نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۵، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۶۹۱ تا ۱۷۰۴
DOI: 10.22060/ceej.2021.19811.7261

بررسی اثر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت آزادراه‌ها با استفاده از شبیه سازی خردنگر

امیرحسین کرباسی*، محمود صفارزاده

دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

خلاصه: ازدحام یکی از مشکلاتی است که بسیاری از کشورها را در دهه‌های گذشته آزار داده است و باعث تحمیل شدن هزینه‌های زیادی به بسیاری از کشورها شده است. به همین دلیل بسیاری از محققان به دنبال راهکارهایی در جهت کاهش ازدحام در شبکه‌های حمل‌ونقلی هستند. از طرف دیگر پیش‌بینی می‌شود که ظهور خودروهای خودران و متصل می‌تواند در کاهش ازدحام در راه‌ها و افزایش ظرفیت راه‌ها مؤثر واقع شود. به همین دلیل این مطالعه به بررسی اثر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت راه‌ها می‌پردازد. در این مطالعه از یک شبکه آزادراه با قسمت Merge استفاده شده است و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز خردنگر SUMO پیاده‌سازی شده‌اند. در این مطالعه برای تعیین رفتار رانندگی از مدل تعقیب خودرو برای حرکات طولی و از مدل تغییر خط برای حرکات عرضی استفاده شده است. مدل تعقیب خودرو کرواس و مدل تغییر خط LC2013 جهت تعیین رفتار رانندگی در این مطالعه استفاده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که خودروهای خودران می‌توانند ظرفیت راه‌ها را تا ۵۲ درصد افزایش دهند و خودروهای خودران و متصل می‌توانند ظرفیت راه‌ها را تا ۶۵ درصد افزایش دهند که این افزایش‌ها نشان دهنده پتانسیل این خودروها جهت افزایش ظرفیت و کاهش ازدحام می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که زمانی این خودروها می‌توانند اثر چشمگیری بر ظرفیت بگذارند که حضور این نوع خودروها در جاده‌ها چشمگیر باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۳
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۲۶

کلمات کلیدی:
خودروهای خودران و متصل
شبیه‌سازی خردنگر
ظرفیت
ازدحام
SUMO

۱- مقدمه

شهرها مکان‌هایی هستند که سطح انباشت و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی بالایی دارند. آن‌ها ساختارهای پیچیده فضایی هستند که توسط زیرساخت‌ها، از جمله سیستم‌های حمل‌ونقل پشتیبانی می‌شوند. هر چه یک شهر بزرگ‌تر باشد، پیچیدگی آن و پتانسیل اختلال در آن بیشتر خواهد بود، به ویژه هنگامی که این پیچیدگی به طور مؤثر کنترل نشود. بهره‌وری شهری وابستگی زیادی به کارایی سیستم حمل‌ونقل آن برای جابجایی نیروی کار، مصرف کنندگان و حمل‌ونقل بین مبدأ و مقصد مختلف دارد. علاوه بر این، پایانه‌های حمل‌ونقل مانند بندرها، فرودگاه‌ها و راه‌آهن در مناطق شهری واقع شده‌اند و به ثبات یک شهر در یک سیستم منطقه‌ای و جهانی کمک می‌کنند. برخی از چالش‌ها مانند ازدحام (که شهرهایی مانند رم را آزار می‌داد) باستانی هستند، در حالی که برخی دیگر مانند توزیع بار شهری یا اثرات زیست محیطی مشکلاتی جدید هستند [۱].

طی دهه‌های گذشته، ازدحام ترافیک[1] به یک مشکل مهم در شهرهای بزرگ تبدیل شده است. به عنوان مثال، در مونیخ، بر اساس شاخص ترافیک TomTom، رانندگان باید ۵۱ درصد افزایش در زمان پیک صبح را تحمل کنند. مشکلات ترافیکی در شهرها ممکن است در آینده حتی بیشتر شود، زیرا سهم فزاینده‌ای از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کند – در سال ۲۰۲۰، ۵۶ درصد از جمعیت جهان شهری بودند [۲]، در حالی که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، ۶۶ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند این امر منجر به افزایش بازدید به مناطق شهری و ایجاد ازدحام شود و بر همین اساس بسیاری از محققان تمایل به ایده‌های نوآورانه برای حل مشکل ازدحام دارند [۲]. همچنین افزایش ازدحام می‌تواند بر دیگر جنبه‌های برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از جمله زمان سفر، ایمنی و پایداری در حمل‌ونقل تأثیر منفی بگذارد.

یکی از این ایده‌های نوآورانه ظهور خودروهای خودران و متصل[2] است

1 Traffic congestion
2 Connected and Automated Vehicles

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Amirhosein.karbasi22@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

جدول ۱. سطوح خودرانی برای خودروهای خودران [۳]

Table 1. Automation levels for Autonomous Vehicles [3]

سطح خودرانی	تعریف
سطح ۰ (هیچ خودرانی[1])	عملکرد رانندگی تمام وقت توسط راننده انسانی از تمام جنبه‌های وظیفه رانندگی پویا انجام می‌شود، حتی اگر خودرو توسط سیستم‌های هشدار یا مداخله تقویت شده باشد.
سطح ۱ (کمک‌راننده[2])	اجرای خاص حالت رانندگی توسط سیستم کمکی راننده (هدایت خودرو یا شتاب / کاهش سرعت) با استفاده از اطلاعات مربوط به محیط رانندگی و با این انتظار که راننده انسان تمام جنبه‌های باقی مانده از کار رانندگی پویا را انجام می‌دهد.
سطح ۲ (خودرانی جزئی[3])	اجرای خاص حالت رانندگی توسط یک یا چند سیستم کمک راننده در هر دو حالت هدایت خودرو و شتاب/کاهش سرعت با استفاده از اطلاعات مربوط به محیط رانندگی و با این انتظار که راننده انسان تمام جنبه‌های باقی مانده از وظیفه رانندگی پویا را انجام دهد.
سطح ۳ (خودرانی مشروط[4])	عملکرد خاص حالت رانندگی توسط سیستم رانندگی خودران از تمام جنبه‌های وظیفه رانندگی پویا با این انتظار که رانندگان انسانی به درخواست مداخله پاسخ مناسب دهند.
سطح ۴ (سطح خودرانی بالا[5])	عملکرد خاص حالت رانندگی توسط سیستم رانندگی خودران از همه جنبه‌های وظیفه رانندگی پویا، حتی اگر یک راننده انسانی به درخواست مداخله پاسخ مناسب ندهد.
سطح ۵ (کاملاً خودران[6])	عملکرد تمام وقت توسط سیستم رانندگی خودران از تمام جنبه‌های وظیفه رانندگی پویا تحت همه شرایط جاده و محیط زیست که می‌تواند توسط یک راننده انسانی مدیریت شود.

[1] No automation
[2] Driver Assistance
[3] Partial Automation
[4] Conditional Automation
[5] High Automation
[6] Full Automation

که پیش‌بینی می‌شود این خودروها بتوانند پاسخی برای مشکل ازدحام باشند و اثر زیادی بر افزایش ظرفیت[1] و کاهش ازدحام داشته باشند. این نوع خودروها دو ویژگی اصلی دارند که آن‌ها را از خودروهای عادی متمایز می‌کند. ویژگی اول این خودروها خودران بودن است که به این خودروها اجازه می‌دهد بدون استفاده از راننده عملکرد کامل رانندگی را بر عهده بگیرند. خودرانی خودروها بر اساس تعریف جامعه مهندسان خودرو (SAE[2]) دارای سطوح مختلفی می‌باشد [۳] که توضیحات این سطوح مختلف خودرانی در جدول ۱ مشخص شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه از سطح ۵ خودرانی به معنای خودرو خودران کامل استفاده شده است. ویژگی دوم این نوع خودروها ویژگی اتصال[3] بین خودروهای خودران می‌باشد. خودرو متصل به خودرویی گفته می‌شود که قادر به اتصال به شبکه‌های خارجی باشد، اعم از وسایل نقلیه دیگر، زیرساخت‌ها یا شبکه‌های عمومی. برخی از مزایای وسایل نقلیه متصل ممکن است بدون اتصال خاص وسیله نقلیه تحقق یابد – به عنوان مثال، یک راننده با تلفن همراه که اطلاعات را به شبکه ترافیک شهری ارائه می‌دهد، یا یک سیستم ناوبری ماهواره‌ای درون اتومبیل که می‌تواند اطلاعات مسیر مستقیم را ارائه دهد. بنابراین اغلب بین اتصال وسیله نقلیه به

1 Capacity
2 The Society of Automotive Engineers
3 Connectivity

وسیله نقلیه (V2V) و وسیله نقلیه به زیرساخت (V2I) تمایز قائل می‌شوند [۴]. بنابراین این ویژگی خودروهای خودران و متصل به آن‌ها کمک می‌کند تا با سرفاصله زمانی کمتر ظرفیت راه‌ها را افزایش دهند.

بنابراین در این مطالعه با توجه به مطالب گفته شده و ضرورت پرداختن به تأثیری که این نوع خودروها بر افزایش ظرفیت و کاهش ازدحام دارند، اثر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مطالعه سه نوع خودرو استفاده شده است که نوع اول خودروهایی هستند که کاملاً تحت کنترل رانندگان می‌باشند و به عنوان خودروهای معمولی[1] در نظر گرفته می‌شوند. نوع دوم خودروهایی هستند که خودرو به صورت خودران عملکرد رانندگی را کاملاً بر عهده دارند اما از ویژگی اتصال بین خودروها برخوردار نیستند که به عنوان خودروهای خودران[2] در نظر گرفته می‌شوند. نوع سوم خودروهایی هستند که علاوه بر اینکه عملکرد رانندگی به طور کامل انجام می‌دهند از ویژگی اتصال نیز بهره می‌برند که این نوع خودروها با عنوان خودروهای خودران و متصل در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از شبیه‌سازی خردنگر در نرم‌افزار شبیه‌ساز SUMO سناریوهای مربوط به شبیه‌سازی‌ها اجرا شده‌اند و تأثیر خودروهای خودران و تأثیر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت آزادراه معین می‌شود.

۲- مطالعات پیشین

در این قسمت مطالعات مرتبط با تأثیر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت راه‌ها بررسی می‌شود. در مورد تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت فردریش [۵] مطالعه‌ای را در این خصوص انجام داد. در این مطالعه تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت بر اساس چندین رابطه می‌باشد که ظرفیت‌ها را در دو حالت ترافیک عادی و ترافیک مخلوط محاسبه می‌کند. در این مطالعه مشخص شده است که ظرفیت راه‌ها می‌تواند تا ۸۰ درصد در اثر حضور خودروهای خودران افزایش یابد. در مطالعه‌ای که توسط هارتمن و همکاران [۶] صورت گرفته است تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت آزادراه‌ها با استفاده از شبیه‌سازی جریان میکروسکوپی ترافیک نشان داده شده است. این شبیه‌سازی برای نرخ‌های مختلف نفوذ وسایل نقلیه خودران در ناوگان وسایل نقلیه ملی آلمان انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی از سال ۲۰۳۰ تا بعد از ۲۰۵۰ نشان می‌دهد که ظرفیت در سال‌های ابتدایی کاهش پیدا می‌کند اما بعد از سال ۲۰۵۰ افزایش ظرفیت تا ۴۰ درصد مشاهده می‌شود به دلیل اینکه بعد از این سال درصد نفوذ خودروهای خودران افزایش پیدا می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر که توسط اولیا و همکاران [۷] صورت گرفت از روش شبیه‌سازی میکروسکوپی جهت مشخص کردن اثر خودروهای خودران بر ظرفیت‌ها استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از مدل تعقیب خودرو فریتسچه در نرم‌افزار شبیه‌سازی پارامیکس استفاده شده است. در این شبیه‌سازی همکاری بین خودروها نیز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد خودروهای خودران نهایتاً تا ۸ درصد ظرفیت را بهبود می‌دهند. دلیل رشد کم ظرفیت در حالت خودروهای خودران بدون همکاری بین خودروها این است که در این مطالعه سرفاصله زمانی بین خودروهای عادی و خودروهای خودران یکسان است و از این لحاظ تفاوتی با یکدیگر ندارند. اما در خودروهای خودرانی که با یکدیگر همکاری دارند ظرفیت راه‌ها می‌تواند تا ۳۰۰ درصد افزایش یابد. در مطالعه‌ای که توسط کیونگ لو و همکاران [۸] صورت گرفته است به دنبال پاسخ به یک سؤال اساسی است، چگونه درصد متفاوت وسایل نقلیه خودران در میان وسایل نقلیه عادی و سطح‌های مختلف رانندگی خودران بر دیاگرام اساسی ماکروسکوپیک شهری تأثیر می‌گذارد. برای همین منظور در این مطالعه از مدل تعقیب خودرو کراوس و همچنین از نرم‌افزار شبیه‌سازی خردنگر ترافیکی SUMO استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از ۶۴ تقاطع استفاده شده است تا تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت این تقاطع‌ها مشخص شود و همچنین در این شبیه‌سازی از همه سطوح خودرانی نیز استفاده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی این مطالعه مشخص شده است می‌توان دریافت که خودروهای خودران می‌توانند ظرفیت کل شبکه را به میزان ۲۵ درصد افزایش دهند و ظرفیت هر لینک را به میزان ۳۵ درصد افزایش دهند. مطالعه دیگری توسط تیلگ و همکاران [۹] صورت گرفته است. در این مطالعه بررسی می‌شود که چگونه فناوری در حال ظهور خودرانی خودرو می‌تواند عملیات رانندگی را بهبود بخشد و ظرفیت قسمت weaving را افزایش دهد. یک مدل ترکیبی چند کلاسه کارآمد و در عین حال مؤثر ارائه شده است که دو جنبه از این فناوری را در سناریوهایی با نرخ نفوذ مختلف در نظر می‌گیرد: ۱) پتانسیل کنترل تصمیمات تغییر مسیر مورد نظر برای وسایل نقلیه خودران، که به صورت ماکروسکوپی به عنوان توزیع موقعیت‌های تغییر خط در نظر گرفته می‌شود، و ۲) زمان واکنش پایین همراه با وسایل نقلیه خودران که می‌توانند ناهماهنگی‌ها و شکاف‌های مورد نیاز برای مانورهای تغییر خط را کاهش دهند. نتایج نشان می‌دهند که خودروهای خودران می‌توانند ظرفیت را تا حدود ۱۰۰ درصد بر اساس تغییر در زمان واکنش بهبود دهند. کیونگ لو و همکاران [۱۰] ظرفیت راه‌ها بر اساس شبیه‌سازی میکروسکوپی و نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده را با توجه به دیاگرام اساسی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه اثر خودروهای خودران را در یک شبکه شهری بزرگ

1 *Regular* Vehicles
2 Automated Vehicles

و یک شبکه تقاطع بزرگ بررسی کردند. همان‌طور که در نتایج مشخص شده است خودروهای خودران می‌توانند ظرفیت راه‌ها را ۱۶ و ۲۴ درصد به ترتیب در تقاطع و شبکه شهری بهبود ببخشند.

همانند خودروهای خودران، در مورد خودروهای خودران و متصل نیز مطالعاتی انجام شده است و تأثیر این نوع خودروها بر ظرفیت راه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعه‌ای که توسط قیاسی و همکاران [۱۱] انجام شده است یک مدل ظرفیت تحلیلی برای ترافیک مخلوط در آزادراه بر اساس نمایش زنجیره‌ای مارکوف[1] از توزیع فضایی[2] مسیرهای متناظر و تصادفی ارائه شده است. این مدل نه تنها طیف کاملی از نرخ نفوذ بازار خودروهای خودران و متصل بلکه همه مقادیر احتمالی حرکت در یک خط[3] را نیز برای خودروهای خودران و متصل که تا حد زیادی بر توزیع فضایی تأثیر می‌گذارد، به نمایش می‌گذارد. تحلیل‌های عددی تأیید می‌کنند که این مدل تحلیلی ظرفیت ترکیبی مربوطه را به طور دقیق در تنظیمات مختلف تعیین می‌کند. این مدل تحلیلی امکان بررسی تأثیر سناریوهای مختلف فناوری خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت ترافیک مخلوط را فراهم می‌کند. این چارچوب تحلیلی بیشتر این امکان را می‌دهد تا یک مدل فشرده مدیریت خط برای تعیین کارآمد تعداد بهینه از خطوط خودروهای خودران و متصل اختصاص داده شده برای به حداکثر رساندن توان ترافیک مختلط از یک بخش بزرگراه چند خطه، ایجاد شود. در مطالعه‌ای مفصلی که توسط شرکت Atkins صورت گرفته است [۴]، تأثیر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت راه‌های مختلف تخت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه رفتار رانندگان به سه رفتار محافظه کارانه[4]،رفتار نرمال، رفتار پرخاشگرانه[5] تقسیم شده است و این سه رفتار را در ۹ سطح قرار داده است. همچنین در این مطالعه از شبکه‌های مختلفی اعم از آزاده راه، تقاطع، میدان استفاده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار ویسیم و مدل تعقیب خودرو ویدمان ۹۹ استفاده شده است. به عنوان مثال برای شبکه آزادراه بر اساس نتایج تأثیر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت این آزادراه مشخص شده است که بر اساس رفتار پرخاشگرانه ظرفیت تا ۵۸/۵ بهبود یافته است. مطالعه دیگری توسط لیو و همکاران [۱۲] صورت گرفته است که در این مطالعه با استفاده از یک ابزار شبیه‌سازی خرد، تأثیر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت آزادراه بررسی می‌شود. یک آزادراه چهار خطه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. برای به دست آوردن نتایج معتبر، پارامترهای مختلف رفتار رانندگی با شرایط واقعی ترافیک برای وسایل نقلیه رانده شده توسط انسان کالیبره شده‌اند. به طور خاص، کالیبراسیون با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. یک مدل راننده هوشمند اصلاح شده ایجاد شده و به عنوان مدل تعقیب خودرو برای خودروهای خودران و متصل استفاده می‌شود. شبیه‌سازی در بخش اصلی آزادراه تحت نرخ‌های مختلف نفوذ خودروهای خودران و متصل و محدودیت‌های مختلف سرعت آزادراه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان نفوذ در بازار، ظرفیت آزادراه افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت مجاز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در سرعت‌های ۸۰، ۹۰، ۱۰۴ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت ظرفیت راه به ترتیب ۶۹ درصد، ۸۰ درصد، ۸۵ درصد و ۱۰۲ درصد افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری که توسط ونگ و همکاران [۱۳] صورت گرفته است تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت یک شبکه آزادراه بررسی شده است. همان‌طور که در قسمت خودروهای خودران اشاره شده است این شبیه‌سازی نیز از روش دیاگرام اساسی برای تحلیل نتایج خود استفاده کرده است. در واقع ابتدا از یک شبیه‌سازی کلان نگر تأثیر این نوع خودروهای خودران را بررسی کرده و با استفاده از روش شبیه‌سازی خردنگر این نتایج را منطقی و قابل قبول توصیف کرده است. در این مطالعه، از مدل شبیه‌سازی ترافیک میکروسکوپی برای بررسی تأثیر رانندگی خودکار متصل به جریان ترافیک استفاده شده است. مدل اتوماتای سلولی (CA) که دارای فرم نسبتاً ساده و نتیجه شبیه‌سازی خوبی است، به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی ترافیک میکروسکوپی مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل CA، جاده به سلول‌ها تقسیم می‌شود، در یک سلول ممکن است وسیله نقلیه وجود داشته باشد یا نه. مدل CA شامل مجموعه‌ای از قوانین است که تعیین می‌کند چه زمانی خودرو به سلول پایین‌دست منتقل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و دیاگرام اساسی نشان می‌دهد که ظرفیت به شکل مطلوبی افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای که توسط نیلس و همکاران [۲] انجام شده است میزان زمان انتظار در تقاطع‌ها را مورد بررسی قرار داده است. این مطالعه بر تأثیری که سهم فزاینده خودروهای خودران و متصل با رفتار رانندگی هماهنگ بر ظرفیت تقاطع‌های چراغ‌دار شهری دارد متمرکز است. این مطالعه نه تنها سناریو را با ترافیک خودران در نظر می‌گیرد، بلکه چندین سناریو را با ترافیک مخلوط تحلیل می‌کند، جایی که تعداد فزاینده‌ای از خودروهای خودران و متصل جاده را با رانندگان انسانی و همچنین سایر کاربران جاده به اشتراک می‌گذارند. اثرات با شبیه‌سازی تقاطع چراغ‌دار در

1 Makrov chain
2 spatial distribution
3 platoon
4 cautious driving behaviors
5 aggressive driving behaviors

مرکز مونیخ، آلمان، با استفاده از داده‌های واقعی با توجه به هندسه تقاطع، کنترل سیگنال و حجم ترافیک ارزیابی شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که میانگین زمان انتظار در تقاطع می‌تواند به طور قابل توجهی کاهش یابد.

با توجه به مطالعات پیشین این‌گونه برداشت می‌شود که خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل می‌توانند با استفاده از ویژگی‌هایی که دارند ظرفیت راه‌ها را به حدی مطلوب افزایش داده و از ازدحام راه‌ها بکاهند. اما در این مطالعات شکافی وجود دارد که باعث شده است که این مطالعه در جهت پوشش این شکاف گام بردارد. شکاف مهم میان این مطالعات این است که در این مطالعات یا خودروهای خودران در نظر گرفته شده است یا خودروهای خودران و متصل و هیچ یک از این مطالعات گفته شده تأثیر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل را با هم در مقایسه با خودروهای عادی در نظر نگرفته‌اند. بنابراین برای پوشش این شکاف این مطالعه به بررسی اثر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت آزادراه‌ها می‌پردازد.

۳- روش تحقیق

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی از شبیه‌سازی خردنگر استفاده شده است. مدل خردنگر مدلی است که رفتار و تعاملات فردی هر راننده را در یک سیستم ترافیک توصیف می‌کند. اولین تحقیقات از شبیه‌سازی خردنگر ترافیک جاده بر رفتار وسیله نقلیه در یک محیط گردش انجام شده است. برای مدل‌سازی مسیرهای وسایل نقلیه شخصی، به طور کلاسیک دو کلاس رفتار از هم تفکیک شده‌اند. دو شاخصه اصلی مدل‌های خردنگر تعیین رفتار طولی وسایل نقلیه (مدل تعقیب خودرو[1]) و تعیین رفتار عرضی وسایل نقلیه (مدل تغییر خط[2]) می‌باشد که بر اساس این دو شبیه‌سازی خردنگر انجام می‌پذیرد [۱۴].

۳- ۱- مدل تعقیب خودرو

مدل‌های تعقیب خودرو که فرآیند تک به تک وسایل نقلیه در جریان ترافیک را توصیف می‌کنند، برای تقریباً نیم قرن مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها سرعت یک وسیله نقلیه را نسبت به وسیله نقلیه پیش رو تعیین می‌کند. این مدل‌ها نشان می‌دهند که وسیله نقلیه عقب‌تر همیشه در تلاش است تا یک فاصله ایمن را با وسیله نقلیه پیشرو حفظ کند. وسیله نقلیه عقب‌تر همیشه با رفتار کاهش سرعت وسیله نقلیه پیشرو سازگار است. سرعت ایمن به رانندگان وسیله نقلیه موتوری اشاره دارد که قانون را در سرعت مجاز برای اطمینان از رانندگی ایمن با توجه به شرایط، شرایط جاده و شرایط ترافیکی انتخاب می‌کنند. سرعت خودروها باید در سرعت مطمئنه کنترل شود تا ایمنی رانندگی در جاده تضمین شود. مدل‌های تعقیب خودرو رفتارهای تعقیبی را که سازگاری وسایل نقلیه را با موقعیت، سرعت یا شتاب آن‌ها با توجه به وسایل نقلیه اطراف نشان می‌دهد توصیف می‌کنند [۱۴]. در واقع بسیاری از مدل‌های خردنگر بر پایه رفتارهای طولی و رفتارهای عرضی خودرو بنا نهاده شده‌اند و تعدادی از اصلی‌ترین مدل‌های تعقیب خودرو به صورت جدول ۲ می‌باشد.

در این مطالعه از مدل تعقیب خودرو کراوس استفاده شده است که اصلی‌ترین مدل تعقیب خودرو در شبیه‌ساز SUMO می‌باشد. مدل‌های تعقیب خودرو حرکات طولی خودروها را مشخص می‌کنند که اصلی‌ترین شاخصه این مدل‌ها حفظ همان‌طور که بیان شد در این مطالعه از مدل سرعت ایمن با خودرو جلویی می‌باشد. در این مطالعه از مدل تعقیب خودرو کراوس[3] استفاده شده است. مدل توسعه یافته توسط کراوس یک مدل میکروسکوپی و تعقیب خودرو است که بر اساس سرعت مطمئنه در سال ۱۹۹۷ ساخته شده است. این سرعت ایمن به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$v_{safe} = v_l(t) + \frac{g_t - v_l(t)\,t_r}{\frac{v_l(t) + vf(t)}{2b} + t_r} \qquad (۱)$$

جایی که $v_l(t)$ نشان دهنده سرعت وسیله نقلیه پیشرو در زمان t است، $g(t)$ فاصله نسبت به وسیله نقلیه پیشرو در زمان t است، t_r زمان واکنش راننده است (حدود ۱ ثانیه) و b حداکثر کاهش سرعت خودرو است. از آنجا که سرعت امن ممکن است بزرگ‌تر از حداکثر سرعت مجاز در جاده باشد، حداقل این مقادیر به عنوان سرعت حاصله محاسبه می‌شود که اصطلاحاً سرعت "مطلوب" است" [۱۴]:

$$v_{des} = min\left[v_{max},\ v + at, v_{safe}\right] \qquad (۲)$$

در این رابطه a توانایی شتاب‌گیری می‌باشد. بر همین اساس پارامترهای تعریف شده در نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی در جدول ۳ مشخص شده است.

1 Car Following model
2 Lane changing model
3 Krauss car following model

جدول ۲. برخی از مهم‌ترین مدل‌های تعقیب خودرو [۱۷-۱۴].

Table 2. Some of the most important car following models [14-17]

مدل	توضیح
گیبس[۷]	این مدل در ۱۹۷۰ توسعه داده شد. این به مدل طور مستقیم بر اساس رفتار راننده و انتظار برای وسایل نقلیه در یک جریان ترافیکی است. محدودیت‌های پارامترهای راننده و وسیله نقلیه برای اهداف ایمنی، تقلید صفات وسایل نقلیه از وسایل نقلیه در جلوی جریان ترافیک است.
نوول[۸]	این مدل روشی است که برای تعیین چگونگی دنباله‌روی وسایل نقلیه در جاده استفاده می‌شود. ایده اصلی این مدل این است که یک وسیله نقلیه حداقل فاصله مکانی و زمانی را بین خود و وسیله نقلیه مقدم بر خود حفظ کند.
مدل راننده هوشمند[۹]	در مدل‌سازی جریان ترافیک ، مدل راننده هوشمند (IDM) یک مدل دنباله‌دار اتومبیل زمان‌دار برای شبیه‌سازی آزادراه و ترافیک شهری است. این مدل در سال ۲۰۰۰ ساخته شد تا نتایج حاصل از سایر مدل‌های راننده "هوشمند" مانند مدل گیبس را که ویژگی‌های واقع‌گرایانه را در حد قطعی از دست می‌دهد، بهبود بخشد.
مدل کراوس[۱۰]	کراوس مدلی را بر اساس سرعت ایمن ایجاد کرد، شتاب و کاهش سرعت در وسایل نقلیه مختلف متفاوت است. توبیاس مایر و دانیل کراژویچس آن را در SUMO توسعه دادند، شتاب و کاهش سرعت در این مدل متفاوت است، اما می‌تواند ناگهان تغییر کند.

[7] Gipps
[8] Newell
[9] Intelligent driver model
[10] Krauss

جدول ۳. پارامترهای مدل تعقیب خودرو کراوس [۱۴]

Table 3. Krauss car following model parameters [14]

پارامتر	توضیح
Mingap	حداقل فاصله خودرو با خودرو جلویی (متر)
Tau	حداقل زمان مورد نظر راننده. تفسیر دقیق بر اساس مدل متفاوت است. برای مدل کراوس بر اساس فضای بین خودرو پشتی و خودرو جلویی است)
Accel	توانایی شتاب‌گیری وسایل نقلیه (متر بر ثانیه ^ ۲)
Decel	توانایی کاهش سرعت وسایل نقلیه (متر بر ثانیه ^ ۲)
Sigma	نقص راننده (۰3 نشان‌دهنده رانندگی کامل است)
Emergency decel	حداکثر توانایی کاهش سرعت وسایل نقلیه در مواقع اضطراری (متر بر ثانیه ^ ۲)

۳- ۲- مدل تغییر خط

هنگام شبیه‌سازی ترافیک در شبکه‌های جاده‌ای پیچیده با جاده‌های چند خطه، بیشتر مسیرهایی که ممکن است وسیله نقلیه از آن‌ها استفاده کند نیاز به تغییر خط دارند. حتی در مواردی که چنین موارد ضروری وجود ندارد، رفتار تغییر مسیر اغلب عامل اصلی برای کارایی ترافیک است که اهمیت مدل مربوطه را نشان می‌دهد. مدل تغییر مسیر که در اینجا شرح داده شده دارای دو هدف اصلی است: این تغییر خط، تغییر تصمیم یک وسیله نقلیه را برای یک مرحله شبیه‌سازی واحد بر اساس مسیر وسیله نقلیه و شرایط ترافیکی فعلی وسایل نقلیه محاسبه می‌کند. علاوه بر این، این مدل تغییرات در سرعت را برای خود وسیله نقلیه و برای جلوگیری از تصادف با وسایل نقلیه دیگر محاسبه می‌کند که باعث اجرای موفقیت‌آمیز مانور تغییر مسیر مورد نظر می‌شود. در مقایسه با سایر مدل‌های تغییر مسیر میکروسکوپی، این مدل به صراحت بین چهار انگیزه مختلف برای تغییر خط تفاوت قائل می‌شود.

تغییر خط استراتژیک[1]: هر زمان که وسیله نقلیه باید خط خود را تغییر دهد تا بتواند در مسیر خود به لبه بعدی برسد، این نوع تغییر خط صورت می‌گیرد. هر زمان که خط فعلی وسیله نقلیه هیچ ارتباطی با لبه بعدی مسیر نداشته باشد این تغییر خط اتفاق می‌افتد. در این حالت می‌گوییم وسیله نقلیه در یک خط مرده[2] قرار دارد. البته باید توجه داشت که چنین خطی به معنای عادی نباید بن‌بست باشد. یک خط چرخش به چپ از نظر وسیله نقلیه‌ای که می‌خواهد مستقیم حرکت کند، مرده است. اگر هیچ انگیزه دیگری مانع آن نشود، یک وسیله نقلیه قبل از رسیدن به خط مرده، تغییر مسیر باانگیزه استراتژیک را به خوبی انجام می‌دهد.

تغییر خط با همکاری[3]: در برخی شرایط واقعی ، وسایل نقلیه (یا بهتر بگوییم رانندگان آن‌ها) مانورهای تغییر خط را انجام می‌دهند و تنها هدف آن کمک به وسیله نقلیه دیگر با تغییر مسیر به سمت خط خود است. در مدل فعلی، وسایل نقلیه توسط سایر وسایل نقلیه در مورد مسدود شدن یک خط توسط وسیله نقلیه دیگری مطلع می‌شوند (دلیل این امر این است که چراغ‌های گردشی مسدود شده خودرو همیشه برای خودرو پیرو قابل مشاهده هستند، در حالی که یک وسیله نقلیه مسدود کننده کمتر مشهود است).

اگر هیچ دلیل استراتژیکی برای تغییر خط وجود نداشته باشد، ممکن است وسیله نقلیه جلویی در هر دو جهت تغییر کند تا شکاف برای وسیله نقلیه مسدود شده برطرف شود. برخلاف انتظار، مشخص شد که این امر در برخی از سناریوها تأثیر مثبتی در جریان ترافیک دارد حتی اگر وسیله نقلیه بخواهد از سمت وسیله نقلیه مسدود شده تغییر مسیر دهد. این اثر هنوز درک نشده و تحقیقات بیشتری را در این زمینه ضروری می‌کند. وسایل نقلیه‌ای که نمی‌توانند تعویض خط مشترک را انجام دهند سرعت خود را کمی تنظیم می‌کند تا احتمال موفقیت در مراحل شبیه‌سازی بعدی افزایش یابد. با این وجود، در صورت مسدود شدن، درخواست تغییر سرعت نمی‌کند.

یک مورد خاص برای رفتار با همکاری در دوربرگردان‌های چند خطه به وجود می‌آید. به طور معمول، همه وسایل نقلیه از دورترین خط وارد میدان دور می‌شوند و همچنین باید در بیرونی‌ترین خط دوباره حرکت کنند. به دلیل مسافت‌های کوتاه ، این بدان معنی است که آن‌ها باید به دلایل استراتژیک همیشه در دورترین خط باقی بمانند. با این حال، این به طور مؤثر تمام دوربرگردان‌های چند خط را به دوربرگردان‌های یک خط تبدیل می‌کند و در نتیجه توان ظرفیتی را کاهش می‌دهد. به همین دلیل، مدل تغییر دهنده خط، وسایل نقلیه‌ای را که هنوز در لبه دور نهایی خود قرار ندارند، مجبور می‌کند تا به سمت خط داخلی تغییر کنند. در حالی که این عدم آگاهی از انگیزه‌های استراتژیک گاهی منجر به مشکل در ترافیک می‌شود، اما تأثیر مثبتی بر عملکرد دوربرگردان دارد.

تغییر خط تاکتیکی[4] : تغییر تاکتیکی خط به مانورهایی گفته می‌شود که در آن وسیله نقلیه سعی در جلوگیری از پیروی کند را دارد. این امر مستلزم ایجاد توازن در برابر سرعت پیش‌بینی شده در برابر تلاش برای تغییر خط است (که مسلماً یک ارزش ذهنی بسیار محرک است). افزایش سرعت پیش‌بینی شده نیز باید در برابر الزام آزاد نگه داشتن خط سبقت متعادل شود. عدم انجام این کار در شرایطی ایجاد می‌شود که وسایل نقلیه کند با اختلاف سرعت کمی از موانع اصلی عبور و مرور محسوب می‌شوند. این قسمت از مدل بدون تغییر از مدل قدیمی باقی مانده است.

تغییر مسیر از راه دور[5]: در حال اجرا می‌توان شبیه‌سازی‌های SUMO را با استفاده از رابطی به نام TraCI (رابط کنترل ترافیک) توسط برنامه‌های خارجی کنترل کرد. از جمله مواردی که می‌توان کنترل کرد، انتخاب خط بین خطوط موجود برای هر وسیله نقلیه است. درخواست‌های خارجی برای تغییر به یک خط هدف یا حفظ خط فعلی باید با درخواست‌های "داخلی" محاسبه شده توسط مدل تغییر دهنده خط تلفیق شود.

بر همین اساس در نرم‌افزار SUMO دو مدل تغییر خط LC2013 و

1 Strategic lane changing
2 Dead lane
3 Cooperative lane-changing
4 Tactical lane-changing
5 Remote controlled lane-changing (TraCI)

جدول ۴. پارامترهای تعقیب خودرو برای سه نوع خودرو موجود در شبیه‌سازی.

Table 4. Car following model parameters for the three types of vehicles in the simulation.

نوع وسیله نقلیه			
خودرو خودران و متصل	خودرو خودران	خودرو عادی	پارامترهای تعقیب خودرو
۳/۹	۳/۸	۳/۵	**Accel**
۴/۵	۰/۵	۴/۵	**Decel**
۸	۸	۸	**Emergency Decel**
۰	۰	۰/۵	**Sigma**
۰/۵	۰/۶	۰/۹	**Tau**
۰/۵	۰/۵	۱/۵	**mingap**

LC2015 توسعه داده شده است. برای ایجاد تغییر خط در شبیه‌سازی و در این مطالعه از مدل تغییر خط LC2013 استفاده شده است که پارامترهای این تغییر خط در این بخش مورد بررسی قرار داده خواهد شد. بعد از اجرای شبیه‌سازی نیاز به داده‌های خروجی مورد نیاز جهت بررسی و تحلیل نتایج مورد نظر می‌باشد [۱۸]. در این مطالعه از مدل تعقیب خودرو کرواس استفاده شده است و در این بخش مقادیر پارامترهای این مدل معرفی می‌شوند. بر همین اساس در جدول ۴ پارامترهای تعقیب خودرو برای خودروهای عادی، خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل معرفی شده است و شبیه‌سازی بر اساس این مقادیر صورت گرفته است. در این مقادیر برای ایجاد ایمنی بین وسایل نقلیه مقادیر Decel و Emergency Decel برای خودروهای عادی، خودران و خودران و متصل یکسان در نظر گرفته شده است. بر اساس جدول ۴ مشخص می‌شود که ۴ پارامتر تغییرات را مشخص می‌کنند. پارامتر اول Accel می‌باشد که توانایی شتاب‌گیری وسایل نقلیه می‌باشد و مقادیر نشان می‌دهد که خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل توانایی بیشتری در شتاب‌گیری دارند. پارامتر بعدی sigma می‌باشد که نشان دهنده نقص راننده است و با توجه به خودران بودن خودروها این پارامتر باید برای خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل برابر صفر باشد. پارامتر tau سرفاصله زمانی مورد نظر راننده است که بر اساس بسیاری از مطالعات خودروهای خودران توانایی ایجاد سرفاصله زمانی کمتر را دارند و همچنین خودروهای خودران و متصل به دلیل ویژگی اتصال از این لحاظ از خودروهای خودران نیز بهتر عمل می‌کنند. پارامتر آخر حداقل فاصله خودروها است که برای خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل این مقدار حداقل مقدار برای ایجاد ایمنی است و از این لحاظ از خودروهای عادی بهتر عمل می‌کنند.

همانطور که در جدول ۴ مشخص شده است مقادیر پارامترهای تعقیب خودرو برای هر نوع وسیله نقلیه مشخص شده است. برای تعیین پارامترهای تعقیب خودرو خودروهای عادی و خودروهای خودران از مطالعه [۱۰] استفاده شده است که در مطالعه [۱۰] پارامترهای تعیین شده برای خودروهای عادی و خودروهای خودران مطابق با مدل تعقیب خودرو کراوس است و در این پژوهش نیز از این پارامترها بر اساس مدل کراوس استفاده شده است. برای تعیین پارامترهای خودروهای خودران و متصل از چندین مطالعه استفاده شده است. برای تعیین پارامترهای Accel,Decel,Tau,mingap از مطالعه [۴] استفاده شده است که در این مطالعه خودروها به ۹ دسته تقسیم شده‌اند و در این پژوهش از دسته ۹ برای تعیین پارامترهای ذکر شده استفاده شده است که دسته ۹ نشان دهنده خودروهای خودران و متصل است. اما در مطالعه [۴] به دلیل اینکه از مدل تعقیب خودرو کراوس استفاده نشده است اطلاعاتی در مورد Emergency Decel و sigma در دسترس نیست. برای تعیین پارامتر Emergency Decel مطالعه [۱۰] پیشنهاد می‌دهد که برای حفظ ایمنی بین خودروها این پارامتر برای تمام خودروها یکسان در نظر گرفته شود و بنابراین این پارامتر برای خودروهای خودران و متصل برابر با خودروهای عادی و خودران در نظر گرفته می شود. برای تعیین پارامتر sigma از مطالعه [۱۹] استفاده شده است که این مطالعه پیشنهاد می‌دهد که این پارامتر برای خودروهای خودران و متصل صفر در نظر گرفته شود زیرا خودروهای خودران و متصل از نقص راننده برخوردار نیستند.

همان‌طور که بیان شد در این مطالعه از مدل LC2013 برای شبیه‌سازی رفتار تغییر خط خودروها استفاده شده است. برای تعیین

شکل ۱. شبکه آزادراه با قسمت Merge

Fig. 1. Freeway network with Merge section

پارامترهای تغییر خط از مطالعه TransAID استفاده شده است [۲۱] که بر اساس شبیه‌سازی‌های مختلف تحلیل حساسیت برای پارامترهای مختلف مدل تغییر خط انجام داده شده است. در این تحلیل مهم‌ترین پارامتر که تأثیر زیادی در رفتار تغییر خط دارد پارامتر lcAssertive می‌باشد که مقادیر پایین آن به معنی تمایل بیشتر به پذیرش کاهش gap می‌باشد. بنابراین بر همین اساس تنها پارامتری که از مدل LC2013 بین سه نوع متخلف خودرو تغییر می‌کند پارامتر lcAssertive می‌باشد. بر اساس مطالعه [۲۱] مقدار این پارامتر برای خودروهای عادی ۱/۳، برای خودروهای خودران ۰/۹ و بر اساس مطالعه [۲۰] مقدار این پارامتر برای خودروهای خودران و متصل ۰/۷ می‌باشد.

۳- ۳- شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد استفاده در این شبیه‌سازی‌ها شبکه آزادراه با قسمت Merge ۱/۹۵ کیلومتری می‌باشد. این آزادراه چهار خطه می‌باشد که حداکثر سرعت در این آزادراه ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. در این شبیه‌سازی‌ها از خودروهای خودران در مقایسه با خودروهای معمولی و خودروهای خودران و متصل در مقایسه با خودروهای عادی استفاده شده است. نرخ نفوذهای خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است و به طور کلی ۲۲ شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است تا نتایج به دست بیاید.

۴- نتایج

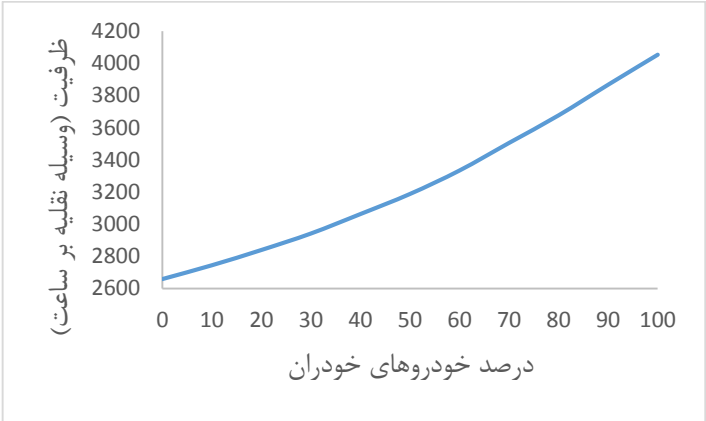
در این قسمت نتایج مربوط به شبیه‌سازی در نرم‌افزار شبیه‌ساز SUMO بررسی می‌شود. بر اساس مدل تعقیب خودرو و مدل تغییر خط و با استفاده از پارامترهای این مدل تفاوت بین رفتار رانندگی هر سه نوع وسیله نقلیه مشخص شده است. در کل ۲۲ سناریو در نظر گرفته شده است ۱۱ سناریو برای تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت و ۱۱ سناریو برای تأثیر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت در نظر گرفته شده است. در هر سناریو درصد نفوذ خودروهای خودران و یا خودروهای خودران و متصل ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. ابتدا نتایج به دست آمده در مورد تأثیر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت راه‌ها بررسی می‌شود. در جدول ۵ نتایج شبیه‌سازی‌ها مشخص شده است و همچنین در شکل ۲ تغییر در ظرفیت برای هر درصد نفوذ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۵ که نتایج اثر خودروهای خودران بر ظرفیت شبکه آزادراه را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که خودروهای خودران دارای این پتانسیل هستند که ظرفیت شبکه آزادراه را تا ۵۲/۵ درصد افزایش دهند و ظرفیت آن را از ۲۶۵۷ وسیله نقلیه بر ساعت بر خط به ۴۰۵۴ وسیله نقلیه بر ساعت بر خط افزایش دهند که این نتایج نشان می‌دهد که خودروهای خودران می‌توانند پاسخی مناسب به مسئله ازدحام راه‌ها باشند. از سوی دیگر باید توجه کرد که خودروهای خودران اثر چشمگیر خود را زمانی نشان می‌دهند که درصد حضورشان در جاده قابل‌ملاحظه باشد و همان‌طور که

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی‌های اثر خودروهای خودران بر شبکه آزادراه برای یک خط

Table 5. Results of simulations of the effect of Autonomous Vehicles on the freeway network for one line

درصد نفوذ خودروهای خودران	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
ظرفیت (veh/hr/lane)	۲۶۵۷	۲۷۴۴	۲۸۴۰	۲۹۴۲	۳۰۶۳	۳۱۸۸	۳۳۳۴	۳۵۰۵	۳۶۷۷	۳۸۶۸	۴۰۵۴
درصد تغییر ظرفیت	۰	۳/۲۳	۶/۸۱	۱۰/۶۷	۱۵/۲۲	۱۹/۹۲	۲۵/۴۱	۳۱/۸۶	۳۸/۳۲	۴۵/۴۸	۵۲/۵۰



شکل ۲. تأثیر خودروهای خودران بر ظرفیت آزادراه

Fig. 2. Impact of Autonomous Vehicles on freeway capacity

از جدول ۵ مشخص است تغییر در ظرفیت با عبور درصد نفوذ خودروهای خودران از ۵۰ درصد شتاب زیادی می‌گیرد.

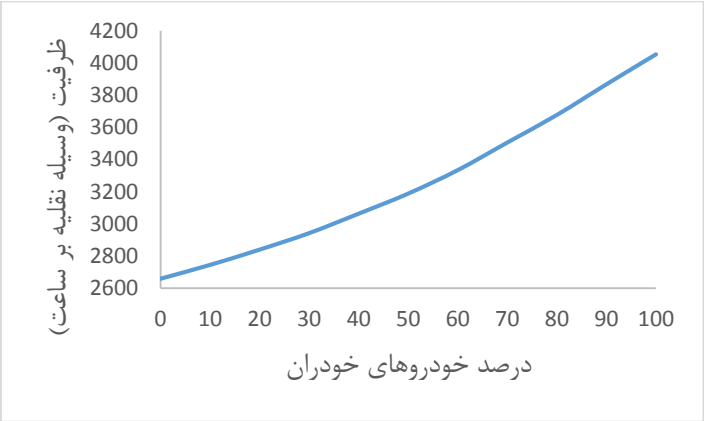
در این بخش، پس از تعیین تأثیر خودروهای خودران نتایج تأثیر خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت آزادراه مشخص می‌شود. جدول ۶ و شکل ۳ تغییرات در ظرفیت راه در اثر حضور خودروهای خودران و متصل را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که خودروهای خودران و متصل می‌تواند ظرفیت آزادراه را تا ۶۵/۳۷ درصد افزایش دهد و این تغییر در ظرفیت نشان می‌دهد خودروهای خودران و متصل به دلیل ویژگی خودرانی و اتصال می‌توانند ظرفیت راه‌ها را به حد مطلوبی افزایش دهند که این افزایش حتی نسبت به خودروهای خودران نیز بیشتر است و می‌توان مانند خودروهای خودران، خودروهای خودران و متصل را پاسخی به مسئله ازدحام دانست. اما همانند خودروهای خودران این خودروها نیز زمانی می‌توانند ظرفیت را به طرز چشمگیری افزایش دهند که درصد نفوذ آن‌ها بالا باشد و این تغییر با شتاب بالا را در درصدهای نفوذ بالای ۵۰ درصد می‌توان مشاهده کرد.

در این بخش، با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که خودروهای خودران و متصل و خودروهای خودران می‌توانند ازدحام راه‌ها را کاهش داده و ظرفیت راه‌ها را افزایش دهند. شکل ۴ مقایسه‌ای بین میزان تغییری که در اثر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل ایجاد می‌شود را نمایش می‌دهد که به صورت واضح نشان می‌دهد این دو نوع خودرو این پتانسیل و توانایی را دارند که مشکل ازدحام تا حدی مطلوب کاهش دهند. از طرف دیگر این شکل نشان می‌دهد که خودروهای خودران و متصل به دلیل ویژگی اتصال بین خودروها ظرفیت آزادراه را حتی نسبت به خودروهای خودران بیشتر افزایش می‌دهند که این خود اهمیت اتصال بین خودروها را نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی‌های اثر خودروهای خودران و متصل بر شبکه آزادراه

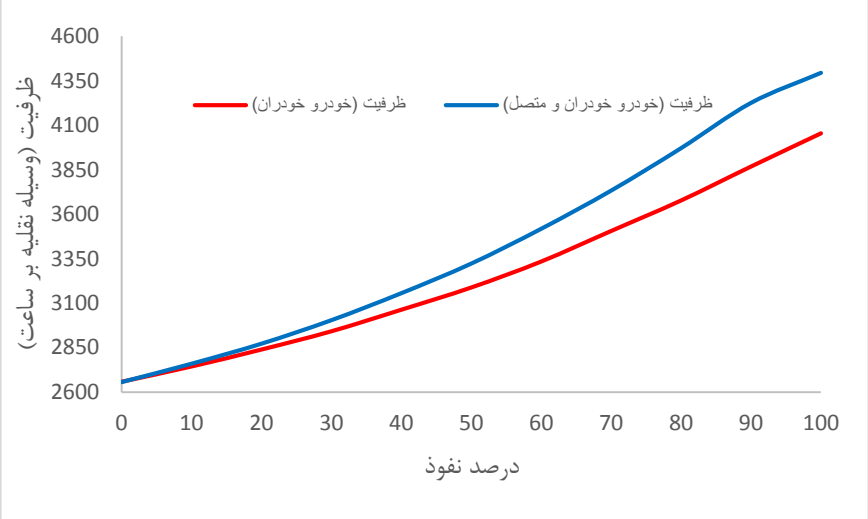
Table 6. Results of simulations of the effect of Connected and Automated Vehicles on the freeway network

درصد نفوذ خودروهای خودران و متصل	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
ظرفیت (veh/hr/lane)	۲۶۵۷	۲۷۶۰	۲۸۷۳	۳۰۰۵	۳۱۵۶	۳۳۲۳	۳۵۱۸	۳۷۳۳	۳۹۷۱	۴۲۲۵	۴۳۹۴
درصد تغییر ظرفیت	۰	۳/۸۸	۸/۱۲	۱۳/۰۸	۱۸/۷۹	۲۵/۰۵	۳۲/۴۰	۴۰/۴۸	۴۹/۴۵	۵۹/۰۲	۶۵/۳۷



شکل ۳. تغییر ظرفیت آزادراه ناشی از حضور خودروهای خودران و متصل

Fig. 3. Change in freeway capacity due to the presence of Connected and Automated Vehicles



شکل ۴. مقایسه میزان تأثیر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت آزادراه

Fig. 4. Comparison of the impact of Autonomous Vehicles and Connected and Automated Vehicles on freeway capacity

۵- نتیجه‌گیری

بسیاری از کشورها درگیر مسئله بزرگ ترافیکی به نام ازدحام هستند که این مشکل را می‌تواند ریشه بسیاری از مشکلات دیگر در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل باشد. به همین دلیل محققان به دنبال راهکارهای نوآورانه‌ای هستند تا مشکل ازدحام را کاهش دهند. انتظار می‌رود که پاسخ مسئله ازدحام را می‌توان در ظهور فنّاوری‌هایی به اسم خودروهای خودران و متصل جست‌وجو کرد. به همین دلیل در این مطالعه تأثیر خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل بر ظرفیت راه‌ها بررسی شده است. در این مطالعه از شبکه آزادراه با قسمت Merge استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های این مطالعه بر اساس شبیه‌سازی‌های خردنگر در نرم‌افزار شبیه‌ساز SUMO انجام گرفته است. مبنای این شبیه‌سازی‌ها مدل تعقیب خودرو و مدل تغییر خط می‌باشد. در این مطالعه از مدل تعقیب خودرو کرواس و مدل تغییر خط LC2013 استفاده شده است تا رفتار خودروهای عادی، خودران و خودران و متصل در محیط شبیه‌ساز پیاده‌سازی شود. در این مطالعه از ۲۲ سناریو استفاده شده است که ۱۱ سناریو سهم خودروهای خودران در مقابل خودروهای عادی و ۱۱ سناریو سهم خودروهای خودران و متصل در مقابل خودروهای عادی می‌باشد و در هر سناریو درصد نفوذ خودروهای خودران ۱۰ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که خودروهای خودران می‌توانند ظرفیت آزادراه را تا ۵۲/۵۰ درصد افزایش دهند که افزایش چشمگیر این خودروها زمانی که حضور این خودروها در جاده بالای ۵۰ درصد باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که خودروهای خودران و متصل نیز می‌توانند ظرفیت آزادراه را ۶۵/۳۷ درصد افزایش دهند که این مقدار حتی از تأثیر خودروهای خودران بیشتر است به دلیل اینکه خودروهای خودران و متصل از ویژگی اتصال بهره‌مند هستند. همانند خودروهای خودران تأثیر خودروهای خودران و متصل زمانی چشمگیر می‌شود که حضور این نوع خودروها در جاده‌ها بیش از ۵۰ درصد باشد. به طورکلی نتایج نشان می‌دهد که خودروهای خودران و خودروهای خودران و متصل پتانسیل بالایی برای کاهش ازدحام و افزایش ظرفیت دارند و می‌توانند در جهت بهبود شرایط ترافیکی مؤثر واقع شوند.

منابع

[1] J.-P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack, The geography of transport systems, Routledge, 2016.

[2] T. Niels, M. Erciyas, K. Bogenberger, Impact of connected and autonomous vehicles on the capacity of signalized intersections–Microsimulation of an intersection in Munich, (2018).

[3] SAE, Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles, SAE, 2016.

[4] Atkins, Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow, Department for Transport, 2016.

[5] B. Friedrich, The effect of autonomous vehicles on traffic, in: Autonomous Driving, Springer, 2016, pp. 317-334.

[6] M. Hartmann, N. Motamedidehkordi, S. Krause, S. Hoffmann, P. Vortisch, F. Busch, Impact of automated vehicles on capacity of the German freeway network, in: ITS World Congress, 2017.

[7] A. Olia, S. Razavi, B. Abdulhai, H. Abdelgawad, Traffic capacity implications of automated vehicles mixed with regular vehicles, Journal of Intelligent Transportation Systems, 22(3) (2018) 244-262.

[8] Q. Lu, T. Tettamanti, I. Varga, Impacts of autonomous vehicles on the urban fundamental diagram, (2018).

[9] G. Tilg, K. Yang, M. Menendez, Evaluating the effects of automated vehicle technology on the capacity of freeway weaving sections, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 96 (2018) 3-21.

[10] Q. Lu, T. Tettamanti, D. Hörcher, I. Varga, The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation, Transportation Letters, 12(8) (2020) 540-549.

[11] A. Ghiasi, O. Hussain, Z.S. Qian, X. Li, A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: A Markov chain method, Transportation Research Part B: Methodological, 106 (2017) 266-292.

[12] P. Liu, W. Fan, Exploring the impact of connected and autonomous vehicles on freeway capacity using a revised Intelligent Driver Model, Transportation planning and technology, 43(3) (2020) 279-292.

[13] Q. Wang, B. Li, Z. Li, L. Li, Effect of connected

automated driving on traffic capacity, in: 2017 Chinese Automation Congress (CAC), IEEE, 2017, pp. 633-637.

[14] J. Song, Y. Wu, Z. Xu, X. Lin, Research on car-following model based on SUMO, in: The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology, IEEE, 2014, pp. 47-55.

[15] M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing, Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, Physical review E, 62(2) (2000) 1805.

[16] G.F. Newell, A simplified car-following theory: a lower order model, Transportation Research Part B: Methodological, 36(3) (2002) 195-205.

[17] P.G. Gipps, A behavioural car-following model for computer simulation, Transportation Research Part B: Methodological, 15(2) (1981) 105-111.

[18] J. Erdmann, SUMO's lane-changing model, in: Modeling Mobility with Open Data, Springer, 2015, pp. 105-123.

[19] B. Maximcsuk, Q. Lu, T. Tettamanti, Determining Maximum Achievable Flows of Autonomous Vehicles Based on Macroscopic Fundamental Diagram, Perners Contacts, Special, (2).

[20] L. Lücken, E. Mintsis, N.P. Kallirroi, R. Alms, Y.-P. Flötteröd, D. Koutras, From automated to manual-modeling control transitions with SUMO, (2019).

[21] E. Mintsis, D. Koutras, K. Porfyri, E. Mitsakis, L. Luecken, J. Erdmann, Y. Floetteroed, R. Alms, M. Rondinone, S. Maerivoet, Modelling, simulation and assessment of vehicle automations and automated vehicles' driver behaviour in mixed traffic, TransAID Deliverable, 3 (2018) 1.

[22] K. Buchholz, How has the world's urban population changed from 1950 to today?, in, World Economic Forum, 2020.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Saberi Varzaneh, M. Naderi, Using "twist-off" and "pull-off" tests to investigate the effect of polypropylene fibers on the bond of mortar/concrete and to evaluate their in-situ compressive strength, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 1691-1704.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19811.7261

این صفحه عمداً خالی است