، با خودروهای عادی تأثیر مثبتی داشته باشد و این نوید را می‌دهد که در واقعیت نیز تأثیرات آن را در شبکه‌های واقعی مشاهده شوند.

واژه‌های کلیدی: تأثیر نفوذ خودروهای خودران، دسته‌بندی (پلاتونینگ)، ظرفیت، مدل دنبال کردن خودرو

۱-مقدمه

در دهه‌های گذشته، حمل‌ونقل دستخوش تحولات اساسی ناشی از به‌کارگیری علم کامپیوتر و فناوری ارتباطات و اطلاعات می‌شود. سیستم اطلاعات مسافر، قیمت‌گذاری جاده، کنترل سیگنال ترافیکی، انطباق سرعت هوشمند ازجمله کاربردهای سیستم حمل‌ونقل هوشمند است (Chiasserini,2020). ازدحام ترافیک اغلب در شبکه‌های جاده‌ای دیده می‌شود که باعث آلودگی هوا و همچنین تأخیر در زمان جابجایی و هزینه بیشتر در سفرها می‌شود. درنهایت، کیفیت زندگی جامعه با این تأثیرات پایین می‌آید (Pereira,2011). یک راه حل مناسب برای جلوگیری از ازدحام ترافیک، تعادل بخش تقاضا و عرضه است در حمل‌ونقل است (Triantis, Sarangi, 2011). بااین‌حال، افزایش ظرفیت‌های شبکه ترافیک با ساخت معابر و افزایش زیرساخت‌ها، بسیار پرهزینه و از نظر زیست‌محیطی نیز می‌تواند آسیب‌زا باشد. عوامل بی‌شماری وجود دارد که می‌تواند ظرفیت معابر را تحت تأثیر قرار دهد، ازجمله حوادث

طبیعی، سوانح رانندگی، هندسه راه‌ها، وضعیت آب‌وهوا و غیره. علاوه بر راه‌سازی و عواملی که ذکر شد، با استفاده بهتر از زیرساخت‌های موجود، ظرفیت راه‌ها نیز می‌تواند افزایش یابد. روش‌های مختلف مدیریت ترافیک برای رسیدگی به رشد سریع تقاضای سفر در منابع مختلف علمی ارائه شده است (Guoa, Li, 2019). در میان بسیاری از فن‌های جدید که اخیراً برای کنترل ترافیک مطرح شده است، وسایل نقلیه خودران می‌تواند نویدبخش خوبی به‌عنوان یکی از راه حل مناسب مورد توجه قرار گیرند (NHTSA,2016).

وسایل نقلیه متصل و خودکار با کاهش ازدحام ترافیک، حوادث ترافیکی، مصرف سوخت و انتشار گازها وسایل نقلیه می‌توانند به‌طور قابل توجهی سیستم حمل‌ونقل موجود را بهبود بخشند (Ross, Guhathakurta, 2017). امروزه این وسایل نقلیه با سهم نفوذ بسیار کمی در شبکه ترافیک وجود دارند و انتظار می‌رود با گسترش صنعت و فناوری در دهه‌های آینده سهم مشارکت بیشتری را آن‌ها، به خود اختصاص دهند. یکی از عواملی که باعث می‌شود خودروهای خودران عملکرد بهتری در استفاده از شبکه نسبت به خودروهای معمولی با راننده داشته باشند این است که می‌توان با استفاده از آن‌ها، فاصله بین وسایل نقلیه را کاهش داد که امکان توزیع بهتر فضای موجود را بین آن‌ها فراهم می‌کند. اگرچه فناوری خودروهای خودران اجازه می‌دهد تا فاصله بین وسایل نقلیه کاهش یابد، اما رعایت مقررات لازم در چندین کشور برای رعایت حداقل فاصله بین خودروها فعلاً امکان آن را فراهم نکرده است. همچنین قابل باور است که مدیریت‌های حمل‌ونقلی به دلایل ایمنی از خودروهای خودران بخواهند که مقررات مذکور را رعایت کنند.

علاوه بر این، ممکن است حتی در به‌کارگیری اولیه آن‌ها در سطح وسیع ترافیک حداقل فاصله بین این نوع وسایل نقلیه افزایش یابد تا خطر برخورد خودروهای خودران کاهش یابد (Lackey,2020). با توجه با پیشرفت روزافزون در این رابطه می‌توان این مسئله را در آینده برطرف کرد و با استفاده بیشتر از وسایل نقلیه خودران شاهد تغییرات در عملکرد و ظرفیت راه‌ها بود. این تغییرات می‌تواند در روان کردن ترافیک، افزایش سطح خدمات راه‌ها و ظرفیت آن‌ها تأثیر بسزایی داشته باشد. با افزایش سیستم‌های پیشرفته دیگر نظیر دستیار راننده و نیز ورود بالقوه وسایل نقلیه کاملاً خودمختار انتظار می‌رود که تأثیرات قابل توجه در شبکه‌های ترافیکی در آینده در جهان مشاهده نمود.

به نظر می‌رسد وسایل نقلیه خودران در یک دوره کوتاه‌مدت در شبکه‌های شهری بیشترین پتانسیل را در بزرگراه‌ها به دلیل مشخصات هندسی آن‌ها داشته باشند. این تأثیرات را می‌توان بر ظرفیت شبکه‌های راه‌ها با استفاده از خودروهای خودران با کاهش کل زمان‌های سفر مشاهده نمود. به‌این‌ترتیب ازدحام ترافیک ممکن است وقتی تعداد خودروهای خودران در شبکه راه‌ها افزایش یابد و اگر نرخ نفوذ آن قابل توجه باشد، می‌توان تغییر مهمی در شبکه مشاهده نمود. با بررسی مطالعات انجام شده می‌توان به این نتیجه دست یافت که اثرات استفاده از وسایل نقلیه خودران هنوز به‌صورت وسیع در حال بررسی بر ظرفیت شبکه راه‌ها است و به‌اندازه کافی توسعه نیافته است و بیشتر در مقیاس ماکروسکوپی استفاده شوند و اغلب به بررسی یک بزرگراه یا یک تقاطع در این رابطه پرداخته شده است.

در بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که شبکه فرضی منطقه مورد مطالعه در یک نمونه، ترکیبی از طیف متنوعی از انواع معابر شهری با ایده گرفتن از شبکه بزرگراه آیت الله هاشمی رفسنجانی (واقع در شهر تهران) و معابر دسترسی آن در مقیاس میکروسکوپی و چندین سطح تقاضا در شبکه و نرخ نفوذ مختلف خودرو خودران در نظر گرفته شده است. وجود مدل‌های مختلف شبیه‌سازی رانندگی نیز در این مورد از اهمیت خاصی برخوردار بوده و تأثیرات بسزایی در آرایش نحوه حرکت خودروهای خودران و درنهایت عملکرد شبکه دارند که نمی‌توان برای آن‌ها مدل معینی در نظر گرفته شود. از سوی دیگر انتظار می‌رود با دسته‌بندی خودروهای خودران بتوان به بهبود عملکرد آن‌ها و تأثیرات حاصل از آن بر روی ظرفیت شبکه کمک نمود. به‌هرحال با افزایش میزان سهم نفوذ وسایل نقلیه مختلف خودران در ترافیک، انتظار می‌رود ازدحام حاصل از ترافیک عبوری در شبکه‌های آزادراهی و بزرگراهی کاهش یابد. در این رابطه با استفاده از دسته‌بندی‌های مناسب، با داشتن اطلاعات وسایل نقلیه از قبیل موقعیت، سرعت و شتاب که به اشتراک گذاشته می‌شود، می‌توان امکانی را فراهم آورد که گروهی از وسایل نقلیه با فاصله نزدیک به یکدیگر و دنبال یکدیگر حرکت کنند. رانندگی در فاصله نزدیک باعث کاهش کشش هوا و در نتیجه کاهش مصرف سوخت می‌شود (Lackey,2020).

بااین‌حال، این تنها در صورتی امکان‌پذیر است که تمام دسته از وسایل نقلیه خودران باشند و افزودن یک پیشرو انسانی به طور قابل توجهی می‌تواند عملکرد کلیه وسایل نقلیه را کاهش دهد (Vaudrin, Erdemann,2017). با اعمال شرایط فوق و بررسی پارامترهای خودروهای عبوری از شبکه، میانگین کل سرعت خودروهای در داخل شبکه اعم از خودران و غیرخودران می‌تواند باعث افزایش ظرفیت عبوری در شبکه باشد. در این تحقیق، تلاش شده است که پاسخ مناسب به ابهامات مطرح شده در این خصوص با بررسی تأثیرات خودروهای خودران با استفاده از مدل‌های مربوطه جهت تعیین میزان اثرگذاری آن‌ها بر ظرفیت شبکه راه‌ها داده شود.

۲-پیشینه تحقیق

احتمال می‌رود که به زودی، وسایل نقلیه خودکار تأثیر قابل توجهی در سیستم حمل‌ونقل در آینده ایجاد کند که احتمالاً می‌تواند تعاملات راننده را به طور اساسی تغییر دهد و فرصت‌های زیادی برای افزایش ظرفیت تردد، کارایی، ثبات و ایمنی سیستم‌های حمل‌ونقل ایجاد کند (Lu, Tettamanti,2020). کروز کنترل انطباقی و رادار نگهداری بین خطوط در حال حاضر در چند خودرو تولید می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود که ۲۰ تا ۴۰ درصد از فروش خودرو تا سال ۲۰۳۰ خودران شود و مشارکت کامل در چندین دهه آینده ممکن است رخ دهد. در تحقیقات انجام شده با میزان سهم نفوذ مختلف وسایل نقلیه خودران در ترافیک، ازدحام حاصل از ترافیک عبوری در آزادراه‌ها کاهش یافته است. یکی از راه‌های بهبود عملکرد و کارایی خودروهای خودران، دسته‌بندی است. با استفاده از دسته‌بندی، وسایل نقلیه اطلاعاتی از قبیل موقعیت، سرعت و شتاب را به اشتراک می‌گذارند تا گروهی از اتومبیل‌ها با فاصله نزدیک به یکدیگر را به صورت خودمختار دنبال کنند. رانندگی در فاصله نزدیک باعث کاهش کشش هوا و در نتیجه کاهش مصرف سوخت می‌شود (Lackey,2020).

اگرچه عدم اطمینان زیادی در رابطه با معرفی این وسایل نقلیه و تأثیر آن‌ها وجود دارد ولی نشانه‌های بسیاری وجود دارد که می‌توان اثر آن‌ها را مشاهده کرد. فناوری‌های دستیار راننده مانند کروز کنترل انطباقی ۱(ACC)، کروز کنترل هوشمند ۲(ICC) و وسایل نقلیه نیمه‌خودکار از گذشته در جاده‌ها حضور دارند و در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ بنابراین، مطالعات مختلفی بر روی وسایل نقلیه مجهز به این فناوری‌ها انجام شده است تا انتظار اولیه در مورد خودروهای خودران به دست آید. مشخص شده است که سیستم‌های ACC می‌توانند ظرفیت جاده را افزایش و ازدحام ترافیک را کاهش دهند و تأثیرات مثبتی بر پویایی ترافیک داشته باشند. دلیل اصلی این امر این است که وسایل نقلیه مجهز به سیستم ACC می‌توانند وسایل نقلیه پیشرو را ردیابی کرده و اختلاف فاصله و سرعت را محاسبه کنند. چنین سیستمی با هدایت کردن وظایف رانندگی طولی، جریان ترافیکی ایمن و روان را فراهم می‌کند (Kesting,Treiber, 2007).

پس از مشاهده تأثیرات سیستم‌های ACC بر روی ظرفیت ترافیک، لوانو و چین یک سیستم کروز کنترل خودکار هوشمند (AICC) را برای دنبال کردن خودروهای خودران ایجاد کردند (Ioannou and Chien,1993). عملکرد و تأثیر AICC بر جریان ترافیک مورد بررسی قرار گرفت و شبیه‌سازی رایانه‌ای در یک لاین با سه مدل راننده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج سیستم AICC در مقایسه با مدل‌های راننده انسانی نشان داد که با به‌کارگیری فاصله ایمنی کاهش یافته بین خودروها، حذف تأخیرها و خطاهای انسانی و زمان واکنش کمتر راننده، یک جریان ترافیکی ایمن و روان ایجاد می‌شود و سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند. در نتایج وسایل نقلیه فوق در مدت بسیار کوتاهی بدون برخورد متوقف می‌شوند و بنابراین استفاده از AICC ممکن است به رانندگی ایمن‌تری منجر شود. در این شبیه‌سازی‌ها تعامل بین خودرو خودران و وسایل نقلیه معمولی در نظر گرفته نشد. ویژگی دیگر خودرو خودران کروز کنترل تطبیقی سازگار با همکاری [3] (CACC) است. این فناوری توسط آرناوت و بولینگ با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی ترافیک برای ارزیابی تأثیر سیستم‌های CACC بر عملکرد ترافیک در آزادراه مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از مقادیر مختلف سهم وسایل نقلیه مجهز به سیستم‌های CACC، افزایش سرعت جریان و سرعت متوسط و در نتیجه کاهش مشکلات ازدحام و افزایش ظرفیت در شبکه مشاهده شد. در صورت افزایش سهم به مقدار ۴۰٪ بهبود ویژگی‌های ترافیکی شبکه به طور قابل توجهی مشخص شد (Arnaout and Bowling,2011). علاوه بر این،

خودروهای خودران به حس‌گرهای هدایتی و سیستم ارتباطی وسیله نقلیه به وسیله نقلیه مجهز هستند که می‌تواند در جلوگیری از برخورد، کاهش فاصله بین خودروی ایمن و در نتیجه افزایش ظرفیت جاده کمک کند. تینتراکول و دیگران ظرفیت بزرگراه را برای وسایل نقلیه مجهز به حس‌گر و وسایل نقلیه مجهز به حس‌گرها و سیستم‌های ارتباطی V2V[4] مقایسه کردند (Tientrakool et al,2011). نتایج هر دو فناوری در بهبود ظرفیت بزرگراه مفید است زیرا با توجه به کاهش میانگین فاصله ایمن بین خودروها از برخورد جلوگیری می‌کنند. طبق نتایج استفاده از حس‌گرها به تنهایی ظرفیت را ۱/٤ برابر ظرفیت نرمال افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، استفاده از حس‌گر و سیستم ارتباطی V2V، ظرفیت را ۳/۷ برابر ظرفیت نرمال افزایش می‌دهد. نتایج پژوهش فگنانت و کوکلمان نشان داد خودرو خودران می‌تواند واکنش‌های سایر وسایل نقلیه را مانند هر ترمز غیرمنتظره یا هر تصمیمی برای تسریع جریان را پیش‌بینی کند (Fagnant and Kockelman,2015). از آنجا که خودروهای خودران قابلیت انتخاب مسیر بهتری دارند، می‌توانند با کارایی بیشتری از خطوط جاده استفاده کنند. آن‌ها با فاصله کمتری نسبت به سایر وسایل نقلیه در دسته عمل می‌کنند و این توانایی کنترل بهتر وسیله نقلیه برای ترمز نرم‌تر و تنظیم بهتر سرعت خودرو در دسته را فراهم می‌کند. آریا و همکاران (Aria et al,2016) اثرات خودرو خودران را بر رفتار راننده و عملکرد ترافیک بررسی کردند و یک مدل شبیه‌سازی ترافیک میکروسکوپی برای تخمین اثر خودروهای خودران بر عملکرد ترافیک و شبکه جاده‌ای ساخته شد. مدل شبیه‌سازی فوق شامل دو سناریو بود. سناریوی اول فقط شامل وسایل نقلیه معمولی و سناریوی دوم فقط خودرو خودران است. بررسی شبیه‌سازی انجام شده نشان داد به دلیل کاهش فاصله مکانی، تراکم و سرعت متوسط سفر و ازدحام ترافیک، خودرو خودران دارای اثرات مثبتی در جاده‌ها به ویژه در ساعات اوج است. با به‌کارگیری AV[5] ها به نظر می‌رسد تصادفاتی که به دلیل خطاهای راننده انسانی یا زمان کند واکنش ایجاد می‌شود از بین برود و ایمنی بیشتری نسبت به وسایل نقلیه معمولی به دست آید. رحمان و همکاران با سهم نفوذ متفاوت خودروهای متصل در یک مدل شبیه‌سازی دریافتند در سهم بالای ٦۰ درصد خودروهای خودران ریسک انجام تصادف را به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، خودروهای خودران می‌توانند در دستیابی به جریان روان‌تر ترافیک و افزایش ظرفیت ترافیک کمک کنند. (Rahman et al.2019) عامل مهم دیگری که تا حد زیادی بر ظرفیت ترافیک تأثیر می‌گذارد اما کمتر به آن توجه می‌شود، شدت دسته‌های خودرو خودران است. دسته‌بندی خودرو خودران فناوری است که منجر به کاهش فاصله بین خودروهای خودران متوالی با ارتباطات خودرو به خودرو و کنترل خودکار می‌شود. شدت متفاوت دسته‌بندی خودرو خودران با میزان کم نفوذ در شبکه نیز ممکن است منجر به ظرفیت ترافیکی کاملاً متفاوتی شود. از طرف دیگر با دسته‌بندی بهتر خودروهای خودران دسته‌بندی‌های طولانی‌تر با فاصله کمتر به وجود خواهد آمد و ظرفیت بزرگراه افزایش پیدا خواهد کرد. مطالعات محدودی تأثیر دسته‌بندی وسایل نقلیه خودکار در ظرفیت ترافیک مختلط را بررسی کردند و ادعا کردند که شدت بالاتر دسته‌بندی کردن، ظرفیت بالاتری را تضمین می‌کند (Ghiasi, Hussain,2017)

چالش باقی‌مانده، بینش تحلیلی در مورد چگونگی سهم نفوذ و شدت دسته‌بندی خودرو خودران و تأثیر مشترک آن‌ها بر ظرفیت ترافیک مختلط است. چن و همکاران فرمول‌های تحلیلی را برای ظرفیت بزرگراهی با ترافیکی مختلط پیشنهاد می‌کنند که میزان نفوذ سهم وسایل نقلیه خودکار و اندازه دسته‌ها را در نظر می‌گیرد. علی‌رغم دستیابی به موفقیت تحلیلی، این مطالعه فقط پالاتون‌های دوره‌ای قطعی با تعداد ثابت خودرو خودران را در نظر می‌گیرد. چن و همکاران سیاست‌های خاص مدیریت خط را برای ترافیک مختلط با خودرو خودران ارزیابی کردند و بهترین سیاست را ارایه می‌دهد. با این تلاش‌های محدود، هنوز فاصله زمانی تصادفی و شدت دسته‌بندی خودروها در زمینه مدیریت خط بررسی نشده است (Chen and ahn,2017). پاتل و دیگران در مطالعه یک شبکه در مرکز شهر شامل آزادراه‌ها، جاده‌های شریانی و محلی دریافتند ترکیبی از سهم‌ها و کاهش فاصله منجر به کاهش ۷۸ درصدی در زمان سفر می‌شود. آن‌ها اثر دسته‌بندی را بررسی نکردند و در بازه‌های بزرگتری سهم نفوذ را تغییر دادند (R. Patel, M. Levin,2016).

۲-۱- مدل‌سازی خودروهای خودران با شبیه‌سازهای ترافیک میکروسکوپی

منابع فراوانی در زمینه مدل‌سازی خودرو خودران وجود دارد و کارهای بی‌شماری در این زمینه با شبیه‌سازهای ترافیک صورت گرفته است. شبیه‌سازهای ترافیکی امکان شبیه‌سازی و بررسی چگونگی تأثیرپذیری ترافیک خودروهای خودران و غیرخودران در جاده‌های واقعی را فراهم می‌کنند. اکثر مطالعات مربوطه در برنامه شبیه‌ساز ویسیم صورت گرفته و مقدار کمتری در سومو انجام شده است. در ادامه به معرفی انواع مدل‌های به‌کاررفته شده، مشخصات و چگونگی اعمال آن‌ها در شبیه‌سازی این پژوهش پرداخته شده است.

۲-۱-۱- مدل دنبال کردن خودرو خودران

مدل دنبال کردن خودرو حرکت طولی خودرو را شبیه‌سازی می‌کنند و برای همتاسازی رفتار راننده هنگام دنبال کردن وسیله نقلیه دیگر استفاده می‌شود. در میان مدل‌های دنبال کردن خودرو مدل‌های راننده هوشمند، کراوس و ویدمان در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت (Pourabdollah et al,2017).

مدل کراوس: مدل پیش‌فرض اتومبیل در شبیه‌سازی ترافیکی سومو مدل کراوس است؛ بنابراین مدل هر وسیله نقلیه می‌تواند دو نوع حرکت داشته باشد: حرکت آزاد و حرکت متقابل. در حرکت آزاد، هیچ وسیله نقلیه در جلو سرعت وسیله نقلیه دنبال کننده را محدود نمی‌کند؛ بنابراین، سرعت آن به حداکثر خود محدود می‌شود (با توجه به سرعت مجاز و سرعت مورد نظر رانندگان). در صورت نزدیک شدن دو وسیله نقلیه به یکدیگر، هر دو وسیله نقلیه تلاش می‌کنند با یکدیگر برخورد نکنند. در این حالت حداقل یکی از رانندگان سرعت خود را که بالاتر از حداکثر سرعت ایمن نیست، کاهش می‌دهد.

این مدل بدون برخورد است، به این معنی که هیچ وسیله نقلیه با سرعت بیشتری نسبت به سرعت امن رانندگی نمی‌کند. در زندگی واقعی شتاب یک وسیله نقلیه به توانایی فیزیکی و سایر تأثیرات آن مانند مقاومت در برابر هوا و سایر موارد بستگی دارد. برای جلوگیری از وسایل نقلیه تندتر در شبیه‌سازی سرعت مطلوب محاسبه می‌شود. سرعت مطلوب هر خودرو با انتخاب حداقل سرعت از بین سرعت مطمئنه، سرعت فعلی به علاوه حداکثر شتاب و حداکثر سرعت است. به دلیل نقص رانندگان انسانی نیز یک خطای تصادفی از سرعت مورد نظر کم می‌شود (Krajzewicz,2002)

مدل ویدمان: شبیه‌سازی ترافیک تجاری ویسیم از مدل دنبال کردن خودرو ویدمان استفاده می‌کند. مدل ویدمان یک مدل فاصله فیزیکی روانی است. اگر یک وسیله نقلیه سریع‌تر به یک وسیله نقلیه با سرعت کمتری نزدیک شود، سرعت خود را کاهش می‌دهد تا زمانی که به درگاه فردی خود برسد. درگاه تابعی از اختلاف سرعت و فاصله است و رانندگان انسانی همچون خودروهای خودران قادر به درک تفاوت سرعت کم و حفظ سرعت بسیار دقیق نیستند؛ بنابراین، خودرو در این مدل در صورت رسیدن به درگاه دیگر دوباره شتاب می‌گیرد. (Bieker,2017)

مدل راننده هوشمند ٦: مدل دنبال کردن خودرو که در شبیه‌سازی‌های سومو استفاده شده است توسط تریبرو همکاران توسعه یافته است. این مدل شتاب وسیله نقلیه دنبال‌کننده را به عنوان تابعی از سرعت وسیله نقلیه دنبال‌کننده، فاصله شکاف بین خودروهای دنباله‌کننده و پیشرو و تفاوت سرعت بین خودروهای دنبال‌کننده و پیشرو تعیین می‌کند. پارامترهای مدل شامل سرعت مطلوب خودرو، زمان فاصله زمانی، حداکثر شتاب، کاهش سرعت مطلوب، توان شتاب، فاصله شکاف خودرو و طول خودرو است. معادلات مدل راننده هوشمند شامل یک معادله شتاب، یک معادله تمایل به شتاب و تمایل به ترمز و یک معادله حداقل فاصله شکاف به نسبت شکاف واقعی است (Treiber et al , 2000). هر وسیله نقلیه می‌تواند مقادیر دیگری برای پارامتر مدل داشته باشد (Treiber et al ,2017).

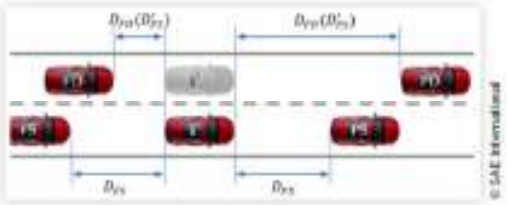
معادله حداقل فاصله شکاف به فاصله شکاف واقعی زمانی که خودرو دنبال‌کننده بیش‌ازحد به وسیله نقلیه پیشرو نزدیک شود، به کار می‌آید. شتاب منفی خودرو دنبال‌کننده به فاصله شکاف موردنیاز تا فاصله شکاف واقعی بستگی دارد. این مدل همچنین سرعت وسایل نقلیه پیشرو و دنبال کننده، سرعت نزدیک شدن دنبال‌کننده به وسیله نقلیه پیشرو و زمان شکاف مطلوب بین وسایل نقلیه را در نظر می‌گیرد (Treiber et al,2000). در تحقیق پورعبدالله و همکارانش سه مدل دنبال کردن خودرو مدل راننده هوشمند، مدل کراوس و مدل دنبال کردن خودرو ویدمان که معمولاً در شبیه‌سازی ترافیک استفاده می‌شوند بررسی شدند. نتیجه شبیه‌سازی نشان داد که در

مجموع مدل راننده هوشمند بهینه شده، رفتارهای رانندگی را به بهترین شکل در مقایسه با دو مدل دیگر همتاسازی می‌کند (Pourabdollah et al,2017). از همین جهت در این پژوهش از مدل راننده هوشمند برای مدل دنبال کردن خودروهای خودران استفاده شد و برای سایر وسایل نقلیه انسان سوار نیز از مدل کراس استفاده شد که به رفتار انسانی نزدیک‌تر است و احتیاط مدل IDM را برای شبیه‌سازی ندارد. در ادامه به ساختار مدل‌های فوق اشاره شده است.

طبق تحقیق ژو، خودروهای خودران به دلیل سرعت زیاد حس‌گرهای الکترونیکی نسبت به زمان واکنش انسان، حساسیت بیشتری نسبت به غیرخودران‌ها دارند و این باید در مدل خودرو خودران منعکس شود (Zhu and H.M. Zhang,2018). با استفاده از مدل‌های دنباله کردن خودرو، سیستم کنترل سرعت سعی می‌کند وسیله نقلیه سرعت مورد نظر خود را همزمان با سیستم کنترل فاصله بین خودروهای دنبال کننده و پیشرو حفظ کند. هدف مشترک این دو سیستم کنترل جلوگیری از تغییرات شتاب طولی در هنگام تغییر خط خودروها است، عامل روان‌سازی که در چندین پارامتر دنبال کردن خودرو در سومو منعکس می‌شود (Wang, G. Chen,2018).

۲-۱-۲- مدل‌های تعویض خط خودرو خودران

مدل تغییر خط به‌کار رفته در این پژوهش مدل LC2013 سومو است. با این‌حال، در ابتدا مدل SL2015 برای استفاده انتخاب شد. SL2015 باعث بروز مشکلاتی در تغییر خط شد به گونه‌ای که وسایل نقلیه دیگر مطابق انتظار تغییر مسیر نمی‌دادند. همچنین در مدل SL2015 چند پارامتر وجود دارد که در مدل LC2013 نیست. پارامترهای فوق و توانایی‌های شبیه‌سازی زیرلایه‌ها برای شبیه‌سازی حیاتی نیستند، بنابراین مدل LC2013 بیش‌ازحد مناسب است و از مقاومت بیشتری نسبت به SL2015 برخوردار است (Erdmann,20140). مدل‌سازی تغییر خط با LC2013 پارامترهایی را فراهم می‌کند تا تنظیم مدل خودروی خودران نسبت به مدل‌های قبلی تعویض خط در سومو بهتر صورت گیرد. تجزیه‌وتحلیل سایر مدل‌های تغییر خط اصلاح شده برای شبیه‌سازی خودرو خودران، دانش در مورد چگونگی تغییر پارامترهای موجود در مدل LC2013 را برای مدل‌سازی خودرو خودران در سومو فراهم می‌کند. ونگ با تغییر مدل تغییر خط، تأثیری که احتمال تغییر مسیر توسط وسیله نقلیه مورد نظر بر روی وسایل نقلیه پشت خود می‌گذارد را ارزیابی می‌کند. شکل ۱ در تحقیق ونگ چگونگی تأثیر تغییر مسیر روی وسایل نقلیه دنبال‌کننده نشان می‌دهد (Wang, G. Chen,2018).



شکل ۱. چگونه تغییر مسیر روی وسایل نقلیه دنبال‌کننده

۲-۱-۳- مدل دسته‌بندی خودرو خودران

با استفاده از مدل دسته‌بندی، وسایل نقلیه اطلاعاتی مانند موقعیت، سرعت و شتاب را برای تشکیل گروهی از اتومبیل‌ها که به طور مستقل یکدیگر را دنبال می‌کنند به اشتراک می‌گذارند. در این مدل خودرو جلو دسته به عنوان پیشرو برگزیده می‌شود و خودروهای دنبال‌کننده با کسب سرعت خودرو پیشرو و نگه داشتن سرفاصله در امتداد خودرو پیشرو حرکت می‌کنند. در صورت تغییر مسیر هر یک از خودروهای دنبال‌کننده و خارج شدن آن از دسته، خودروهای دنبال‌کننده دیگر فضای خالی ایجاد شده را پر می‌کنند و در صورت جدا شدن پیشرو دسته، خودروی پشت آن را به عنوان پیشرو انتخاب می‌شود. مزایای چنین عملکردی ایمنی، کاهش کشش هوا و در نتیجه مصرف سوخت است (Segata,2017).

سیمپلا یک پلاگین دسته‌بندی قابل تنظیم برای سرویس گیرنده TraCI Python است. این پلاگین شکل‌گیری خود به خود دسته‌های خودروها را کنترل می‌کند و امکان تعریف رفتار خاصی را برای وسایل نقلیه‌ای که درون یک دسته را ایجاد می‌کند. برای دسته‌بندی ممکن است چهار حالت عملیاتی جدا از حالت آزاد سفر مشخص شود:

حالت پیشرو دسته (پارامترسازی وسیله نقلیه‌ای که در جلوی دسته رانندگی می‌کند)

حالت پیروی دسته (پارامترسازی وسیله نقلیه‌ای که در داخل یک دسته پشت وسیله نقلیه دیگری رانندگی می‌کند)

حالت گرفتن دسته (پارامترسازی یک وسیله نقلیه در محدوده یک دسته که پیوستن آن به دسته امکان‌پذیر است)

حالت پیروی گرفتن (پارامترسازی وسیله نقلیه‌ای که در یک دسته سفر می‌کند، در حالت گرفتن یک رهبر دسته دیگر است) پس از بیان مدل‌های مورد نظر و شاخصه‌های آن‌ها به دلیل کمبود تحقیقات انجام شده با نرم‌افزار سومو درزمینه موضوع تحقیق، در ادامه به بررسی مدل‌های خودرو خودران در ویسیم، بحث در مورد پارامترهای مدل‌های آن و نحوه تطابق پارامترهای آن با مدل‌های سومو با توجه به تحقیقات دیگران در راستای موضوع این تحقیق پرداخته شده است.

۲-۱-٤- مدل‌سازی خودروهای خودران در ویسیم

بسیاری از این کارهای قبلی خودروهای خودران را در نرم‌افزار "ویسیم" شبیه‌سازی کردند که در آن‌ها خودروهای خودران ویژگی‌های مدل را از مدل دنبال کردن خودرو ویدمان به خود اختصاص دادند. کار آتکینز با ایجاد گزینه های مختلفی برای سطوح نرخ نفوذ خودرو خودران و چند سطح خودکارسازی در شبیه‌سازی ویسیم ایجاد کرد. مقادیر دقیق پارامتر خودروهای خودران در این گزارش یافت می‌شود (Atkins,2016). در تحقیقات بودان پیاده‌سازی پارامترهای مدل خودرو خودران در یک شبیه‌سازی ویسیم اطلاعات بیشتری در مورد چگونگی مدل‌سازی خودروهای خودران در یک شبیه ساز ترافیک میکروسکوپی فراهم می‌کند (Budan, K. Hayatleh,2018). او و همکارانش با مجموعه‌ای از پارامترها برای سطوح مختلف خودروهای خودران و متصل، شبیه‌سازی‌هایی را برای چندین شرایط ترافیکی انجام دادند. این شرایط ترافیکی شامل ترافیک مختلط از خودروهای خودران و غیرخودران است. تجزیه و تحلیل تحقیقات فوق شامل مقایسه میانگین تأخیر خودرو، متوسط سرعت خودرو، متوسط طول صف و میانگین مصرف سوخت بود. در مدل‌سازی یک سناریو جاده‌ای دیگر در یک مسیر یک خطه، ونگ پارامترهای خودروهای خودران ویسیم را به طور خاص برای مقایسه مزایای جریان ترافیک خودرو خودران ایجاد کرد (Wang,2017). این تحقیق همراه با مقاله‌هایی که درباره آن‌ها بحث شد بیانگر چگونگی اصلاح مدل‌های دنبال کردن خودرو خودران و مدل‌های تعویض خط وسایل نقلیه برای اعمال رفتار خودرو خودران درون یک شبیه‌ساز ترافیک میکروسکوپی است. مقادیر پارامتر شبیه‌سازی خودرو خودران درک درستی از نحوه مدل‌سازی خودروهای خودران در سومو را فراهم می‌کند. پارامترهای ویسیم که دارای معادل‌های سومو هستند می‌توانند به صورت مشابه برای شبیه‌سازی‌ها به سومو پیاده‌سازی شوند. این مفاهیم در مورد زیر مدل‌های راننده هوشمند سومو و مدل‌های تغییر دهنده خط LC2013 اعمال می‌شود.

۲-۱-۵- مدل‌سازی خودروهای خودران در سومو

کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی خودروهای خودران در برنامه ویسیم امکان پیاده‌سازی در شبیه‌ساز سومو را دارند. در ادامه چند مورد پیاده‌سازی خودرو خودران در سومو وجود دارد که شرح داده می‌شود.

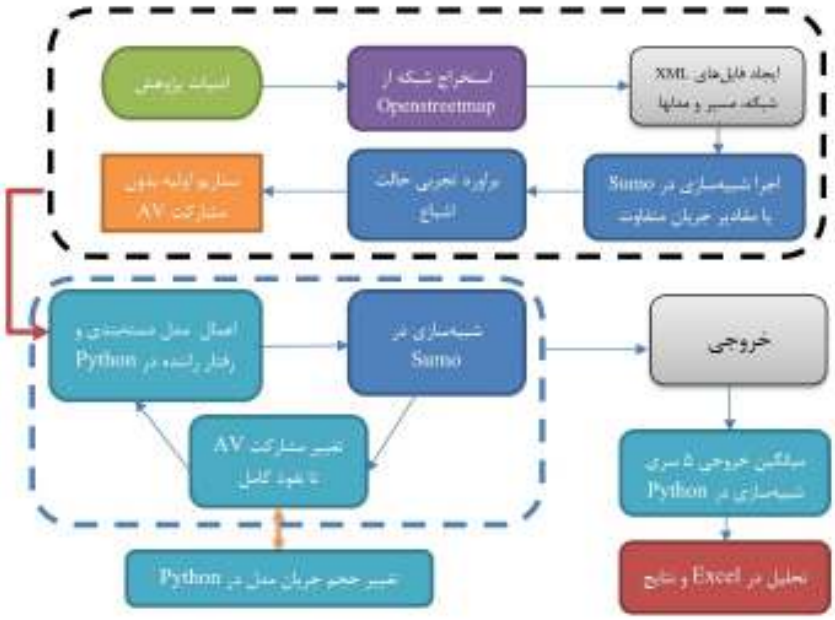
خان و همکارانش در تحقیقی به تحلیل مدل‌های تغییر خط برای خودروهای متصل پرداختند (Khan et al,2014). در این تحقیق الزامات مرتبط با یک رفتار بهینه تغییر خط شرح داده شده و مدل‌های موجود تغییر مسیر بر اساس این الزامات ارزیابی شده است. این مدل‌ها از نظر زمان سفر، میزان مصرف سوخت، تعداد تغییر خط و ترمز کلی برای همه وسایل نقلیه در بخش جاده مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها شبیه‌سازی‌های ترافیکی را با استفاده از تراکم ترافیکی مختلف برای تعویض خط متقارن و نامتقارن و سطوح مختلف همکاری بین وسایل نقلیه ایجاد کردند. ارزیابی در جاده بزرگراهی ۱۰ کیلومتری متشکل از ۳ خط انجام شد و در آخر نتایج کاهش ترمز کلی و افزایش زمان رانندگی در سرعت مطلوب وسایل نقلیه درون ترافیک بود و از سوی دیگر تأثیر این موارد در افزایش میزان سوخت و انتشار گازها نیز قابل توجه بود. لو و تتامنتی در مقاله خود از طریق شبیه‌سازی تأثیرات وسایل نقلیه خودران که مربوط به نمودار بنیادی ماکروسکوپی شهری هستند بررسی می‌شود (Lu, Tettamanti,2018). این تحقیق چگونگی تأثیر نرخ متفاوت وسایل نقلیه خودران در میان وسایل نقلیه سنتی و سطوح پایین رانندگی خودکار بر ترافیک در یک شبکه ۸ در ۸ با ٦٤ تقاطع با فاصله ۵۰۰ متر را مورد مطالعه قرار داد.

لو و همکاران در تحقیق دیگری تجزیه‌وتحلیل تجربی با شبیه‌سازی ترافیک میکروسکوپی برای تأثیر وسایل نقلیه خودران بر ظرفیت شبکه ترافیک شهری در سومو انجام داد. در این تحقیق که بر روی یک شبکه درون شهری مورد بررسی قرار گرفت مزایای اتومبیل بدون راننده با افزایش نفوذ در ترافیک عبوری بیشتر مشهود شد. در این تحقیق، درمجموع،

چگالی بحرانی ترافیک افزایش ۴۸ درصدی را با نفوذ کامل وسیله نقلیه خودران در جاده نشان داده است. لازم به ذکر است که آن‌ها اثر دسته‌بندی را در نظر نگرفتند.

۳-روش تحقیق

به منظور ساختاربندی این تحقیق، یک روش تحقیق ایجاد شد. بخش زیر، اجزا بخشی ازاین‌روش و نحوه ارتباط آن‌ها را شرح می‌دهد. در بخش بعد، مهم‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی و استخراج گزینه اولیه شرح داده شده است. پس از به دست آوردن گزینه اولیه، ورودی مدل برای بررسی اثرات سطوح مختلف و نرخ نفوذ خودروهای خودران و دسته‌بندی خودرو، اعمال شده و سرانجام با مرور کوتاه مهم‌ترین جنبه‌های نتیجه‌گیری ارائه می‌شود. روش تحقیق به صورت شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است. بخش اول شامل اطلاعات به دست آمده از تحقیقات انجام شده که چارچوب نظری تحقیق را توضیح می‌دهد. در بخش بعدی، نقشه شبکه مورد نظر استخراج می‌شود و پس از آن به ابزار الحاقی Netedit برای تصحیح شبکه و ساخت فایل شبکه انتقال داده می‌شود. سپس با اعمال خصوصیات خودروهای خودران در فایل مسیر امکان تعریف مدل‌های رفتار راننده و پارامترهای مرتبط با آن را فراهم می‌کند.



شکل ۲. مراحل روش تحقیق به صورت شماتیک

سپس فایل‌های تشکیل شده پیکربندی می‌شوند و در قالب یک فایل برای اجرا در برنامه سومو آماده می‌شوند. پس از اجرا با مشاهده شبکه، جریان‌های مختلف برای اشباع شدن آن در نظر گرفته شد تا در تمامی معابر ازدحام سنگین صورت گیرد. این حالت بدون حضور خودروهای خودران و با خودروهای سنتی شبیه‌سازی شد و در آخر به عنوان سناریو صفر یا اولیه انتخاب شد و حجم ترافیک اشباع اولیه مشخص شد. در بخش بعد با در نظر گرفتن ضریب حجم تقاضا شبکه و سرفاصله زمانی مورد مطالعه در مدل دنبال کردن خودرو خودران، فایل XML دسته‌بندی سیمپلا جهت اعمال مدل در شبیه‌سازی، به کمک برنامه نوشته شده در پایتون صورت گرفت تا شبیه‌سازی در سومو انجام شود. پس از هر شبیه‌سازی برنامه نوشته شده در پایتون میزان نفوذ خودرو خودران را با بازه‌های ۱۰ درصدی افزایش می‌دهد و همزمان از سواری‌های داخل شبکه به همین مقدار کم می‌شود. این روند تا نفوذ کامل ادامه می‌یابد و بعد از اتمام شبیه‌سازی برنامه نوشته شده ضریب خودروهای داخل شبکه را تغییر می‌دهد و به همین منوال شبیه‌سازی انجام می‌شود. پس از شبیه‌سازی‌های ضرایب مختلف حجم ترافیک شبکه تغییر در مدل دنبال کردن با استفاده از سرفاصله زمانی دیگری صورت می‌گیرد که تمامی مراحل انجام شده برای سرفاصله زمانی جدید انجام شود و پس از پایان شبیه‌سازی‌های مربوط به این مقدار، از مقدار دیگری برای شبیه‌سازی استفاده شد. این شبیه‌سازی‌ها برای ۵ بار انجام شدند و خروجی‌های آن‌ها در پایتون میانگین‌گیری شدند.

خروجی‌ها شامل خودروهای عبور کرده از شبکه، سرعت میانگین کل شبکه و میانگین کل زمان سفر برای تعیین تأثیر ظرفیت و پویایی مورد انتخاب و بررسی قرار گرفتند در آخر نتایج حاصل شده از این تحقیق به دست آمدند.

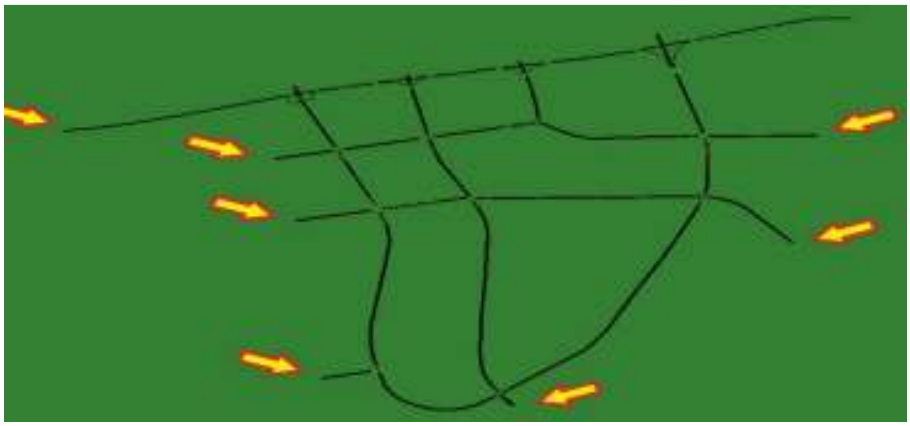
۳-۱-مدل‌سازی

در بخش قبل با مروری بر روش تحقیق مشخص شد مدل‌سازی از دو قسمت اصلی شبکه و رفتار رانندگی تشکیل شده است. مدل‌سازی شامل یک گزینه پیش‌فرض برای رفتار رانندگی کنونی است که به عنوان گزینه اولیه عمل می‌کند و خودروهای خودران را در نظر نمی‌گیرد. مدل‌سازی شامل ۱۵ مرحله است که شامل ۵ ضریب برای حجم جریان و ۳ مقدار سرفاصله زمانی در مدل رفتار رانندگی برای هر ضریب است. ابتدا گزینه پیش‌فرض در سومو پیاده‌سازی شده است و برای کالیبراسیون مدل استفاده شده است. شبیه‌سازی تحرک شهری (سومو) یک بسته شبیه‌سازی ترافیک جاده‌ای میکروسکوپی منبع باز، قابل‌انتقال و طراحی شده برای مدیریت شبکه‌های بزرگ جاده‌ای است که توسط مؤسسه سیستم حمل‌ونقل در مرکز هوافضای آلمان ساخته شده است. سومو نه تنها یک شبیه‌سازی ترافیک است، بلکه مجموعه‌ای از برنامه‌ها است که به تهیه و انجام شبیه‌سازی ترافیک کمک می‌کند. برای شبیه‌سازی در قالب مناسب سومو، نیاز به ارائه شبکه‌های جاده‌ای و تقاضای ترافیک وجود دارد و هر دو باید با استفاده از منابع مختلف وارد یا تولید شوند. شبکه و رفتار رانندگی در این بخش شرح داده شده است.

۳-۱-۱- طراحی شبکه و مسیرهای جریان سناریو اولیه

جاده‌ها طبق روال تشریح شده در شبکه سومو توسعه یافته‌اند. نقشه‌های شبکه با انتقال جاده از OpenStreetMaps.org و سپس تبدیل نقشه بارگیری شده از پسوند فایل.osm به.xml ایجاد شد. در مرحله بعد، فایل‌های XML جدید نقشه شبکه با استفاده از ابزار NetEdit برنامه سومو تصحیح شدند. فایل XML مسیر، برای اجرای شبیه‌سازی ایجاد شد. فایل‌های XML مسیر، انواع خودرو را تعریف می‌کنند و مسیرهای وسیله نقلیه را ایجاد می‌کنند. فایل XML پیکربندی شبیه‌سازی‌ها را با فایل‌های XML ورودی برای مسیر و فایل‌هایXML شبکه ایجاد می‌کنند و همچنین فایل‌های خروجی را برای داده‌های شبیه‌سازی که برای تجزیه‌وتحلیل بعد شبیه‌سازی استفاده می‌شود، تعریف می‌کنند.

از شبکه راه‌های غرب تهران برای شبیه‌سازی سناریوها ایده گرفته شده که واقع در منطقه ۲ است و شامل ۳/۷۵ کیلومتر از بزرگراه آیت الله هاشمی رفسنجانی (غرب به شرق) در شمال و خیابان‌ها و تقاطع‌های جنوبی منتهی به این بزرگراه است. همچنین مسیرهای دسترسی محلی نیز باید از شبکه حذف می‌شد. موقعیت‌های شروع وسایل نقلیه اعم از خودران و غیره در نقشه اصلاح شده حاصل از سومو در شکل ۳ نمایش داده شده است. تمامی خودروهای موجود با استفاده از روش تعریف جریان تولید شده‌اند و همگی با کوتاه‌ترین مسیرها از گره‌های محاطی به خارج از شبکه هدایت می‌شوند. این تعاریف در یک فایل XML برای مسیرها و خودروهای موجود در هر جریان همچنین نوع و مشخصات هر یک از کلاس‌های خودرو در آن انجام می‌شود و درنهایت با فایل‌های شبکه، خروجی و اضافی پیکربندی می‌شود. سپس با اجرا این فایل شبیه‌سازی آغاز می‌شود. دلیل انتخاب روش جریان عدم قابلیت برنامه برای تغییر مقادیر وسایل نقلیه شبکه توسط برنامه‌نویسی و همچنین تعریف نوع وسایل نقلیه تغییر کرده در شبیه‌سازی به روش‌های دیگر تخصیص بود.



شکل ۳. نقشه نهایی شبکه در برنامه SUMO GUI

فایل پیکربندی با در نظر گرفتن خودروهای غیرخودران در نظر گرفته شد و با تغییر در مقادیر تعداد و حجم جریان به حالت اشباع رسید که در آن ازدحام سنگین در تمامی قسمت‌های شبکه رؤیت می‌شد. فایل مسیر فوق به عنوان حالت اشباع (ضریب ۱) فرضی انتخاب شد و پس از تعریف خودروهای خودران، مدل‌های رفتار راننده و دسته‌بندی آن، تمامی جریان‌های موجود خودروهای غیرخودران برای خودروهای خودران با مقدار صفر ایجاد شد. در آخر بدون احتساب خودروهای خودران ۳۵۱ جریان برای شبکه تعریف شد که مجموعاً ۱۲۸۱۰ وسیله نقلیه در شبکه بارگذاری می‌شد. توضیحات در مورد ورودی‌های وسایل نقلیه، ترکیب و ویژگی‌های آن‌ها در بخش بعدی ارائه شده است.

۳-۱-۲- ورودی وسایل نقلیه و مدل رفتار رانندگی

معمولا در یک جاده شریانی، وسیله نقلیه با مشخصات یکسان نخواهند بود و احتمالا دارای ویژگی‌های متفاوتی هستند. ازاین‌رو مود اتوبوس و کامیونت نیز در کنار خودروهای سواری و خودران در نظر گرفته شد. ترکیب وسایل نقلیه به صورتی است که سهم سواری، اتوبوس و کامیونت به ترتیب ۵/۹۰ و ۵ درصد کل ترافیک است و این ترکیب در تمامی شبیه‌سازی‌ها حفظ می‌شود. همچنین جریان‌های تعریف شده برای هر مود با یکدیگر مطابقت دارند. جریان‌ها در طول زمان شبیه‌سازی (۳۶۰۰ ثانیه) ادامه دارند و دوره زمانی آن‌ها متناسب با تعداد خودرو تعریف شده در جریان به دست می‌آید. با توجه به مهم بودن مدل کردن خودروهای مختلف در شبیه‌سازی، اعمال خصوصیات و ویژگی‌های رانندگی در هر کدام از کلاس‌ها با توجه به مدل‌های دنبال کردن و تغییر مسیر ضرورت دارد. ازاین‌رو در این تحقیق مدل‌های رفتار راننده وسایل نقلیه را به صورتی که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید با توجه به مطالعات انجام شده در نظر گرفته است. پارامتر نقص راننده (سیگما) برای خودروهای خودران به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد زیرا فناوری خودرو خودران تا حدی افزایش می‌یابد که به عنوان مدل راننده هوشمند دارای نقص رانندگی صفر است. سایر پارامترهای دنبال کردن خودرو ازجمله حداقل فاصله شکاف وسیله نقلیه و حداقل فاصله زمانی خودرو (tau) با افزایش سطح خودمختاری کاهش می‌یابند زیرا خودروهای خودران ایمن‌تر به چنین شکاف‌های بزرگی بین وسایل نقلیه احتیاج ندارند. این در حالی است که این فاصله زمانی برای خودروهای خودران دنبال‌کننده در داخل دسته (پیرو) به مقدار ۰/٦ در نظر گرفته شده و برای حالت پیشرو و رانندگی آزاد مقادیر ۲، ۱/۵ و ۰/٦ در شبیه‌سازی‌های مختلف جهت بررسی حالات متفاوت به صورت برابر با فاصله زمانی خودروهای حالت پیروها، ۵۰ و ۱۰۰ درصد بیشتر از حالت خودروهای عادی (۱ ثانیه) به دلیل نیاز به احتیاط بیشتر جهت حفظ ایمنی و جلوگیری از تصادف در خارج از دسته‌بندی و همچنین بررسی تأثیر آن بر عملکرد خودروهای خودران در ترافیک در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. پارامترهای مدل دنبال کردن

پارامترهای مدل	مقادیر پیش‌فرض	خودرو سواری عادی	کامیونت	اتوبوس	خودرو خودران
سیگما	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۰
Tau	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/٦ ، ۲ ، ۱/۵
MinGap [m]	۲/۵	۱/۵	۲	۲	۰/۵
فاکتور سرعت	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	(۱،۱،۱،۱،۱،۱،۲)
مدل دنبال کردن خودرو	کراوس	کراوس	کراوس	کراوس	IDM

فاکتور انحرافات سرعت احتمالی، سرعت را که تولیدکنندگان برای وسایل نقلیه خود طراحی می‌کنند، محاسبه می‌کند. انحرافات فزاینده سرعت از محدودیت سرعت با افزایش سطح خودمختاری نتیجه اعتماد بیشتر سازنده به وسایل نقلیه آن‌ها و تمایل آن‌ها برای انتقال سریع‌تر کاربران به مقصد است. در تعریف دسته‌بندی برای خودروهای خودران این مقدار برای

هر نوع از خودروهای داخل دسته اعم از پیشرو، پیرو، گرفتن و پیرو گرفتن به ترتیب ۱۰،۱۰،۰ و ۲۰ درصد بیشتر از مقدار عادی در نظر گرفته شده است که به همین مقدار اجازه انحراف از سرعت احتمالی را به خودروها می‌دهد تا در تشکیل پلاتون سریع‌تر اقدام نمایند. پس از پارامترهای مدل دنبال کردن خودرو، برخی از پارامترهای تغییر خط در مدل تغییر خط LC2013 سومو اصلاح شده‌اند تا با دقت بیشتری بازتابنده سطح خودمختاری باشند. با افزایش سطح خودمختاری، تمایل خودرو خودران برای ایجاد تغییر مسیر استراتژیک افزایش می‌یابد. چند پارامتر در جدول ۱ قرار نگرفتند و در هیچ یک از مقادیر اصلی سومو تغییر ایجاد نشد. این موارد اصلاح نشدند زیرا پارامترهای مربوط به مدل وسیله نقلیه هستند که به دلایل مختلف تغییر نکرده‌اند. به طور مثال پارامترهای تغییر خط مربوط به سبقت در خط مسیر مخالف به دلیل عدم کاربرد، تغییر داده نشده و مقادیر پیش‌فرض مدل را دارد و یا تمایل به سبقت از راست نیز به علت ایمنی موجود در خودروهای خودران مقدار پیش‌فرض مدل را دارد. مشخصات هر یک از خودروهای داخل دسته‌بندی در فایل مسیر تعریف شده‌اند و همچنین فایل XML پیکربندی مدل دسته‌بندی سیمپلا با تعریف مقادیر مربوط به پارامترهای دسته‌بندی و تنظیم آن‌ها در ابزار تریسی صورت گرفت و در شبیه‌سازی سومو اعمال شد. این فایل پیکربندی، عنصر ریشه با چند هم‌ردیف دارد که با نام پارامتر برچسب‌گذاری می‌شوند و ویژگی‌های مربوط به مقادیر مختلف پارامتر را دارند.

برای استخراج داده‌ها نیز موارد مورد نظر در یک فایل الحاقی یا در داخل فایل پیکربندی شبکه تعریف می‌شوند و پس از شبیه‌سازی هر یک از خروجی‌های مدنظر در یک فایل XML ذخیره می‌شوند. در این تحقیق خروجی‌های مربوط به مشخصات کل شبکه (که شامل خودروهای ورودی و خروجی، سرعت میانگین کل شبکه، میانگین کل زمان سفر و ...) و خروجی‌های مربوط به صف استخراج و تحت بررسی قرار گرفت. زمان در نظر گرفته شده به مدت ۳۶۰۰ ثانیه است و تمامی خودروها از ابتدا وارد شبکه می‌شوند تا درنهایت خروجی‌ها را برای هر شبیه‌سازی به دست آید.

۳-۱-۳- شبیه‌سازی نهایی و سناریوها

شبیه‌سازی‌های نهایی از ضریب متفاوتی برای حجم‌ها استفاده کرده است. به منظور اطمینان از تکرارپذیری شبیه‌سازی‌ها در برنامه سومو، از مقادیر ساکن برای وسایل نقلیه مختلف با مکان‌های شروع و پایان ثابت استفاده شد. این مقادیر از حالت اشباع بدون حضور خودروهای خودران (صفر درصد) در شبکه برداشت شده و در ادامه شبیه‌سازی با ضرایب ۰/٤، ۰/٦، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ حالت اشباع تقاضا شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. خودروهای خودران در هر شبیه‌سازی با هر یک از پنج ضریب تقاضا به صورت جداگانه برای سهم‌های مشارکت‌های متفاوت (صفر درصد،۱۰٪،۲۰٪، ...،۹۰٪ و ۱۰۰٪) اعمال می‌شوند که این امر در برنامه‌ای که در پایتون کدنویسی شده به کمک تریسی بر روی فایل XML مسیر اعمال شده و اجرا می‌شود تا خروجی را برای تمامی حالات فوق به دست آورد. در مجموع ۵۵ حالت با ۵ بار تکرار انجام شد. در برنامه نوشته شده علاوه بر اعمال مدل دسته‌بندی خودروهای خودران قبل از شروع شبیه‌سازی دستوری مبتنی بر فایل مسیر اولیه نوشته شده است که با توجه به ضریب تقاضا میزان کل جریان‌ها را تغییر می‌دهد و پس از آن شبیه‌سازی بدون حضور خودران صورت می‌گیرد. پس از اتمام شبیه‌سازی، کد در همان ضریب تقاضا میزان نفوذ خودروهای خودران را افزایش می‌دهد و همان مقدار سواری‌های موجود در شبکه را می‌کاهد و برنامه فایل مسیر جدید را برای شبیه‌سازی آماده می‌کند. این روند تا نفوذ کامل خودروهای خودران ادامه می‌یابد.

تمامی حالات فوق برای سرفاصله زمانی‌های متفاوت حالت‌های خودرو پیشرو و راننده آزاد (۱/۵ ، ۰/٦ و ۲) به صورت جداگانه در سه سناریو شبیه‌سازی شده‌اند و ۵ بار نیز هر یک از سناریوها تکرار شده است که در آخر مجموع کل شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برابر ۸۲۵ است. این در حالی است که فاصله زمانی بین خودروهای خودران (پیرو و...) در داخل دسته برای همه سناریوها مقدار ۰/٦ در نظر گرفته شده است.

سناریو اول

در سناریو اول برای بررسی حالت برابر سرفاصله زمانی تمامی خودروهای خودران اعم از اعضای دسته (پیشرو، پیرو و غیره) و حالت رانندگی آزاد ایجاد شده است. در این شرایط سرفاصله زمانی برای همه خودروهای خودران ۰/٦ ثانیه در نظر گرفته شده است تا بنا به مطالعات گذشته که این مقدار را

برابر در نظر گرفته‌اند اثر دسته‌بندی در شبیه‌سازی مشخص شود. با انتخاب این مقدار برای مدل رفتار رانندگی شبیه‌سازی در تمامی حالات نفوذ و ضرایب تقاضا انجام می‌شود. این سناریو درک متقابلی از تأثیر نفوذ خودرو خودران در شبکه با افزایش گام به گام را ارائه می‌دهد و همچنین تغییر ضرایب تأثیرات آن‌ها را در شرایط ترافیکی مختلف می‌تواند نشان دهد.

سناریو دوم

پس از شبیه‌سازی مقادیر برابر سرفاصله زمانی در سناریو اول، در سناریو دوم برای بررسی تأثیرات افزایش سرفاصله زمانی خودروهای خودران در حالت پیشرو دسته و رانندگی آزاد به مقدار ۵۰ درصد بیشتر از خودروهای عادی داخل شبکه در نظر گرفته شد. مقدار ۱/۵ ثانیه برای این دو حالت در نظر گرفته شد در حالی که خودروهای خودران در نقش‌های دیگر همان مقدار ۰/٦ ثانیه را دارند. این فرض برای سنجش بهتر رفتار خودروهای خودران در ازدحام شبکه و بررسی عملکرد آن‌ها در ترافیک دارد. همچنین در دسته‌بندی خودرو پیشرو با حفظ فاصله بیشتر به نظر می‌رسد مانور و عملکرد بهتری داشته باشد. از سمت دیگر در واقعیت میزان کنترل این فاصله در خودروهای خودران به لحاظ ایمنی و قوانین وضع شده نسبت به انسان بیشتر است. لذا با انتخاب سرفاصله زمانی بیشتر از رفتار راننده انسانی اثرات این موضوع در این سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سناریو سوم

در سناریو سوم برای برآورد میزان تأثیرات افزایش سرفاصله زمانی مدل رفتار راننده پس از افزایش ۵۰ درصدی، مقدار ۱۰۰ درصد بیشتر از خودرو عادی در نظر گرفته شد. این مقدار برای خودروهای خودران در نقش پیشرو و حالت رانندگی آزاد ۲ ثانیه در نظر گرفته شد و در بقیه حالت داخل دسته به همان مقدار ۰/٦ ثانیه فرض می‌شود. احتمال می‌رود افزایش این مقدار بتواند در نفوذهای پایین‌تر خودرو خودران در تعامل با وسایل نقلیه غیرخودران و درنهایت بر عملکرد شبکه تأثیر بگذارد. از طرف دیگر این سناریو نشان می‌دهد افزایش این مقدار در مدل نسبت به سناریو دوم تا چه حد اثرات را تشدید یا تضعیف می‌کند.

در این فصل پس از توضیح در مورد چارچوب مدل و تعریف مدل‌های دنبال کردن، تعویض خط و دسته‌بندی خودرو و چگونگی عملکردشان به تعیین پارامترهای آن‌ها پرداخته شد. همچنین انتخاب شبکه و نحوه استخراج و اعمال آن در سومو بحث شد. در ادامه به بررسی پارامترها و ارایه سناریوهای مورد نظر در شبیه‌سازی و جزئیات آن‌ها اشاره شد. در فصل بعدی تفسیر خروجی‌های به دست آمده از شبیه‌سازهای سناریوهای صورت گرفته در قسمت‌های مجزا و در آخر به طور کلی ارایه شده است.

٤-تحلیل نتایج شبیه‌سازی

به منظور نتیجه‌گیری در مورد اثرات خودرو خودران در جاده، شبیه‌سازی‌های متعددی انجام و سپس تجزیه‌وتحلیل شد. تمرکز شبیه‌سازی‌ها در تفاوت میزان سرفاصله زمانی خودرو خودران در حالت رانندگی آزاد و پیشرو، میزان نفوذ خودرو خودران و حجم ترافیک بود. برای تجزیه و تحلیل هر یک از این سه متغیر، دو متغیر دیگر برای اطمینان از سازگاری ثابت بودند. شبیه‌سازی‌ها به وسیله برنامه‌نویسی پایتون در سومو اجرا شد و فایل‌های خروجی آن استخراج شد. خروجی‌ها مربوط به خودروهای وارد و خارج شده شبکه، سرعت میانگین خودروها و زمان سفر آن‌ها بود. در هر خروجی اطلاعات شبکه برای هر شبیه‌سازی خودروهای بارگذاری شده، وارد شده و رسیده در یک فایل XML ارایه می‌شود و مقدار آن‌ها را در گام‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. از ۵ سری خروجی مربوط به هر شبیه‌سازی با ضریب تقاضا و نفوذ خودرو خودران مشخص میانگین هارمونیک گرفته شد و در اکسل با در نظرگیری سرفاصله‌های تعیین شده یکسان، مورد بررسی قرار گرفت. در اکسل مقادیر مربوط به هر ضریب تفکیک شد و با توجه به درصد نفوذ خودروهای خودران و مقادیر کل خودروهای به مقصد رسیده نمودارها رسم شدند. همچنین درصد بهبود خودروهای رسیده در نفوذهای متفاوت نسبت به سناریو اولیه هر ضریب محاسبه شد. روند فوق برای پارامترهای میانگین زمان سفر کل و میانگین سرعت کل شبکه انجام شد. از مقادیر پارامترهای فوق میانگین هارمونیک گرفته شد و در اکسل به تفکیک ضرایب برای هر سناریو نمودارها به دست آمد.

٤-١-تحلیل سناریو اول بر اساس مقدار سرفاصله زمانی ٠/٦ ثانیه

در سناریو اول مقدار ٠/٦ ثانیه برای سرفاصله زمانی خودروهای خودران در همه حالت‌های پیشرو، پیرو و رانندگی آزاد در نظر گرفته شد تا اثر دسته‌بندی در شبکه مشخص شود. این مقدار برای تمامی ضرایب با توجه به میزان نفوذهای متفاوت در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی مدل صورت گرفت. روش مورد استفاده برای تجزیه‌وتحلیل تأثیرات خودروهای خودران در جاده توسط مقایسه نتایج ناشی AVها از میزان نفوذ مختلف بود. یک روش مفید برای مقایسه تأثیر در ظرفیت، مقایسه خودروها وارد شده و خارج شده شبکه برای سطوح مختلف نفوذ است. در حالت اشباع (ضریب ۱) بدون خودروهای خودران مقدار ۱۲۸۱۰ خودرو سواری در شبکه بارگذاری می‌شوند که به میزان ۱۲۰۷۹ خودرو در زمان شبیه‌سازی به شبکه وارد می‌شوند. این در حالی است که میزان خودرو وارد شده زمانی برابر با ۱۲۸۱۰ است که ٦٠٪ خودرو خودران جای خودروهای سواری را می‌گیرند و این نشان می‌دهد که خودروهای خودران شبکه را روان‌تر کرده تا میزان خودرو بیشتری در شبکه اعمال شوند و از ظرفیت شبکه بیشتر استفاده شود. در نمودار شکل ٤ تغییرات مربوط به خودروهای خارج شده (به مقصد رسیده) در شبکه و میزان بهبود آن نسبت به حالت بدون خودروهای خودران ملاحظه می‌شود.

در نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش میزان مشارکت خودروهای خودران در شبکه خودروهای بیشتری به مقصد می‌رسند. این میزان در شبیه‌سازی با حالت بدون خودروهای خودران برابر با ۷۸۱۷ است که با افزایش مشارکت در نفوذ کامل (صد درصد نفوذ) به ۱۱۹۲۵ خودرو می‌رسد که طبق خط قرمز، افزایش ۵۳ درصدی در خودروهایی که به مقصد می‌رسند را نشان می‌دهد.

شکل ٤. نمودار میزان خودرو رسیده نسبت به مشارکت خودرو خودران در حالت اشباع

برای به دست آوردن تأثیرات خودروهای خودرو در شرایط ترافیکی مختلف شبیه‌سازی فوق را برای حجم‌های تقاضا ترافیک ٠/٤، ٠/٦، ٠/٨ و ١/٢ حالت اشباع نیز صورت گرفتند که همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش میزان مشارکت خودروهای خودران در شبکه خودروهای بیشتری به مقصد می‌رسند. در حالت ضریب ١/٢ بدون مشارکت خودروهای خودران، ١٥٣٧٢ خودرو در شبکه بارگذاری می‌شوند که ١٢٧٤٢ از آن‌ها به شبکه وارد می‌شوند و در میزان نفوذ ٧٠ درصد خودروهای خودران این مقدار برابر ١٥٣٧٢ می‌شود و تمامی خودروهای بارگذاری شده به شبکه وارد می‌شوند که باز تأثیر خودروهای خودران را برای پذیرا بودن شبکه برای خودروهای بیشتر را نشان می‌دهد. این امر به دلیل کم شدن ازدحام در شبکه و پویایی بیشتر با به‌کارگیری خودروهای خودران است. در حالات ضرایب ٠/٤ ، ٠/٦ و ٠/٨ این مقادیر از ابتدا (صفر درصد نفوذ خودرو خودران) با هم برابرند و خودرویی در انتظار نمی‌ماند تا وارد شبکه شود.

از سوی دیگر با بررسی احجام دیگر می‌توان بیان کرد که با افزایش حجم ترافیک خودروهای خودران عملکرد بهتری

دارند. در ضریب ۰/٤ این مقدار ناچیز است و می‌تواند نشان دهد که در حجم‌های پایین عملکرد خودران در شبکه به خوبی صورت نمی‌گیرد این می‌تواند به دلیل کم بودن خودروها و فاصله زیاد آن‌ها برای ایجاد عمل دسته‌بندی باشد. در ضرایب دیگر در مشاهده می‌شود که با افزایش میزان ترافیک (۰/٦ تا ۱/۲) به ترتیب ۸٪ ، ۳۱٪ ، ۵۳٪ و ۷۷٪ بهبود در میزان خودروهای خارج شده در حالت نفوذ کامل نسبت به صفر درصد نفوذ دارد که بیانگر تأثیر خودروهای خودران در افزایش ظرفیت شبکه است.یک روش مفید برای مقایسه تأثیر تحرک و ظرفیت، مقایسه سرعت خودروی‌ها برای شرایط مختلف است. با تحلیل خروجی‌های به دست آمده برای میانگین سرعت کل خودروهای درون شبکه جدول ۲ برای تمامی ضرایب به صورت زیر به دست آمده است. همان‌طور که در جدول ۲ می‌توان دید که با افزایش در میزان نفوذ خودروهای خودران سرعت میانگین کل شبکه رو به افزایش است. مشارکت کامل خودروهای خودران می‌تواند نسبت به حجم وارد شده در شبکه تا بیش از ۵ برابر به سرعت شبکه بی افزاید.

جدول ۲. سرعت میانگین کل خودروهای شبکه با توجه به ضرایب تقاضا و میزان نفوذ خودروهای خودران (tau=0.6)

ضرایب حجم ترافیک	۰/٤	۰/٦	۰/۸	۱	۱/۲
میزان مشارکت خودرو خودران (درصد)	سرعت میانگین کل شبکه (متر بر ثانیه)				
۰	۸/۱۲	٤/۳	۱/۷۷	۱/٤۹	۱/۱۸
۱۰	۸/۱۹	٤/۵۵	۲/۱۳	۱/٤	۱/۲٦
۲۰	۸/٦۲	۵/۱۱	۲/۳۱	۱/۵۵	۱/٤
۳۰	۸/٤۵	۵/٤۷	۳/۲۱	۱/۹	۱/۵۹
٤۰	۷/٦٦	۷/۲٤	٤/۲۹	۲/۸۷	۱/۹۵
۵۰	٦/۵۳	۷/۵۸	٤/۸٦	۳/۲٤	۲/۷۸
٦۰	۸/۷٤	۸/٤۳	٦/۱٤	۵/۵۱	۳/۳٤
۷۰	۸/۱۵	۸/۳۸	۷/۱٦	۵/۵۷	٤/۳٦
۸۰	۸/۳۹	۸/٤	۷/۸۷	٦/۷۹	٦/٤۱
۹۰	۸/۳۷	۸/۸۹	۸/٦۹	۸	۸/۲۲
۱۰۰	۸/۸۲	۹/۷۲	۸	۷/٦۱	۷/۵

این بدین معناست که پویایی شبکه با نفوذ خودروهای خودران افزایش می‌یابد و سبب افزایش تحرک در شبکه می‌شود که درنهایت به بهبود ظرفیت‌های شبکه منجر می‌شود. از سوی دیگر مشاهده می‌شود با افزایش ضرایب حجم تقاضا تأثیر خودروهای خودران بر افزایش سرعت بیشتر بروز داده می‌شود، به طوری که در ضریب ۰/٦، میانگین سرعت کل در نفوذ کامل ۲/۲ برابر حالت اولیه شده و همین نسبت در ضریب ۱/۲، ٦/۳ است. همچنین می‌توان باز عملکرد نامحسوس و نامطلوب را در ضریب ۰/٤ مشاهده کرد.

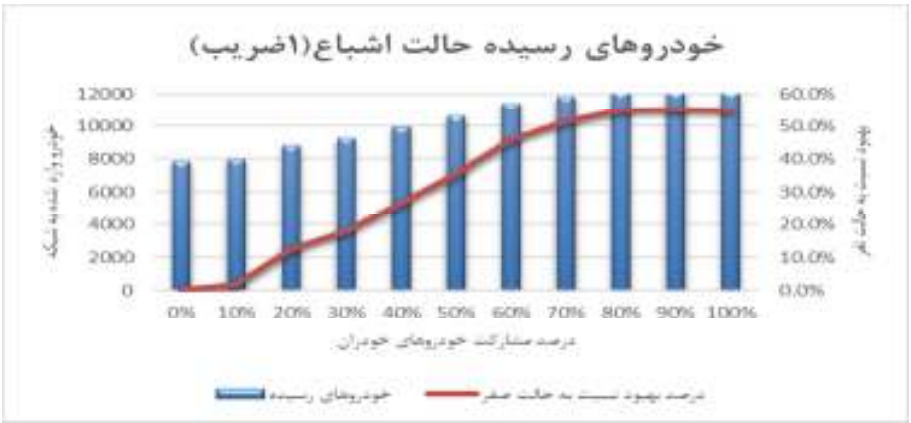
روش دیگری برای مطالعه عملکرد شبکه تحت تأثیر خودروهای خودران با توجه به میانگین زمان سفر کل شبکه مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نمودارهای به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش میزان مشارکت خودروهای خودران در تمام ضرایب، میانگین کل زمان سفر شبکه به‌وضوح در حال کاهش است و این تأثیرات با افزایش میزان کل حجم ترافیک مشهودتر می‌شوند به طوری که کاهش ۵۳ درصدی با نفوذ کامل خودرو خودران در ضریب ۱ را در شکل ۵ نشان می‌دهد و این مقدار برای ضریب ۱/۲ با کاهش ۵٦ درصدی همراه است. همچنین در ضرایب پایین‌تر مشاهده شد که افزایش نفوذ خودروهای خودران به کاهش زمان سفر در کل شبکه منجر می‌شود و در ضرایب ۰/٤ و ۰/٦ نیز تغییرات کاهش زمان سفر در نفوذ کامل خودروهای خودران نسبت به حالت اولیه به ترتیب ۱۱ و ۳۷ درصد است. کاهش زمان سفر نشانگر پویاتر شدن شبکه تحت تأثیر خودروهای خودران است که بهره‌وری ظرفیت از فضاهای موجود در شبکه را نمایان می‌کند.

۳-۲-تحلیل سناریو دوم بر اساس مقدار سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه

پس از بررسی و تحلیل خروجی‌های سناریو اول و مشاهده تأثیرات خودرو خودران با سرفاصله‌های برابر و دسته‌بندی شده به بحث در مورد سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه برای خودروهای خودران در حالت پیشرو دسته و حالت رانندگی آزاد که به مقدار ٪۵۰ از مقدار خودروهای سواری عادی بیشتر است پرداخته می‌شود. پس از تحلیل خروجی‌های مربوط به سناریو دوم دریافت شد که شرایطی که تعداد خودروهای بارگذاری شده و خودروهای وارد شده با هم برابرند همانند سناریو اول و بدون تغییر است یعنی در ضریب ۱ و ۱/۲ شرایط فوق در ٦۰ و ۷۰ درصد نفوذ خودروهای خودران صورت می‌گیرد ولی در تعداد خودروهای خارج شده در شبکه تغییراتی همسو را در نمودارهایی که در شکل ٦ حاصل شدند، قابل مشاهده است. در این سناریو نیز در حالت اشباع با افزایش میزان مشارکت خودروهای خودران در شبکه، خودروهای بیشتری به مقصد می‌رسند. این میزان با افزایش مشارکت در نفوذ کامل به ۱۲۰۹۹ می‌رسد که افزایش ۵۵ درصدی در خودروهایی که به مقصد می‌رسند نسبت به بدون نفوذ خودروهای خودران نشان می‌دهد.

همانند سناریو قبل برای به دست آوردن تأثیرات خودروهای خودران در شرایط ترافیکی مختلف شبیه‌سازی فوق را برای ضریب‌های تقاضا ۰/٤ ، ۰/٦ و ۰/۸ و ۱/۲ حالت اشباع نیز صورت گرفت که همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش ترافیک و مشارکت خودروهای خودران در شبکه خودروهای بیشتری به مقصد می‌رسند که مجدد تأثیر خودروهای خودران را بر شبکه برای پذیرا بودن خودروهای بیشتر را نشان می‌دهد. در حالات ضرایب ۰/٤، ۰/٦و ۰/۸ هم می‌توان شاهد شکل‌گیری این مسئله بود. در ضریب ۰/٤ این مقدار ناچیز است و می‌تواند نشان دهد که در حجم‌های پایین عملکرد شبکه به خوبی صورت نمی‌گیرد. در ضرایب دیگر مشاهده شد که با افزایش میزان ترافیک (۰/٦ تا ۱/۲) به ترتیب ۸، ۳۱، ۵۵ و ۸۰ درصد بهبود در میزان خودروهای خارج شده در حالت نفوذ کامل نسبت به صفر درصد دارد که تأثیر خودروهای خودران در افزایش ظرفیت شبکه را نمایان می‌کند.

شکل ۵. نمودار میانگین زمان سفر نسبت به مشارکت خودرو خودران در حالت اشباع

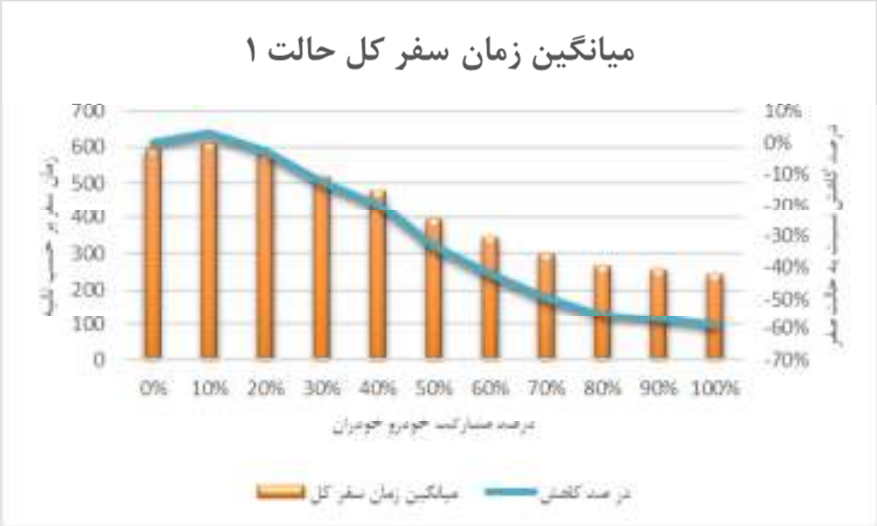


شکل ٦. نمودار خودروهای رسیده نسبت به مشارکت خودرو خودران در حالت اشباع (tau=۱/۵)

جدول ۳. سرعت میانگین کل خودروهای شبکه با توجه به ضرایب تقاضا و میزان نفوذ خودروهای خودران

ضرایب حجم ترافیک	۰/٤	۰/٦	۰/۸	۱	۱/۲
میزان مشارکت خودرو خودران (درصد)	سرعت میانگین کل شبکه				
۰	۸/۱۲	٤/۳	۱/۷۷	۱/٤۹	۱/۱۸
۱۰	۸/۰۲	٤/٤۲	۲/۰٦	۱/۲۹	۱/۰٦
۲۰	۷/۵۸	٤/٤۷	۲/۲٦	۱/٦٦	۱/٤۱
۳۰	۸/۲۳	٤/۸٦	۲/٦۲	۱/۸۳	۱/٦۱
٤۰	۸/٤۳	٦/۵۱	۳/٦۱	۲/۲۷	۱/۵
۵۰	٦/۷۵	۷/۷۳	٤/٤۸	۳/۲۹	۲/۲٤
٦۰	۸/۵	۷/۵	٦/۸۷	٤/٦۹	۳/۱۵
۷۰	۹/۷۳	۷/۸۹	۸/۵٦	٦/٦۳	٤/۵۳
۸۰	۸/۷۸	۸/۵۳	۸/۷۳	۸/۳٦	٦/٦۸
۹۰	۸/۰۷	۸/۹٤	۸/۵٤	۸/۵۸	۸/۹۳
۱۰۰	۹/٤۷	۹/٤۹	۹/۱٤	۹/۱۱	۹/۱۵

پس از تعداد وسایل نقلیه خارج شده از شبکه، مقایسه میانگین سرعت خودروها برای شرایط مختلف انجام شد. با تحلیل خروجی‌های به دست آماده برای میانگین سرعت کل خودروهای درون شبکه، جدول ۳ برای تمامی ضرایب به دست آمد. در جدول ۳ می‌توان دید که همانند سناریو قبلی با افزایش در میزان نفوذ خودروهای خودران سرعت میانگین کل شبکه رو به افزایش است. مشارکت خودروهای خودران می‌تواند در شبکه با ضریب حجم تقاضا ۱/۲ برابر تا ٦۷۵ درصد به سرعت شبکه بی افزاید. این مقادیر برای ضریب دیگر به صورت نزولی برابر با ۵۱۱٪، ٤۱٦٪، ۱۲۱٪ و ۱۷٪ است. این بدین معناست که تحرک شبکه با نفوذ خودروهای خودران افزایش می‌یابد و سبب افزایش تحرک در شبکه می‌شود که درنهایت به بهبود روند ظرفیت‌های شبکه می‌شود.



شکل ۷. نمودار میانگین زمان سفر نسبت به مشارکت خودرو خودران در حالت اشباع

پس از تحلیل خروجی‌های میانگین زمان سفر شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای ضرایب حجم متفاوت و نفوذهای مختلف خودروهای خودران در نمودارهای به دست آمده مشاهده شد که با افزایش میزان مشارکت خودروهای خودران میانگین کل زمان سفر شبکه به وضوح در حال کاهش است و این تأثیرات با افزایش میزان کل حجم ترافیک مشهودتر می‌شوند به طوری که کاهش ۵۳ درصدی زمان سفر را برای ضریب ۰/۸ مشاهده شد. در دو ضریب ۱/۲ و ۱ به ترتیب ٦۲ و ۵۹ درصد کاهش زمان را با نفوذ کامل خودروهای خودران تجربه می‌کند که مقادیر مربوط به ضریب ۱ در شکل ۷ نشان داده شده است.

در نمودارهای ارایه شده، با توجه به درصد نفوذهای پایین خودروهای خودران، می‌توان این برداشت را نمود که تأثیر خودروهای خودران با توجه به شیب نمودارها، به درستی ادامه نمی‌یابد و روند مناسبی را طی نمی‌کند و این تفاوت‌ها با کاهش حجم تقاضا ترافیک مشهودتر به نظر می‌رسد. در صورتی که در نفوذهای بالای خودروهای خودران در ضریب‌های متفاوت نشان می‌دهد که از نفوذ ۳۰ تا ٤۰ درصدی به بعد شاهد تغییراتی یکنواخت‌تر و بدون تناوب هستیم.

۳-۳-تحلیل سناریو سوم بر اساس مقدار سرفاصله زمانی ۲ ثانیه

پس از بررسی و تحلیل خروجی‌های دو سناریو قبلی تغییراتی در نتایج حاصل شده که برای نمایان شدن تأثیرات تغییرات ایجاد شده به بحث در مورد سرفاصله زمانی با مقدار ۱۰۰ درصد بیشتر از مقدار خودروهای سواری عادی یعنی ۲ ثانیه برای خودروهای خودران در حالت پیشرو دسته و حالت رانندگی آزاد است. در مقایسه خودروها وارد شده و خارج شده شبکه در سطوح نفوذ مختلف، همانند مدل‌های قبلی در حالت اشباع با صفر درصد خودرو خودران، ۱۲۸۱۰ خودرو سواری در شبکه بارگذاری می‌شوند و ۷۸۱۷ خودرو وارد شبکه می‌شوند. این میزان زمانی با میزان خودرو بارگذاری شده برابر می‌شود که ۵۰ درصد خودرو خودران در ترافیک مشارکت کنند و این نشان می‌دهد که در ۱۰ درصد نفوذ کمتر نسبت به دو مقدار قبلی به این حد می‌رسد. برخلاف تصور که به نظر می‌رسد فاصله بیشتری بین خودروها وجود دارد ولی این افزایش سرفاصله خودروهای خودران شبکه را روان‌تر می‌کند و در سهم مشارکت پایین‌تری از خودروهای خودران تأثیرات بر روی ظرفیت را نمایش می‌دهد و میزان خودرو بیشتری در شبکه اعمال می‌شوند تا از ظرفیت شبکه بیشتر استفاده شود. در شکل ۸ تغییرات مربوط به خودروهای رسیده در شبکه و میزان بهبود آن نسبت به میزان مشارکت خودروهای خودران و ضریب حجم تقاضا ترافیک ملاحظه می‌شود. در حالت ضریب ۱/۲، بدون مشارکت خودروهای خودران ۱۵۳۷۲ خودرو در شبکه بارگذاری می‌شوند که ۱۲۷٤۲ از آن‌ها به شبکه وارد می‌شوند و از میزان نفوذ ۸۰ درصد خودروهای خودران این مقدار برابر ۱۵۳۷۲ می‌شود. در حالات ضرایب ۰/۸، ۰/٦ و ۰/٤ این مقادیر از ابتدا (بدون حضور AV) با هم برابرند و خودرویی در انتظار نمی‌ماند تا وارد شبکه شود.

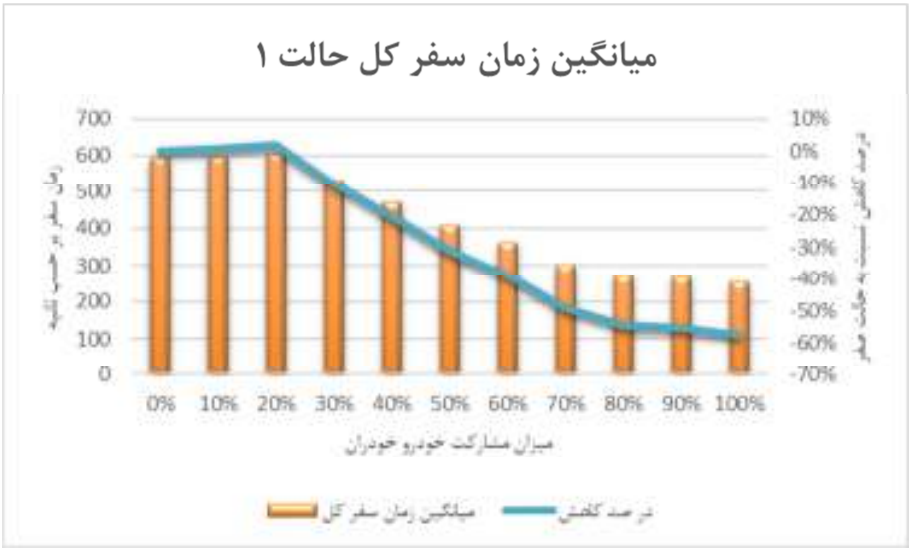
شکل ۸. نمودار خودروهای رسیده نسبت به مشارکت خودرو خودران در حالت اشباع

همچنان، می‌توان بیان کرد که با افزایش حجم ترافیک خودروهای خودران عملکرد بهتری را دارا هستند. با افزایش میزان ضریب ترافیک (۰/٦ تا ۱/۲) به ترتیب ۸، ۳۱، ٥٤/٥ و ۷۹ درصد بهبود در میزان خودروهای خارج شده در حالت ۱۰۰٪ سهم نفوذ خودرو خودران نسبت به صفر درصد نفوذ مشاهده شد که بیانگر تأثیر خودروهای خودران در ظرفیت شبکه است.

جدول ٤. سرعت میانگین کل خودروهای شبکه با توجه به ضرایب تقاضا و میزان نفوذ خودروهای خودران

ضرایب حجم ترافیک	۰/٤	۰/٦	۰/۸	۱	۱/۲
میزان مشارکت خودرو خودران (درصد)	**سرعت میانگین کل شبکه**				
۰	۸/۱۲	٤/۳	۱/۷۷	۱/٤۹	۱/۱۸
۱۰	۷/۲٦	٤/٤	۱/۹۱	۱/٤	۱/۳۳
۲۰	۸/۰٦	۳/۸۲	۲/۱٦	۱/٥٥	۱/۱۸
۳۰	۸/٤۱	٥/۳۸	۲/٥٦	۱/۹	۱/٤
٤۰	۸/٥۳	٥/۹۳	۳/۸۱	۲/۸۷	۱/۳۸
٥۰	۸/۰۲	۷/۰۷	٥/۰٤	۳/۲٤	۲/۳۹
٦۰	۷/۸۳	۷/٤۱	٦/٦	٥/٥۱	۲/۹۸
۷۰	۸/٤٤	۷/۸۲	۸/۰۸	٥/٥۷	٤/۸۷
۸۰	۸/٤٤	۸/٥٤	۹/۲۷	٦/۷۹	٦/٦
۹۰	۸/۳	۹/۱۸	۸/۰٥	۸	۸/٥۳
۱۰۰	۸/۷۱	۹/۱۳	۸/٦۷	۷/٦۱	۸/۳۳

در روش مقایسه سرعت خودروها برای شرایط مختلف با تحلیل خروجی‌های به دست آماده برای میانگین سرعت کل خودروهای درون شبکه جدول ٤ برای تمامی ضرایب به دست آمد. همان‌طور که در جدول ٤ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش در میزان نفوذ خودروهای خودران سرعت میانگین کل شبکه رو به افزایش است. مشارکت کامل خودروهای خودران می‌تواند در شبکه با ضریب حجم ۱/۲ تا ٦ برابر به سرعت شبکه بی افزاید. این مقادیر برای ضریب دیگر به صورت نزولی برابر با ٤۹۳، ۳۹۰، ۱۱۲ و ۷ درصد است. در این روش نیز پویایی شبکه با نفوذ خودروهای خودران افزایش می‌یابد و سبب افزایش تحرک در شبکه می‌شود که درنهایت به بهبود ظرفیت شبکه منجر می‌شود. در نتایج به دست آمده میزان افزایش میانگین سرعت کل شبکه نسبت به سناریو اول افزایش بیشتری داشته ولی نسبت به سناریو دوم وسایل نقلیه داخل شبکه سرعت کمتری را اتخاذ کردند. از طرفی هم می‌توان مشاهده کرد که تغییرات در سرعت با روند بهتری در حالت ۱/٥ ثانیه صورت می‌گیرند و این نشانگر عملکرد بهتر خودروهای خودران در شبکه است. پس از تحلیل خروجی‌های میانگین زمان سفر مشخص شد با افزایش میزان مشارکت خودروهای خودران میانگین کل زمان سفر شبکه به وضوح در حال کاهش است و این تأثیرات با افزایش میزان کل حجم ترافیک مشهودتر می‌شوند به طوری که کاهش ٥۲ درصدی میانگین کل زمان سفر را در ضریب ۰/۸ دیده می‌شود و در ضرایب ۱/۲ و ۱ به ترتیب ٦۲ و ٥۸ درصد کاهش زمان سفر را با نفوذ ۱۰۰ درصدی خودروهای خودران تجربه می‌کند. شکل ۹ نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده به حالت سرفاصله زمانی ۱/٥ ثانیه نزدیک‌ترند ولی در مقادیر مشارکت پایین‌تر روند تغییرات متفاوت‌تر است. در درصد نفوذهای پایین خودروهای خودران می‌توان این برداشت را اتخاذ کرد که تأثیر آن‌ها با توجه به شیب نمودار به درستی ادامه نمی‌یابد و روند مناسبی را طی نمی‌کند. این تفاوت‌ها با کاهش حجم تقاضا ترافیک مشهودتر به نظر می‌رسد. در صورتی که نفوذ خودروهای خودران در ضریب‌های تقاضا ترافیک متفاوت نشان می‌دهد که از افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصدی نفوذ به بعد تغییرات یکنواخت‌تر و بدون تناوب است.



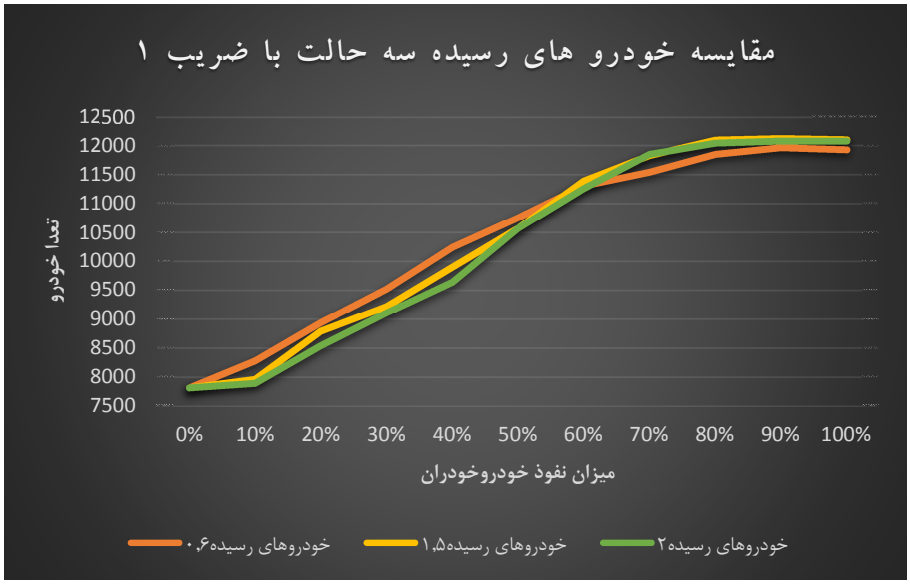
شکل ۹. نمودار میانگین زمان سفر نسبت به مشارکت خودرو خودران در حالت اشباع

٤-۲-تفسیر و جمع‌بندی شبیه‌سازی سناریوها

در بخش قبل در مورد تحلیل‌های صورت گرفته برای سه سرفاصله‌های زمانی مختلف در سه سناریو جداگانه بحث شد و به غیر از متغیر سرفاصله هر یک از پارامترهای مدل‌های دنبال کردن خودرو، مدل تغییر مسیر و مدل دسته‌بندی خودروهای خودران به صورت مشابه اعمال شدند. در هر سری از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته سناریوهای متفاوتی اجرا شد که شامل تغییرات در میزان نفوذ خودروهای خودران با گام‌های نفوذ ۱۰ درصدی از حالت صفر تا صد درصد و همچنین اجرای این ۱۱ گام برای ۵ ضریب مختلف حجم تقاضا شبکه از ۰/٤ تا ۱/۲ با گام‌های ۰/۲ به صورت مجزا انجام شد. پس از بررسی نمودارهای به دست آمده تأثیرات افزایش گام‌های نفوذ خودروهای خودران غیر قابل انکار است و با افزایش میزان نفوذ این تأثیرات چشم‌گیرتر می‌شوند و در تحلیل خروجی‌های به دست آمده می‌توان شاهد این تغییرات بود. تغییراتی که بنا بر تحقیقات تحلیلی گذردهی خودروهای خودران آتکینز انتظار می‌رفت که در سهم‌های بالاتر تأثیرات بالقوه‌ای داشته باشند چون خودروهای خودران به حفظ فاصله نزدیک با وسایل نقلیه کمک می‌کند و کاهش شتاب و سرعت ضروری را کاهش می‌دهد (Atkins,2016)؛ که نتایج به دست آمده صحت این موضوع را نشان می‌دهند. تغییرات برای ضریب ۰/٤ نیز در همین راستا مشخص است ولی به دلیل ناچیز بودن تغییرات و همچنین کاهش تشکیل دسته به دلیل کمتر بودن خودروها و زیاد بودن فاصله بین خودروهای خودران درون شبکه در ادامه کمتر به آن پرداخته شد.

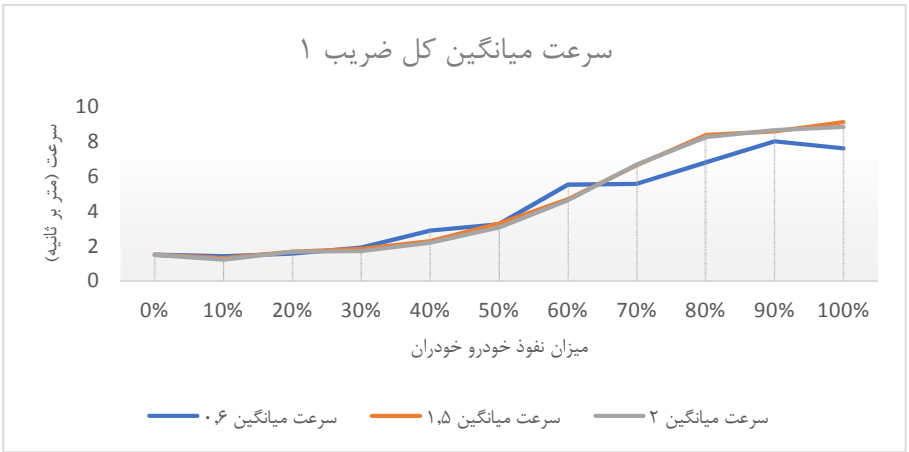
در بررسی خودروهای وارد شده و رسیده در تمامی سناریوها، می‌توان افزایش را در تعداد خودروهای رسیده با افزایش مشارکت خودروهای خودران را مشاهده نمود. این موضوع بهبود ظرفیت شبکه با بکار گیری خودروهای خودران و مشارکت آن‌ها در ترافیک را بروز می‌دهد. سپس بررسی بر روی سرعت میانگین کل شبکه نیز نتایج مشابهی پدید آورد. روند افزایشی در میانگین سرعت کل شبکه با مشارکت بیشتر خودروهای خودران صورت می‌گیرد و تحقیق آرناوت و بولینگ که برای خودروهای CACC انجام شده بود، تأثیرات قابل توجهی که با افزایش نفوذ خودروهای خودران از حدود ٤۰ درصد را نشان می‌داد (Arnaout and Bowling,2011). این موضوع در این پژوهش برای خودروهای خودران با توجه به سناریو مختلف در نفوذها حدود ۳۰ درصد رؤیت شد که نشان بر صحت این نتایج به دست آمده دارد. شاید این‌گونه به نظر برسد که تغییر پارامترهایی چون سرعت ماکسیمم، شتاب و یا فاکتور سرعت در خودروهای خودران به واسطه فنّاوری این بهبود را ایجاد کنند ولی تفاوت اعمال شده در پارامترهای فوق در برابر تغییرات چند برابری بهبود میانگین سرعت ناچیز به نظر می‌رسد و می‌توان پذیرفت که مدل‌های اعمال شده در دنبال کردن، تغییر مسیر و دسته‌بندی در این عمر تأثیرگذارند.

درباره بحث میانگین کل زمان سفر زمان شبکه در بخش قبل نیز مشخص شد که با افزایش نفوذ خودرو خودران در شبکه میانگین کل زمان سفر وسایل نقلیه کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در تحقیق پاتل به کاهش زمان سفر با به‌کارگیری ترکیب چند خودکارسازی خودروهای خودران و نزول ۷۸ درصدی آن در ساعت اوج تفسیر شده بود. در این پژوهش نیز در حالت فوق اشباع (ضریب ۱/۲) با توجه به سناریوها، کاهش ۷۷ تا ۸۰ درصدی در نتایج دیده شد که صحت نتایج این تحقیق را نشان می‌دهد. در این بحث نیز علاوه بر تأثیرات برتری برخی از پارامترها (سرعت و...) می‌توان تأثیرات مدل‌های اعمال شده در شبیه‌سازی‌ها را بر روی کاهش زمان سفر کل مشاهده کرد. نتایج به دست آمده بیانگر استفاده بهینه از ظرفیت شبکه توسط خودروهای خودران با توجه به مشخصات و ویژگی‌های مدل‌سازی آن‌ها است. از سوی دیگر با بررسی این شبیه‌سازی‌ها با توجه به مقدار ضرایب حجم تقاضا ترافیک اعمال شده در شبکه دیده شد که نسبتاً خودروهای بیشتری در شبکه‌های شلوغ‌تر به مقصد می‌رسند. این در حالی است که در ضرایب بالا (ضرایب ۱ و ۱/۲) همه خودروهای بارگذاری شده در شبکه در حالت بدون خودرو خودران به شبکه وارد نمی‌شوند ولی این مقادیر با افزایش خودروهای خودران افزایش پیدا می‌کند به صورتی که تمامی خودروهای بارگذاری شده در ضریب ۱ در نفوذ ۶۰ درصد و در ضریب ۱/۲ در نفوذ ۷۰ درصد خودروهای خودران صورت می‌گیرد. این حالت برای ضریب ۰/۸ در ۲۰ درصد نفوذ خودروهای خودران صورت می‌گیرد و در ضرایب دیگر از ابتدا تعداد خودروهای بارگذاری شده با خودروهای وارد شده در شبکه برابرند. میزان وسایل نقلیه‌ای که با نفوذ کامل خودروهای خودران به مقصد می‌رسند نسبت به حالت صفر درصد به ترتیب نزولی ضرایب به طور میانگین هر سه سناریو ۷۸/۷ ٪، ۵۴/۱ ٪، ۳۱/۲ ٪ و ۸/۱ ٪ است. این نشان می‌دهد که در شبکه‌های با ازدحام بیشتر خودروهای خودران عملکرد بهتری دارند و می‌توانند از ظرفیت شبکه برای عبور دادن خودروها با توجه به ویژگی‌های مدل خودرو خودران بیشتر استفاده کنند. این تأثیر با مطالعه آریا و همکارانش که بیانگر عملکرد بهتر خودروهای خودران در ساعات اوج با نفوذ کامل آن‌ها در شبکه بود نیز هم‌جهت است و در نتایج این تحقیق هم دیده می‌شود (Aria et al,2016). تفسیر سرعت میانگین کل شبکه با توجه به ضرایب ترافیک تحرک نسبی بیشتری را نسبت به حجم‌های پایین‌تر ایجاد می‌کند. میانگین سرعت کل در نفوذ کامل خودروهای خودران نسبت به صفر درصد برای ترتیب ضرایب حجم تقاضا (۱/۲ الی ۰/۶) تا ۷، ۵/۷، ۴/۸ و ۲/۲ برابر سرعت اولیه در هر ضریب افزایش داشته است. این باز نشان می‌دهد که با افزایش میزان ترافیک و خودروهای خودران شرکت‌کننده در آن، سرعت به طور نسبی افزایش می‌یابد به صورتی که در ضرایب و مشارکت‌های بالا این تغییرات چشمگیرتر شد.



شکل ۱۰. مقایسه خودروهای رسیده سه حالت سرفاصله زمانی با ضریب ۱,۰

در بحث میانگین زمان سفر شبکه کاهش نسبی میزان زمان سفر با در نظر گرفتن ضرایب ترافیک مشاهده می‌شود. این در حالی است که میانگین زمان سفر کل در نفوذ کامل نسبت به صفر درصد نفوذ خودروهای خودران با توجه به ضرایب ۰/٤ تا ۱/۲ به ترتیب نزولی تا ٦۰، ۵۷، ۵۱، ۳٦،۳ و ۱۱ درصد کاهش پیدا می‌کند که مقدار کاهش آن‌ها به ترتیب ٤۰۰، ۳٤۲، ۲۷۳، ۱۳٤ و ۲۵ ثانیه است. در این بررسی نیز مشاهده می‌شود که با افزایش ترافیک همچنین میزان مشارکت بیشتر خودروهای خودران در شبکه تغییرات مطلوب‌تری در پیش است که نشانگر افزایش ظرفیت موجود و همچنین کاهش ازدحام‌های معمول است. پس از بررسی و تفسیر شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای تأثیر خودروهای خودران بر روی شبکه با درنظر گرفتن میزان نفوذ خودروهای خودران و مقادیر ضرایب حجم تقاضا مختلف به بررسی عملکرد شبکه و مقایسه خروجی‌های به دست آمده با توجه به مقدار سرفاصله زمانی هر سری از شبیه‌سازی‌ها پرداخته شده است. در شکل ۱۰ نمودارهای خودروهای رسیده هر سه سناریو در ضرایب مختلف را نشان می‌دهند. در نمودارها مشاهده می‌شود که خودروهای رسیده مربوط به سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه نسبت به ضرایب تقاضا شبکه در مشارکت ۱۰۰٪ خودروهای خودران از دو مقدار دیگر بیشتر است و سرفاصله ۲ ثانیه‌ای نتایج بهتری را نسبت به ۰/٦ ثانیه نشان می‌دهد و عملکرد خودروهای خودران در نفوذ کامل با سرفاصله زمانی ۱/۵ بهترین شرایط را برآورده می‌کند و افزایش آن نیز (۲ ثانیه) باعث بهبود چندانی نمی‌شود. این در حالی است که سرفاصله ۰/٦ ثانیه برای نفوذهای ۱۰ تا ۵۰ درصد نسبت به دو مقدار دیگر بهتر است. این می‌تواند به خاطر حضور خودروهای عادی و سرفاصله زمانی آن‌ها باشد که تطبیق‌پذیری بهتری صورت می‌گیرد. به نظر می‌رسد که انتخاب سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه می‌تواند خودروهای بیشتری را به مقصد برساند و منطقی‌تر و کاراتر است. پس از تعداد خودروهایی که به مقصد رسیدند در بررسی مربوط به تحلیل میانگین سرعت کل شبکه در هر سه حالت سرفاصله زمانی نمودارهای شکل ۱۱ پدید آمدند. نمودارها نشان می‌دهند که مقادیر میانگین سرعت کل مربوط به سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه در مشارکت ۱۰۰٪ خودروهای خودران به‌جز ضریب ۰/٦ از دو مقدار دیگر بیشتر است و مقدار ۲ ثانیه بعد از آن قرار دارد. قابل مشاهده است که خودروهای خودران پیشرو و حالت آزاد با مقادیر سرفاصله زمانی ۱/۵ و ۲ ثانیه در نفوذهای بیشتر از ۵۰ تا ٦۰ درصد عملکرد نسبی بهتری در مقایسه با مقدار ۰/٦ ثانیه دارند. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که با استفاده از سرفاصله زمانی ۰/٦ ثانیه، نتایج بهتری در نفوذهای پایین‌تر و حتی در حجم ترافیک کم شبکه حاصل می‌شود. این می‌تواند به دلیل کمتر شکل گرفتن دسته‌های خودروهای خودران و یا کوتاه‌تر شدن آن‌ها در ترافیک دانست و اینکه خودروهای خودران بیشتر در حالت رانندگی آزاد قرار دارند و نسبت به دو حالت دیگر فضای کمتری را اشغال کرده و راحت‌تر در میان خودروهای عادی مانور می‌دهند. در میان مقادیر سرفاصله زمانی می‌توان به این جمع‌بندی رسید که در خودروهایی با مقدار ۱/۵ عملکرد بهینه‌تری دارند. با این حال در میزان نفوذ و حجم تقاضا پایین‌تر مقدار ۰/٦ ثانیه مناسب‌تر رفتار می‌کند.



شکل ۱۱. مقایسه سرعت میانگین کل خودروها در سه حالت سرفاصله زمانی با ضریب ۱

در ادامه بحث میانگین زمان سفر برای سه مقدار سرفاصله زمانی مورد مطالعه قرار گرفت. پس از بررسی و تحلیل نمودارها حاصل شدند تا تغییرات زمان سفر را نشان دهند.

در نمودارهای شکل ۱۲ دیده می‌شود که میانگین زمان سفر کل در هر ضریب ترافیک با نفوذ کامل خودروهای خودران در سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه کمترین مقدار و بیشتر کاهش را دارد. این در سرفاصله زمانی ۲ ثانیه در نفوذ کامل خودروهای خودران با ضریب‌های تقاضا بالا (۰/۸ تا ۱/۲) شرایط بهتری را نسبت به شبیه‌سازی‌های سرفاصله ۰/٦ ثانیه دارد در حالی که عملکرد سرفاصله ۰/٦ در حجم ترافیک و نفوذهای پایین‌تر بهتر است.

شکل ۱۲. مقایسه تغییرات میانگین زمان سفر کل خودروها در سه حالت سرفاصله زمانی با ضریب ۱

در نفوذهای بالا خودروهای خودران تأثیرات آن‌ها در حالت سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه برای پیشرو و رانندگی آزاد بیشتر از دیگران است. همچنین در نفوذهای پایین‌تر از ۵۰٪ مقدار ۰/٦ به طور معمول کمترین میزان زمان سفر را نشان می‌دهد. درنهایت به نظر می‌رسد سرفاصله زمانی ۱/۵ ثانیه عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.

۵-نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت شبکه معابر شهری بررسی شد. با استفاده از ابزار "تریسی مدل شبیه‌سازی" دسته‌بندی خودروهای خودران اعمال شد و مشخصات آن‌ها نیز در شبیه‌سازی قرار گرفت. با درنظر گرفتن سرفاصله زمانی مدل‌های رفتار راننده خودرو خودران، شبیه‌سازی را برای سناریوهای مختلف انجام شد. نتایج زیر را می‌توان از مقایسه سناریوهای این تحقیق به دست آورد.

– شبیه‌سازی برای شرایط مختلف خودروهای خودران نشان داد که هر دو مدل دنبال کردن خودرو و تعویض خط، بر جریان ترافیک شامل AV اثر می‌گذارند.

– نتایج نشان می‌دهند ظرفیت شبکه با نفوذ بیشتر خودروهای خودران رو به افزایش است.

– میزان خودروهای وارد شده به شبکه با افزایش نفوذ خودروهای خودران بیشتر می‌شود و شبکه خودروهای بیشتری را پذیرا می‌شود، همچنین از سوی دیگر مشاهده می‌شود مشارکت بیشتر AV، خودروهای بیشتری را از شبکه خارج و به مقصد می‌رساند. این مقدار می‌تواند در ساعات اوج تا حدود ۸۰ درصد با نفوذ کامل خودروهای خودران در شبکه نسبت به نفوذ صفر آن‌ها افزایش پیدا کنند.

– در بحث سرعت میانگین کل شبکه نیز بهبود چشمگیری نمایان شد که نشان داده شد که با توجه به میزان ترافیک، خودروهای خودران حدود ۲ تا ۸ برابر سرعت میانگین اولیه (نفوذ AV صفر) تمامی وسایل نقلیه را افزایش می‌دهند.

– در مورد میانگین زمان سفر کل شبکه دیده شد که تغییرات قابل توجهی در میزان کاهش آن با بالا رفتن سهم خودروهای خودران در ترافیک عبوری ایجاد شد. به صورتی که در شرایط معمول ترافیکی نیز کاهش ۵۰ درصدی زمان سفر مشهود است.

– تمامی اثرهای خودروهای خودران با افزایش حجم ترافیک بیشتر می‌شوند و نشان می‌دهد که خودروهای خودران عملکرد مطلوب‌تری را در شرایط بحرانی‌تر از خود ثبت می‌کنند.

– بررسی‌ها نشان داد وجود دسته‌بندی خودروهای خودران و سرفاصله‌های زمانی متفاوت در حالت‌های مختلف AV، عملکرد نهایی بهتری را نسبت به یکسان بودن تمامی سرفاصله‌های خودروهای خودران در داخل و خارج دسته ثبت کند. این به دلیل داشتن فاصله بیشتر جهت مانور و کاهش ترمزهای ناگهانی (انسداد) است.

– برداشت شد که تأثیر عملکرد خودروهای خودران از میزان نفوذ حدود ۳۰ تا ٤۰ درصد به طور مؤثر در شبکه مشخص خواهد شد.

۶-پی‌نوشت‌ها

1- Adaptive Cruise Control
2- Intelligent Cruise Control
3- Cooperative Adaptive Cruise Control
4- Vehicle to Vehicle
5-Autonomous Vehicle
6- Intelligent Driver Model

۷-مراجع

-A. Kesting, M. Treiber, (2007), "Jam-Avoiding Adaptive Cruise Control (ACC) and its Impact on Traffic Dynamics," in Traffic and Granular Flow", pp. 633–643.

-A. Ghiasi, O. Hussain, (2017), "A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: A Markov chain method", Transportation Research Part B.

-Bieker-Walz, (2017), "Evaluation of car-following-models at controlled intersections", In: ESM European Simulation and Modelling Conference.

-C. Ross and S. Guhathakurta, (2017), "Autonomous Vehicles and Energy Impacts: A Scenario Analysis," Energy Procedia, Vol. 143, pp. 47–52.

-C.F. Chiasserini, (2020), "Development of a framework for sensor and communication assisted vehicle dynamic", Master's degree programme, politecnico di torino.

-Chen, D, Ahn, S., (2017), "Towards vehicle automation: roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles", Transp. Res. Part B 100, pp.196-221.

DOI: 10.5592/CD/CEtrA.2018.714.

-D. J. Fagnant, (2014), "The Future of Fully Automated Vehicles: Opportunities for Vehicle- And Ride-Sharing, With Cost and Emission Savings", PhD Thesis., The University of Texas at Austin.

-E. Aria, J. Olstam and C. Schwietering, (2016), "Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver's Behavior and Traffic Performance", Transportation Research Procedia, Vol. 15, pp. 761-770.

-F. Vaudrin, J. Erdemann, (2017), "Impact of Autonomous Vehicles in an Urban Environment Controlled by Static Traffic Lights System" SUMO 2017 – Towards Simulation for Autonomous Mobility.

-G. Arnaout and S. Bowling, (2011), "Towards reducing traffic congestion using cooperative adaptive cruise control on a freeway with a ramp," Journal of Industrial Engineering and Management, Vol. 4, No. 4, pp. 699–717.

-G. Budan, K. Hayatleh, (2018), "An analysis of vehicle-to-infrastructure communications for non-signalised intersection control under mixed driving behavior," Analog Integrated Circuits and Signal Processing,

-J. Pereira, (2011), "An Integrated Architecture for Autonomous Vehicles Simulation", PHD Thesis.

-J. Erdmann, (2014), "Lane-changing model in SUMO," In Proc. SUMO 2014 Modeling Mobility with Open Data, Vol. 24, pp. 77-88.

-K. Triantis, S. Sarangi, (2011), "Traffic Congestion Mitigation: Combining Engineering and Economic Perspectives." Transportation Planning and Technology,

-M. Pourabdollah, et al., (2017) "Calibration and Evaluation of Car Following Models Using Real-World DrivingData". IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).

-M. Treiber, A. Hennecke and D. Helbing, (2000) "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations," Physical Review, Vol. 62, iss.

-N. Lackey, (2020) "Simulating Autonomous Vehicles in a Microscopic Traffic Simulator to Investigate the Effects of Autonomous Vehicles on Roadway Mobility Master Thesis".

-NHTSA, (2016) "Automated Vehicles for Safety", https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety#issue-road-self-driving.

-P. A. Ioannou and C. C. Chien, (1993), "Autonomous Intelligent Cruise Control," IEEE Trans. Veh. Techno.

-P. Tientrakool, Y. C. Ho, (2011), "Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle

Transportation Research Part C 100, 34 (7), pp. 637–645

-Umer Khan, Pavlos Basaras, (2014), "Analyzing Cooperative Lane Change Models for Connected Vehicles", International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE) DOI: 10.1109/ICCVE.Vol. 95, Iss. 3, Jun., pp. 415–422.

-W.X. Zhu and H.M. Zhang, (2018), "Analysis of mixed traffic flow with human-driving and autonomous cars based on car-following model," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 496.

-Y. Wang and L. Wang, (2017), "Autonomous Vehicles' Performance on Single Lane Road: A Simulation under VISSIM Environment," presented at 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, Shanghai, China.

-Y.Y. Wang, G. Chen, (2018), "Modified car following and lane changing simulations model for autonomous vehicle on highway," SAE (2018) Intelligent and Connected Vehicles Symposium.

communication and sensors for collision avoidance," IEEE Veh. Technol. Conf., pp. 0–4.

-Q. Guoa, Li Lib, (2019), "Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: A survey, Transportation Research Part C Emerging Technologies 19, pp.1133–1156

-Q. Lu, T. Tettamanti, (2018), "Impacts of autonomous vehicles on the urban fundamental diagram", International Conference on Road and Rail Infrastructure,

-Q. Lu, Tamás Tettamanti, (2020), "The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation, Transportation Letters, Vol. 12, No. 8, pp.540–549.

-R. Patel, M. Levin, (2016), "Effects of autonomous vehicle behavior on arterial and freeway networks", Transportation Research Record, 2561, pp.9-17.

-S. Rahman, M .Abdel-Aty, (2019), "Safety benefits of arterials' crash risk under connected and automated vehicles",

Determining the Effect of Self-Driving Vehicles on Capacity in Arterial Passages

Shahriar Afandizadeh, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Mahmoud Ahmadinejad, Associated Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Arian Akbari, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: zargari@iust.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT
The solution to congestion is the balance of demand and supply side. Increasing network capacity with road construction and more infrastructures is expensive and environmentally damaging. With better utilization of existing infrastructure, road capacity can be increased. Different traffic management methods have been proposed to address the rapid growth of travel demand, which seem to be promising. Due to the reduction of human error due to faster reaction, Autonomous adopt less distance between vehicles, which can eventually increase capacity by reducing the space between vehicles. The ability of connecting to each other can also further contribute to the formation of Platooning. Increasing the number of AVs on roads around the world causes uncertainty about their impact on the capacity of roads with AV and non-AV vehicles and mostly faces many challenges. Therefore, in this study, by applying the characteristics of AV and non-AV vehicle models in the road network of west Tehran, related southern arterial routes by various methods, total of 825 simulations were performed. These simulations take into account the models of car following, lane change and Platooning, when they participate in the network with different share values with %10 intervals that normal vehicles constitute the entire traffic flow and in Each stage of the simulation contributes to AV cars, showing the Autonomous Vehicles effects that have on the capacity of the network passages. The parameters considered as output in this study are the number of vehicles passing through the network, the mean speed of the whole network vehicles and the mean total travel time, which were examined along with the time headway changes of car following models and platooning. Also, different traffic demands were applied on the network to examine the performance of AV in different traffic conditions. The results of the thesis show that the full penetration of Autonomous vehicles in Platoon can contribute more than %50 in the capacity of the network as well as increasing the amount of time headway for the free driving and Leader of the platoon vehicles, which will have a positive effect on the interaction of AVs in low penetration, and these promise to experts to observe its effects in reality.

Keywords: Penetration impact, Autonomous Vehicles, Capacity, Car following Model, Lane changing, Platooning