سناریوسازی نرخ نفوذ خودرو خودران اشتراکی، یک تحلیل کمی زیست محیطی

علی رحمانی[۱]، امیررضا ممدوحی[۲*]

۱- دانشجو کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- alirahmani@modares.ac.ir

۲- armamdoohi@modares.ac.ir

چکیده:

در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۱۹ غلظت آلاینده‌های هوای شهرهای ایران به‌طور متوسط ۳۵ درصد افزایش یافته است. حمل‌ونقل یکی از منابع اصلی ایجاد آلودگی هوا در کلان‌شهرها است. درحالی که با افزایش جمعیت نیاز به حمل‌ونقل بیشتر می‌شود. از راهکارهای کاهش نقش حمل‌ونقل در ایجاد آلودگی، می‌توان به شیوه‌سفرهای جایگزین اشاره کرد که از لحاظ تولید آلاینده‌های زیست محیطی عملکرد بهتری داشته باشند. خودروهای خودران اشتراکی با توجه به پتانسیلی که دارند قادر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. اما تخمین اثرات این شیوه‌سفر به‌دلیل وجود مولفه‌های رقابتی فراوان، دشوار است. هدف این مطالعه یک تحلیل کمی زیست محیطی بر حضور خودرو خودران اشتراکی در بخشی از شهر تهران بر مبنای شبیه‌سازی است که در سناریوهای مختلف انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که سرویس‌دهی همزمان به دو کاربر در مقایسه با دیگر سناریوهای اشتراک، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا حدود ۱۰ درصد کاهش می‌دهد. اما، افزایش اندازه ناوگان با افزایش تراکم، اثرات زیست محیطی حمل‌ونقل را پر رنگتر می‌کند. نرخ نفوذ تاثیر چشم‌گیری دارد به‌طوری که در نرخ نفوذ ۱۰۰ درصد، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به صفر میل می‌کند.

واژگان کلیدی:

شبیه‌سازی خودرو خودران اشتراکی، اشتراک سواری، خودرو الکتریکی، آلاینده‌های زیست محیطی، حمل‌ونقل هوشمند.

* امیررضا ممدوحی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس.

ایمیل: armamdoohi@modares.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

ویراستاری نشده

Scenario creation of Shared Autonomous Vehicles Penetration Rate, a Quantitative Environmental Analysis

A.Rahmani [۱], A.R.Mamdoohi [۲]

۱- Master's student transportation planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

۲- Associate Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract:

In ۲۰۲۲, the air pollution levels in Iranian cities increased by an average of ۳۵٪ compared to ۲۰۱۹, which is concerning considering the growing transportation needs due to population growth. However, alternative travel methods with better environmental performance can help reduce the role of transportation in creating pollution.

One potential solution is the use of shared autonomous vehicles, which have the potential to significantly reduce greenhouse gas emissions. However, estimating the exact effects of this travel method on climate change can be challenging due to various factors that come into play.

To address this issue, a study was conducted using the SUMO software and random travel demand to quantitatively analysis the environmental impact of shared autonomous vehicles in a specific section of Tehran city. The analysis considered different scenarios related to the penetration rate, fleet size, and sharing policies.

Simulation-based approaches were employed to assess the environmental impact, with a particular focus on greenhouse gas emissions. The results of the study indicated that simultaneous service to two users, compared to other sharing scenarios, can reduce greenhouse gas emissions by up to ۱۰٪. This suggests that efficient sharing policies can have a positive impact on the environment.

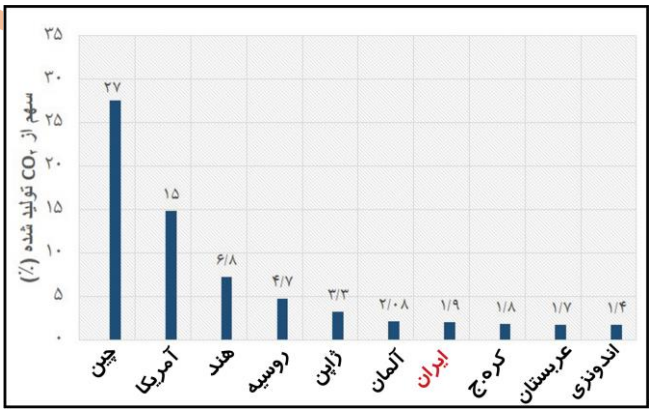
Moreover, the study found that in scenarios where both autonomous car-sharing and private car modes exist, increasing the fleet size of shared autonomous vehicles can lead to increased congestion, resulting in higher pollutant emissions. Additionally, the penetration rate of these vehicles is crucial, as a penetration rate of ۱۰۰٪ tends to result in almost zero greenhouse gas emissions. Regarding the impact of the fleet size of shared autonomous vehicles on fuel consumption, it can be said that increasing the fleet size in scenarios where both modes exist would lead to an increase in fossil fuel consumption and a decrease in electric fuel consumption.

Overall, this study highlights the potential environmental benefits of shared autonomous vehicles in reducing greenhouse gas emissions. By implementing efficient sharing policies, increasing fleet size and density, and aiming for high penetration rates, we can strive towards a greener and more sustainable transportation system.

Keywords: Simulation of Shared Autonomous Vehicles (SAV), Ride-Sharing, Electric Cars, Environmental Pollutants, Intelligent Transportation.

۱ ــ مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌ای سایه‌ای تاریکتر از همیشه بر آینده زمین و زمینی‌ها کشیده است. آلودگی هوا همچنان به عنوان بزرگترین تهدید بهداشتی محیطی در جهان شناخته می‌شود. در سراسر جهان، کیفیت نامناسب هوا، به مجموع ۹۳ میلیارد روز زندگی بیماری و حدود ۶ تا ۹ میلیون مرگ در هر سال منجر می‌شود که کشورهای کمتر توسعه یافته و با متوسط درامد پایین، ۹۰ درصد تلفات جانی را به خود اختصاص می‌دهند [۲][۱]. هزینه اقتصادی کلی بالغ بر ۸ تریلیون دلار است، که بیش از ۶/۱ درصد از تولید ناخالص داخلی جهان را شامل می‌شود. افزایش آلودگی هوا بروز و تشدید بسیاری از بیماری‌ها مانند آسم، سرطان، بیماری‌های ریه، بیماری‌های قلبی و عروقی و مرگ زودرس را به دنبال دارد [۳]. در بین ۱۰ کشور اول تولید کننده دی اکسید کربن، درحالی نام ایران با سهم ۱/۹ درصدی به چشم می‌آید، که سایر کشورهای موجود در این گروه‌بندی جزو کشورهای پر جمعیت و یا توسعه یافته محسوب می‌شوند [۴]. شکل ۱ سهم هریک از این کشورها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: سهم ۱۰ کشور اول تولید کننده CO_2 در جهان[۴]

گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی شده‌اند. این تغییرات شامل افزایش دمای هوا، بالا رفتن سطح دریا، اسیدی شدن آب اقیانوس‌ها، کاهش تعداد گونه‌های حیاتی و تخریب جنگل‌ها و منابع طبیعی دیگر است. برای مقابله با این مشکل، به اقدامات جدی و هماهنگ در سطح جهانی و ملی نیاز است [۵].

حمل‌ونقل به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تولیدکننده گازهای گلخانه‌ای، در سال ۲۰۱۴ سهمی ۲۶ درصدی در تولید این نوع گازها در ایالات متحده آمریکا داشته است [۶]. در حالی که به‌طور پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۵۰، تعداد خودروها دو برابر می‌شود. اما خودروهای الکتریکی، با امکان کاهش میزان آلودگی ناشی از حمل‌ونقل، به عنوان یک جایگزین پایدار برای خودروهای سنتی مطرح هستند که قادراند آینده نه‌چندان روشن زمین از نگاه زیست محیطی را تغییر دهند [۷]. انتظار می‌رود افزایش استفاده از خودروهای الکتریکی و ترکیب آن با شیوه سفرهای اشتراکی، که نسبت به سیستم حمل‌ونقل همگانی منعطف‌تر و در مقابل خودروهای شخصی ارزانتر است، تاثیرات مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد [۸]. اما از مولفه‌های اساسی که در تعیین اثر این شیوه سفر نقشی اساسی دارد، میزان پذیرش است. پذیرشی که به دانش کاربر و آگاهی او از مطلوبیت‌های نهفته خودرو الکتریکی و عواملی مانند در دسترس نبودن محل شارژ، کند بودن شارژ، عدم اطمینان به تکنولوژی و اضطراب محدوده[۲] (نگرانی کاربر برای سرگردان شدن با باتری خالی و بدون گزینه شارژ مجدد) بستگی دارد [۹]. با اینحال می‌توان گفت همزمان با افزایش سهم خودروهای الکتریکی از ناوگان خودروهای شخصی، راه برای ورودشان به ناوگان خودروهای اشتراکی هم باز می‌شود؛ زیرا کاربران خودروهای اشتراکی به استفاده از خودرو کوچکتر با مصرف بهینه سوخت تمایل دارند [۸]. ادغام خودروهای الکتریکی با دو شیوه‌حرکت نوظهور دیگر، خودروخودران و سیستم‌های اشتراکی درخواستی[۳]، شیوه‌سفر جدیدی را تحت عنوان خودروخودران اشتراکی (خوخا) [۴]بوجود آورده است که می‌تولند موانع پذیرش خودروهای الکتریکی بخصوص اضطراب محدوده را کم رنگ کند و معرفی شیوه سفری قابل رقابت با خودرو شخصی اما کاراتر را به واقعیت تبدیل کند [۷].

---

[۱] Range anxiety
[۲] On-demand shared systems
[۴] Shared Autonomous Vehicles (SAVs)

با معرفی خوخا یکی از عمیق‌ترین تحولات تاریخ حمل‌ونقل رقم می‌خورد. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ با تعیین مقررات استفاده از خودروهای خودران ۹۵ درصد از مسافر کیلومتر طی شده در آمریکا، توسط خودروهای خودران الکتریکی انجام شود. این امر موجب ایجاد پیامدهای فراوانی در زمینه حمل‌ونقل و بازار نفت جهانی می‌شود و زنجیره ارزش را دگرگون خواهد کرد [۱۰]. تغییراتی که قبل از اتفاق نیاز به تحلیل و بررسی دارند.

۲-مروری بر ادبیات

معابر شهری اهمیت انکار نشدنی در دنیای مدرن دارند ضمن اینکه کانونی برای ایجاد ازدحام و منبعی برای انتشار آلاینده‌های زیست محیطی هستند. راه‌کارهای فراوانی برای کاهش این اثرات پیشنهاد شده است. راه‌حل‌هایی که بیش‌تر در سطح وسیله‌نقلیه متمرکز هستند؛ مانند بهبود مصرف سوخت با کارآمدتر کردن موتور و یا تغییر سوخت مورد استفاده به جایگزین‌های کم کربن (الکتریسیته). اما راه‌حل‌هایی که در سطح سیستم اعمال شوندکمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. درحالی که سیستم‌های ناکارآمد، تاثیر بسیاری در مصرف انرژی و میزان انتشار آلاینده‌ها دارند [۶]. بر اساس مطالعات ملی سفرهای خانه‌مبنا[۵] در ایالات متحده آمریکا، سطح اشغال خودرو برای سفرهای خانه‌مبنا به‌طور میانگین ۱/۶ نفر در هر وسیله‌نقلیه است. این میزان اشغال خودرو با ظرفیت واقعی آن تفاوت زیادی دارد و نشانه‌ای از حضور پر رنگ خودروهای تک سرنشین در شبکه حمل‌ونقل است [۱۱]. شیوه‌سفر اشتراکی با حذف مالکیت خودرو و تخصیص یک خودرو به چند کاربر می‌تواند نرخ اشغال خودروها را بیشتر کند و با بهبود ازدحام، مصرف انرژی و میزان انتشار را کاهش دهد [۱۲]. هرچند در ارتباط با مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای فرض الکتریکی بودن خودرو عاملی تعیین کننده است [۱۳]. در غیر اینصورت اگر ناوگان از سوخت‌های فسیلی استفاده کند افزایش وسیله کیلومتر طی شده می‌تواند هرگونه پیشرفت کارایی ناشی از اشتراک را خنثی کند [۱۴]. هرچند شوپ [۱۵] معتقد است حدود ۳۰ درصد از سفرهایی که در نواحی مرکزی شهرها انجام می‌شود، سفرهایی هستند که مجبوراند زمان زیادی را به دنبال پارکینگ بگردند. استفاده از خودروهای خودران با حذف نیاز به پارکینگ و همچنین با رانندگی روان و هوشمندانه‌تر نسبت به خودروهای شخصی، می‌تواند باعث کاهش تصادفات و کاهش ازدحام در نواحی مرکزی شهرها شود. این ملاحظات، پتانسیل قابل توجهی را برای صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی و کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها در نواحی مرکزی شهرها دارد [۱۶]. با توجه به مطالعات پیشین، شیوه‌های سفر اشتراکی، الکتریکی و خودران می‌توانند به کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در حمل‌ونقل شهری کمک کنند. اما خوخا، به عنوان یک شیوه تلفیقی از این سه شیوه، می‌تواند بهبود قابل توجهی در مصرف انرژی و میزان انتشار در شهرها ایجاد کند. لوخاندولا و کای [۶] نشان می‌دهند اثر کاهشی خوخا بر میزان انتشار به دارا بودن اشتراک سواری[۶] (اختصاص دادن یک خوخا به چند کاربر که دارای مبدا و مقصد یکسان یا نزدیک به هم هستند) بستگی دارد. لیبویچ و جونز [۱۷] زمانی که خوخا با نرخ نفوذ ۷۰ درصد جایگزین خودرو شخصی می‌شود به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دست یافتند، هرچند وسیله کیلومتر طی شده با افزایش همراه بود. سالزار و همکاران [۱۸] با ادغام خوخا و حمل‌ونقل همگانی، نشان می‌دهند که حضور خوخا می‌تواند به کاهش ترافیک و هزینه‌های حمل‌ونقل کمک کند و همچنین به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود. اما باید توجه داشت که اثرات کاهشی خوخا بر میزان انتشار آلاینده‌ها و صرفه‌جویی در سوخت، برای دوره کوتاه مدت قابل رؤیت هستند و اثرات آن در دراز مدت نامعلوم است [۱۹]. در خصوص خودرو خودران، چه اشتراکی و چه شخصی، مطالعات کمی در ایران صورت گرفته است که بیشتر حول پذیرش و تاثیر بر انتخاب شیوه سفر [۲۰]، مفاهیم کلی خودرو خودران [۲۱] هستند و یا بر پارامترهایی مانند ظرفیت [۲۲] و یا وسیله کیلومتر طی شده [۲۳] تمرکز دارند و به اثرات زیست محیطی این شیوه سفر توجه کمتری شده است. این در حالی است که براساس آمار آی‌کیوایر [۲۴] میزان متوسط غلظت آلاینده‌های هوای ایران در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۱۹ با ۳۵درصد افزایش همراه بوده است. تغییر این روند نیازمند معرفی شیوه‌سفرهایی است که از

[۵] national household travel survey (NHTS)

[۶] ride–sharing

لحاظ تولید میزان آلاینده‌های زیست محیطی عملکرد بهینه‌تر و از لحاظ مطلوبیت، قابل رقابت باخودرو شخصی باشند.

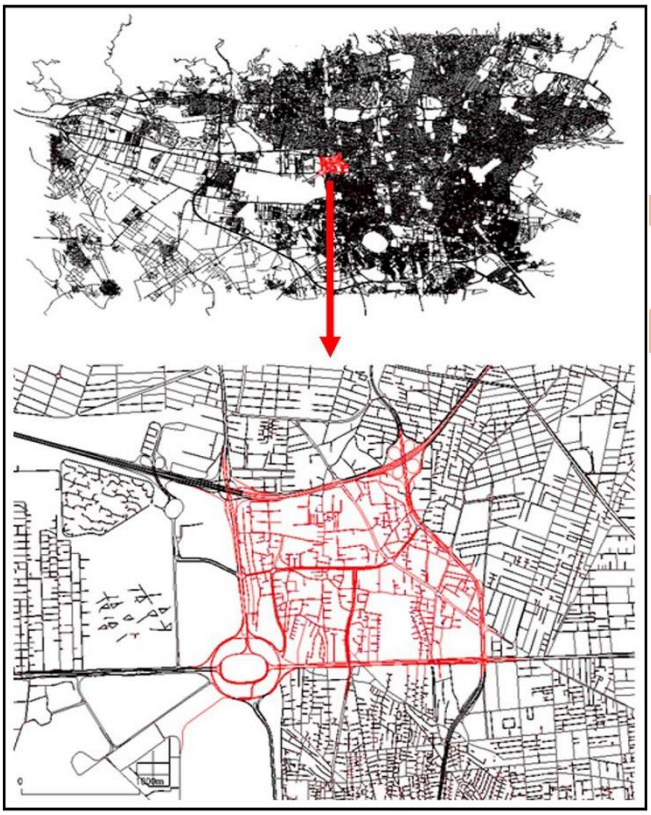
با توجه به اهمیت موضوع مطالعات گوناگون با در نظر گرفتن ابعاد مختلف مسئله انجام شده است که در این بخش به تعدادی از آن‌ها اشاره شد. در این مطالعه علاوه بر سناریوهایی چون نرخ نفوذ و اندازه ناوگان، با در نظر گرفتن ۳ سیاست اشتراک گذاری خودرو (که کمتر مورد توجه قرار گرفته است)، حضور خوخا در شبکه بصورت کمّی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین، خودروهای خودران اشتراکی، کمتر در ایران مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. این مطالعه با در نظرگرفتن بخشی از شبکه تهران، سعی بر پرکردن خلا موجود دارد.

۳- چارچوب مطالعه

ادبیات موضوع به‌طور واضح جهت تاثیر خودروهای خودران بر شرایط ترافیکی را نشان می‌دهد. با این حال، گستردگی و ابعاد نسبی خودروهای خودران اشتراکی و همچنین وابستگی این تأثیرات به عوامل موقعیتی مختلف و اجرای خاص فناوری‌ها نیازمند ابزارهای تحلیلی پیشرفته‌تر است. برای ارزیابی تاثیر خوخا که رفتار رانندگی را دگرگون می‌کند معمولا شبیه‌سازی خردنگر مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲۵]. به‌طور کلی مدل‌های شبیه‌سازی در حمل‌ونقل را می‌توان به سه دسته کلان‌نگر[۷]، میان‌نگر[۸] و خردنگر[۹] تقسیم کرد [۲۶]. مدل‌های کلان‌نگر توسط برنامه‌ریزان حمل‌ونقل برای مدیریت شبکه‌های ترافیکی در مقیاس بزرگ مانند بزرگراه‌ها، آزادراه‌ها، ازدحام ترافیک شهری، عملیات حمل‌ونقل انبوه و مدل‌های تقاضای سفر توسعه‌یافته و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرنددر مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر، رفتار همه خودروهای منفرد در هر مرحله زمانی شبیه‌سازی بر اساس جهت‌هایی که تعیین می‌شوند توسط مدل‌های تعقیب خودرو و تغییر خط، ثبت می‌شود. به این صورت که هر خودرو با توجه به موقعیت و سرعت خود و خودروهای اطرافش، تصمیم‌هایی برای تغییر خط یا حرکت به سمت یک خودرو دیگر می‌گیرد و این تصمیمات در مدل شبیه‌سازی ثبت می‌شوند. مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده شبکه خیابان‌های شهری، تقاطع‌ها، حرکات عابر پیاده، علائم ترافیکی، سیستم‌های چندوجهی[۱۰] به‌طور معمول در دسته مدل‌های خردنگر قرار می‌گیرند. در نهایت، مدل‌های میان‌نگر هر دو مدل شبیه‌سازی کلان و خردنگر را با هم ترکیب می‌کند. با این حال، در مقایسه با شبیه‌سازی خردنگر، اطلاعات بدست آمده در سطح خودرو از دقت کم‌تری برخوردار است. از مدل های میان‌نگر به‌طور معمول در تکنیک‌های تحلیل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل استفاده می‌شود [۱۷, ۱۸].

۳-۱- داده مربوط به تقاضا و محدوده مورد مطالعه

در این مطالعه بخشی از منطقه دو کلانشهر تهران (شکل ۲) که دارای ۶۲۵۴ لبه و ۳۳۴۳ گره است با استفاده از نرم‌افزارSUMO (یک نرم افزار خردنگر متن باز) شبیه‌سازی می‌شود. این شبکه با استفاده از پایگاه داده OpenStreetMap تعریف و در بازه زمانی ۲۵ دقیقه، ۶۵۰۰ سفر که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و زمان بین ورودها به شبکه دارای توزیع نمایی است شبیه‌سازی می‌شود.



[۷] macroscopic

[۸] mesoscopic

[۹] microscopic

[۱۰] multi-modal systems

شکل ۲: محدوده مورد مطالعه، بخشی از منطقه‌ی دو شهرداری تهران

۳-۲- شیوه‌سفرهای فرض شده

ویژگی‌های زیادی در تعریف یک شیوه‌سفر نقش دارند که تعدادی از آن ها که در این مطالعه می‌توانند مهم باشند در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

جدول ۱: ویژگی‌های مهم در تعریف شیوه سفر

ویژگی	پیش فرض	تعریف
accel	۲/۶	قابلیت شتاب در این شیوه حرکت ($\mathbf{m/s^2}$)
decel	۴/۵	قابلیت شتاب کاهشی در این شیوه حرکت ($\mathbf{m/s^2}$)
emergencyDecel	۹	حداکثر کاهش شتاب فیزیکی ممکن برای این شیوه حرکت ($\mathbf{m/s^2}$).
sigma	۰/۵	پارامتر مربوط به مدل تعقیب خودرو
tau	۱	پارامتر مربوط به مدل تعقیب خودرو
minGap	۲/۵	جای خالی بعد از خودرو پیشگام($\mathbf{m}$)
maxSpeed	۵۵/۵۵ (۲۰۰ km/h)	حداکثر سرعت (فنی) وسیله‌نقلیه ($\mathbf{m/s}$)
desiredMaxSpeed	۲۷/۷۸ (۱۰۰ km/h)	حداکثر سرعت مورد نظر وسیله‌نقلیه ($\mathbf{m/s}$)
emissionClass	PC_G_EU۴	یک کلاس انتشار. به‌طور پیش‌فرض از خودروی سواری بنزینی مطابق با استاندارد آلایندگی EURO۴ استفاده می‌شود.
carFollowModel	Krauss	مدل تعقیب خودرو مورد استفاده.
laneChangeModel	LC۲۰۱۳	مدل تغیر خط مورد استفاده.

کالیبراسیون پارامترهای ذکر شده در جدول ۱ مانند زمان واکنش راننده، متوسط سرعت خودروها، شتاب افزایشی و شتاب کاهشی، صورت گرفته اما به دلیل نزدیک بودن مقادیر کالیبره شده با برخی از مقادیر پیش‌فرض، ترجیح داده شد شبیه‌سازی برمبنای مقادیر پیش‌فرض انجام شود.

۳-۲-۱ مدل‌های رفتار رانندگی

منطق رانندگی بیان می‌کند که یک راننده در شرایط ترافیکی واقعی در دو جهت طولی و عرضی چگونه رفتار می‌کند. در جهت طولی، راننده با پذیرش شکاف مناسب، سرعت مطلوب و شتاب دلخواه از خودرو پیشرو پیروی می‌کند. به عبارت دیگر، راننده باید فاصله مناسبی را نسبت به خودروی پیشرو حفظ کند و با توجه به شرایط جاده و ترافیک، سرعت خود را تنظیم کند تا بتولند به راحتی و با امنیت مناسب به مقصد خود برسد. همچنین، راننده باید به دوراندیشی و پیش‌بینی احتمال وقوع موانع در جاده توجه کند و با توجه به شرایط، سرعت خود را تنظیم کند تا بتواند در صورت لزوم به سرعت کمتری برسد و از وقوع حوادث جلوگیری کند [۲۷]. رفتار تعقیب خودرو از طریق توزیع شتاب، فاصله‌های ایمن و زمان واکنش خودرو تعقیب‌کننده در شرایط ترافیکی متفاوت، توسط محققان زیادی توصیف شده است [۲۸]. نرم‌افزار مورد استفاده می‌تولند بر مبنای مدل‌های تعقیب گوناگونی از جمله مدل ویدمان، مدل راننده هوشمند، مدل کراوس شبیه‌سازی کند. در این مطالعه از دو مدل تعقیب خودرو برای توصیف حرکت‌های طولی استفاده می‌شود:

مدل کراوس: این مدل در سال ۱۹۹۷ بر مبنای سرعت ایمن خودرو تعقیب کننده ایجاد شده است. ایده اصلی تئوری تعقیب در این مدل وابستگی تغییر در سرعت وسیله‌نقلیه i به سرعت وسیله‌نقلیه پیشرو $i+1$، تفاوت موقعیت (شکاف) و پارامترهای استاتیک مانند حساسیت یا زمان واکنش است [۲۹]. مدل کراوس بر مبنای سرعت ایمن بنا شده است که از طریق رابطه ۱ تعیین می‌شود:

$$V_{safe} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)t_r}{\frac{v_l(t) - v_f(t)}{2b} + t_r} \qquad (1)$$

که در آن V_{safe} سرعت ایمن، $v_l(t)$ سرعت وسیله‌نقلیه پیشرو i در زمان t، t_r زمان واکنش، $g(t)$ شکاف بین دو خودرو در زمان t و b حداکثر کاهش سرعت خودرو برحسب متر بر مجذور ثانیه است. V_{safe} ممکن است از حد مجاز سرعت در جاده تجاوز کند.

این مدل، سرعت دیگری به نام سرعت مطلوب را توصیف می‌کند که برابر حداقل سرعت بین سرعت ایمن، حداکثر سرعت و سرعتی است که قابلیت‌های شتاب در محاسبه‌ی آن در نظر گرفته می‌شود[۳۰]. به عبارتی دیگر طبق رابطه ۲:

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

که در آن v_{des} سرعت مطلوب، $v_{\max}$ حداکثر سرعت و a متوسط شتاب است.

مدل ACC[۱۱] : یکی از کاربردهای سیستم‌های کمک راننده، سیستم‌های ACC هستند که با استفاده از حسگرهایی مانند رادار، لیدار یا دوربین‌های ویدئویی، قابلیت اندازه‌گیری فاصله و سرعت وسیله‌نقلیه پیشرو را دارا می‌باشند. در حضور وسیله‌نقلیه پیشرو، این سیستم‌ها با کنترل سرعت وسیله‌نقلیه بر اساس سرفاصله مطلوب، به راننده کمک می‌کنند تا به‌طور ایمن‌تر در جریان ترافیک حرکت کند. این سیستم‌ها در شرایط واقعی آزمایش شده و تاثیر آن‌ها بر جریان ترافیک مورد بررسی قرار گرفته است. اما اگر وسیله‌نقلیه پیشرو وجود نداشته باشد، سیستم ACC معیار کنترل سرعت را سرعت مطلوب کاربر در نظر می‌گیرد [۲۶].

مدل تعقیب خودرو در شرایط واقعی، با استفاده از داده‌های خودروهای خودران در سراسر دنیا توسعه داده شده است[۱۷, ۲۰]. این مدل از سه رویکرد کنترلی برای تعقیب خودرو استفاده می‌کند که عبارتند از:

کنترل سرعت: حالت کنترل سرعت در مدل تعقیب خودرو، برای حفظ سرعت از پیش تعریف شده (سرعت مطلوب) توسط راننده طراحی شده است. این حالت کنترل سرعت فقط زمانی فعال می‌شود که هیچ وسیله‌ی نقلیه‌ای در محدوده‌ی تحت پوشش سنسورها وجود نداشته باشد یا فاصله‌ی بین وسایل نقلیه بیش از ۱۲۰ متر باشد. در حالت کنترل سرعت، شتاب خودرو i در زمان $k+1$ طبق رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$a_{i,k+1} = k_1\left(v_{des} - v_{i,k}\right) \qquad (۳)$$

که در آن $a_{i,k+1}$ شتاب وسیله نقلیه i در زمان $k+1$ است، v_{des} سرعت مطلوب، $v_{i,k}$ سرعت وسیله نقلیه i در زمان k و k_1 ضریب کنترل افزایش سرعت است که در این مطالعه برابر با $0.4\ s^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود [۳۱].

کنترل شکاف: در این مدل، برای حفظ فاصله‌ی مطلوب بین خودرو دارای سیستم ACC و خودرو پیشرو، از کنترل فاصله استفاده می‌شود. با فعال شدن کنترل فاصله، شتاب خودروهایی که مجهز به سیستم ACC هستند، توسط توابع انتقال مرتبه دوم، بر اساس انحراف سرعت و فاصله نسبت به خودروی پیشرو در مرحله بعدی $k+1$ تعیین می‌شوند. همانطور که در رابطه ۴ نشان داده شده است:

$$a_{i,k+1} = k_2 e_{i,k} + k_3\left(v_{i-1,k} - v_{i,k}\right) \qquad (۴)$$

که در آن $e_{i,k}$ انحراف فاصله در گام زمانی کنونی k است. k_2 و k_3 ضریب‌های کنترلی برای انحراف موقعیت و سرعت که مقدار آن‌ها $k_2 = 0.07\ s$ و $k_3 = 0.8\ s$ بوده و $v_{i-1,k}$ سرعت وسیله نقلیه پیشرو در زمان کنونی است [۳۲].

کنترل بسته شدن شکاف: کنترل بسته شدن شکاف، زمانی که فاصله از خودرو پیشرو کمتر از ۱۰۰ متر باشد با اصلاح پارامترهای رابطه۴ بصورت $k_2 = 0.8\ s$ و $k_3 = 0.8\ s$ فعال می‌شود. زمانی که فاصله بین ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر قرار بگیرد رویکرد کنترلی بصورت هموار به حالت قبلی بازمی‌گردد [۳۲]. در مطالعه میلانز و شلادور برای مدلسازی رفتار خودرو خودران توسعه داده شد اما این رویکرد بطورکامل در مدلسازی در نظرگرفته نشد. در این مطالعه

[۱۱] Adaptive Cruise Control (ACC) Model

برای شبیه‌سازی حرکت طولی خودروهای معمولی از مدل کراوس و برای خوخا از مدل ACC استفاده می‌شود.

رفتار تغییر خط در جاده‌های چند خطه یکی دیگر از اجزای اصلی مدل‌سازی رفتار خردنگر خودرو است. در واقع مدل‌های تغییر خط وظیفه انتخاب خط در جاده‌های چند خطه و تنظیم سرعت مربوط به تغییر خط را بر عهده دارند [۳۳]. در مطالعات به نسبت مدل‌های تعقیب خودرو، توجه کمتری روی مدل‌های تغییر خط صورت گرفته و اعتقاد بر این است که استفاده از مدل‌های تغییر خط مختلف برای خودروهای خودران تاثیر ناچیزی بر شرایط ترافیکی دارد [۳۴]. اما تغییر خط هوشمندانه‌تر در خودروهای خودران نسبت به خودروهای معمولی باعث کاهش اختلال و ناهمگونی شده و در نتیجه شرایط ترافیکی را بهبود می‌بخشد [۳۵]. در این مطالعه مدل تغییر خط LC۲۰۱۳ برای خودرو معمولی [۳۳] و از مدل SL۲۰۱۵ برای خوخا بصورت اصلاح شده [۳۶] استفاده می‌شود.

۳-۲-۲ مدل‌های انتشار

کلاس انتشار نشان دهنده یک حالت مشخص از انتشار آلاینده توسط وسیله نقلیه است که بر اساس مدل‌های انتشار تعریف می‌شود. در این مطالعه برای خوخا از مدل خودروهای الکتریکی [۳۷] و برای خودروی معمولی، از مدل پیش‌فرض HBEFA۳/PC_G_EU۴ استفاده می‌شود که‌یک خودروی سواری بنزینی با استاندارد یورو ۴ است و با استفاده از حالت مبتنی بر HBEFA۳ مدل‌سازی شده است[۳۸].

کتابچه راهنمای فاکتورهای انتشار برای حمل‌ونقل جاده‌ای‌یک برنامه پایگاه داده مایکروسافت است که فاکتورهای انتشار را برای همه دسته‌های فعلی وسایل‌نقلیه جاده‌ای، از جمله خودروهای مسافری، وسایل‌نقلیه سبک، وسایل‌نقلیه سنگین، اتوبوس‌ها و موتورسیکلت‌ها، ارائه می‌کند. این فاکتورها شامل انتشار گازهای گلخانه‌ای خاص بر حسب گرم در کیلومتر برای همه آلاینده‌ها و همچنین برای مصرف سوخت هستند. فاکتورهای انتشار بر اساس شبیه‌سازی تعداد زیادی از موقعیت‌های رانندگی، بوسیله یک مدل انتشار لحظه‌ای مبتنی بر نقشه انتشار، محاسبه می‌شوند. این مدل میزان مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های زیست محیطی توسط وسایل‌نقلیه‌ای جاده‌ای را براساس دینامیک طولی خودرو و نقشه‌های انتشار محاسبه می‌کند [۳۸]. در مدل خودروهای الکتریکی، فرض می‌شود که انرژی خودرو از جمع مولفه‌های انرژی جنبشی، پتانسیل و چرخشی داخلی محاسبه می‌شود. سپس میزان انرژی تلف شده از آن کسر می‌شود تا مقدار انرژی قابل استفاده در خودرو محاسبه شود. بنابراین، انرژی خودرو از رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$E_{veh}[k] = E_{kin}[k] + E_{pot}[k] + E_{rot,\text{int}}[k] \qquad (۵)$$
$$= \frac{m}{۲}.v^{۲}[k] + m.g.h[k] + \frac{j_{int}}{۲}.v^{۲}[k]$$

که در آن جرم خودرو، شتاب گرانش، ممان اینرسی دورانی داخلی، $v[k]$ و $h[k]$ به ترتیب سرعت و ارتفاع از سطح دریا در گام زمانی k است.

در این مطالعه بصورت کلی دو شیوه‌سفر خودرو معمولی و خوخا در نظر گرفته می‌شود که پارامترهای تعریف شده در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲: شیوه‌سفرهای مورد استفاده در این مطالعه

ویژگی	شیوه‌سفر	
	معمولی	خوخا
carFollowModel	kruss	ACC/CACC
accel	۲/۶	N (۱/۵, ۱); [۰/۷۵, ۲]*
decel	۴/۵	N (۳, ۱); [۲, ۴]
emergencyDecel	۹	۹
sigma	۰/۵	-
speedFactore	N (۱, ۰/۱); [۰/۲, ۲]	۱
tau	۱	N(۱/۲,۰/۱); [۱/۱, ۱/۳]
minGap	۲/۵	۰/۵

	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو۴	سناریو۵
سیاست اشتراک	انحصاری	انحصاری دوکاربر	انحصاری چندکاربر	-	-
اندازه ناوگان	۱۲	۸	۶	۴	-
نرخ نفوذ(٪)	۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰

boardingDuration	۰/۵	۳/۵

*توزیع نرمال [<mean>,<std>);[<min>,<max>]

۳-۳-سناریوهای شبیه‌سازی

سناریوهای فرض شده در سه بعد مختلف لحاظ می‌شوند: سیاست اشتراک، نرخ نفوذ و اندازه ناوگان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود. سه سیاست‌های به اشتراک‌گذاری خوخا در سه حالت زیر تعریف می‌شود:

انحصاری: در این سه سیاست، خودرو بر اساس زمان رزرو سفر به کاربران تخصیص داده می‌شود. به عبارت دیگر، کاربری که زودتر درخواست رزرو خودرو را ثبت کند، برای تخصیص نزدیکترین خودرو در اولویت قرار می‌گیرد. این سه سیاست، از اشتراک سواری برخوردار نیست و خودرو نمی‌تواند به بیش از یک کاربر سرویس دهی کند.

انحصاری دو کاربر: مشابه سیاست انحصاری، در تخصیص خودرو، کاربرانی که زودتر درخواست می‌دهند در اولویت هستند با این تفاوت که در صورت وجود کاربر دیگر با مبدا و مقصد یکسان، خودرو به یک کاربر دیگر هم سرویس می‌دهد.

انحصاری چند کاربر: مشابه سیاست انحصاری با این تفاوت که یک خودرو در صورت وجود کاربران دیگر با مبدا و مقصد مشابه با توجه به محدودیت ظرفیت خودرو به آنها سرویس می‌دهد.

با توجه به ادبیات، هر خوخا می‌تواند جایگزین ۳ تا ۱۲ خودرو شخصی شود[۲۵]؛ در نتیجه، نرخ جایگزینی خوخا با خودروهای شخصی در این مطالعه با مقادیر ۴، ۶، ۸ و ۱۲ فرض شده است. به عبارت دیگر، این اعداد، نرخ جایگزینی خوخا با خودروهای شخصی را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، اندازه ناوگان ۱۲ به معنای تعریف یک خوخا به ازای هر ۱۲ خودرو شخصی است. به‌عبارت دیگر، به ازای هر ۱۲ تقاضا برای سفر با خوخا، یک خوخا در شبکه تعریف می‌شود. این توصیف در سناریوهای نرخ نفوذ نیز برقرار است، به این معنی که عدد ۲۵ نشان می‌دهد که ۲۵ درصد از تقاضا با شیوه‌ی سفر خوخا انجام می‌شود.

جدول ۳: سناریوهای در نظر گرفته شده برای اثر سنجی خوخا

این مطالعه با درنظر گرفتن ۴۹ سناریو به بررسی حضور خوخا در شبکه و تاثیرات آن بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌پردازد و نتایج به دست آمده بصورت میانگین ۱۰ اجرا در هر سناریو (مجموع ۴۹۰ اجرا) در ادامه گزارش می‌شود.

۴- تحلیل نتایج

با توجه به جدول ۴ و جدول ۵ که میزان انتشار آلاینده‌های CO و CO_2 را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که حضور خوخا باعث کاهش انتشار این دو گاز آلاینده می‌شود.

جدول۴: میزان انتشار آلاینده مونواکسید کربن(CO) بر حسب تن بر ساعت، در سناریوهای مختلف اندازه ناوگان، سیاست اشتراک و نرخ نفوذ

نرخ نفوذ	اندازه ناوگان				سیاست اشتراک
	۴	۶	۸	۱۲	
۱۰۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	انحصاری
۷۵	۳/۰	۲/۵	۲/۲	۱/۹	
۵۰	۶/۹	۵/۶	۵/۱	۴/۷	
۲۵	۱۱/۰	۹/۵	۹/۱	۸/۴	
۱۰۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	انحصاری دو کاربر
۷۵	۲/۷	۲/۳	۲/۱	۱/۸	
۵۰	۶/۴	۵/۲	۴/۸	۴/۵	
۲۵	۱۰/۱	۹/۲	۸/۸	۸/۲	
۱۰۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	انحصاری چند کاربر
۷۵	۳/۰	۲/۴	۲/۲	۱/۹	
۵۰	۶/۴	۵/۳	۵/۰	۴/۵	
۲۵	۱۰/۴	۹/۳	۹/۱	۸/۳	
	۱۴.۱	۱۴/۱	۱۴/۱	۱۴/۱	پایه

پژوهشگاری

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر به نسبت عملکرد بهتری نسبت به سیاست اشتراک انحصاری دارد به‌طوری که در نرخ نفوذ ۷۵ درصد و با اندازه ناوگان ۴، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری و سناریو پایه، میزان انتشار CO را به‌ترتیب حدود ۱۰ درصد و ۸۱ درصد کاهش می‌دهد. در مورد انتشار آلاینده CO_2 نیز همین روند مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال در سناریو مذکور، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری و سناریو پایه، میزان انتشار آلاینده CO_2 را به ترتیب حدود ۴ درصد و ۷۸ درصد کاهش می‌دهد.

جدول۵: میزان انتشار آلاینده مونواکسید کربن(CO_2) بر حسب تن بر ساعت، در سناریوهای مختلف اندازه ناوگان، سیاست اشتراک و نرخ نفوذ

نرخ نفوذ	اندازه ناوگان				سیاست اشتراک
	۴	۶	۸	۱۲	
۱۰۰	۰	۰	۰	۰	انحصاری
۷۵	۱۳۲	۱۲۱	۱۱۸	۱۱۴	
۵۰	۲۸۴	۲۵۹	۲۴۶	۲۴۱	
۲۵	۴۴۱	۴۱۴	۴۰۴	۳۹۳	
۱۰۰	۰	۰	۰	۰	انحصاری دو کاربر
۷۵	۱۲۷	۱۱۹	۱۱۵	۱۱۰	
۵۰	۲۷۳	۲۵۱	۲۴۴	۲۳۷	
۲۵	۴۲۴	۴۰۸	۳۹۹	۳۹۲	
۱۰۰	۰	۰	۰	۰	انحصاری چند کاربر
۷۵	۱۳۰	۱۲۱	۱۱۷	۱۱۲	
۵۰	۲۷۴	۲۵۳	۲۴۷	۲۳۷	
۲۵	۴۳۴	۴۱۱	۴۰۵	۳۹۱	
	۵۷۷	۵۷۷	۵۷۷	۵۷۷	۳۶پایه
۵۸۰ تن				۰/۰	

در واقع، دلیل ایجاد این اثر می‌تواند به علت نقش خوخا در تسهیل ترافیک باشد. با توجه به ویژگی‌هایی در نظر گرفته شده برای خوخا، حضور این شیوه سفر در شبکه می‌تواند به‌طور قابل توجهی تأثیرات متفاوتی روی ترافیک داشته باشد. در جدول ۶ تا ۸، سه شاخص اصلی برای سنجش وضعیت ترافیک، یعنی سرعت، تراکم وحجم قابل مشاهده است که بر اساس اندازه ناوگان و سیاست اشتراک در نرخ نفوذ ۱۰۰ درصد تفکیک شده‌اند. با توجه به این جداول، استفاده از اشتراک سواری و ارائه خدمات همزمان خوخا به بیش از یک کاربر، تراکم در شبکه را کاهش می‌دهد. این کاهش تراکم بهبود سرعت متوسط در شبکه و کاهش صف را به دنبال دارد. این امر باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از ترافیک می‌شود. به عبارت دیگر، استفاده از اشتراک سواری می‌تواند به بهبود وضعیت ترافیک، کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی شهروندان کمک کند. به‌عنوان مثال در اندازه ناوگان ۴ سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به حالت پایه تراکم و سرعت متوسط را به ترتیب ۲۵ درصد کاهش و ۱۷ درصد افزایش داده است.

جدول۶: تراکم متوسط در شبکه در کمان‌های پر ازدحام برای سناریوهای مختلف اندازه ناوگان و سیاست اشتراک (وسیله بر کیلومتر)

اندازه ناوگان	انحصاری	انحصاری دو کاربر	انحصاری چند کاربر	پایه
۴	۹۵	۸۱	۷۰	۱۰۹
۶	۷۸	۶۹	۶۱	
۸	۶۴	۶۲	۵۳	
۱۲	۵۳	۴۳	۳۳	

جدول۷: سرعت متوسط در شبکه در کمان‌های پر ازدحام برای سناریوهای مختلف اندازه ناوگان و سیاست اشتراک (کیلومتر بر ساعت)

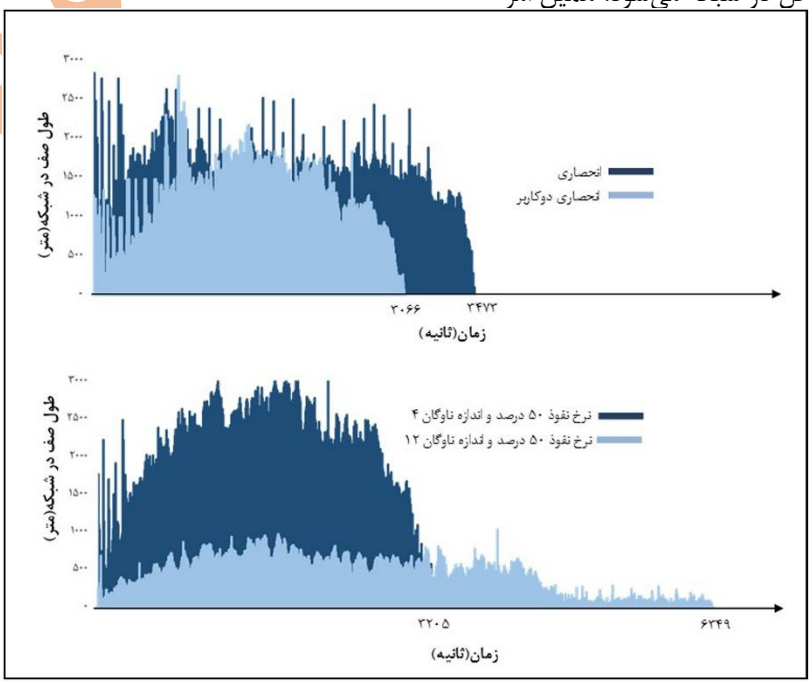
اندازه ناوگان	انحصاری	انحصاری دو کاربر	انحصاری چند کاربر	پایه
۴	۳۹	۴۲	۴۰	۳۶
۶	۴۱/۷	۴۳	۴۱	
۸	۴۴	۴۴	۴۴	
۱۲	۴۶	۴۶	۴۶	

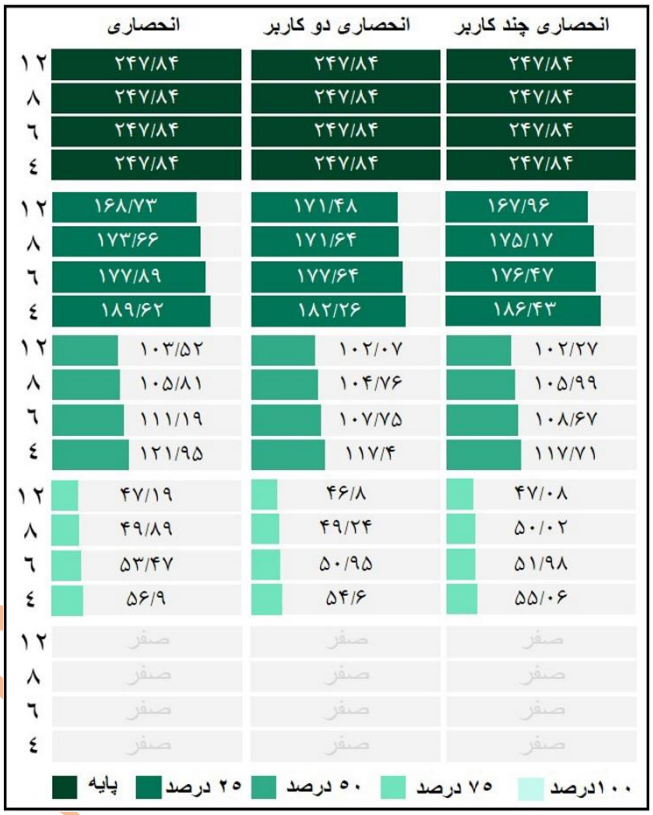
جدول۸: حجم متوسط در شبکه در کمان‌های پر ازدحام برای سناریوهای مختلف اندازه ناوگان و سیاست اشتراک (وسیله بر ساعت)

اندازه ناوگان	انحصاری	انحصاری دو کاربر	انحصاری چند کاربر	پایه
۴	۳۷۰۵	۳۴۰۲	۲۸۰۰	

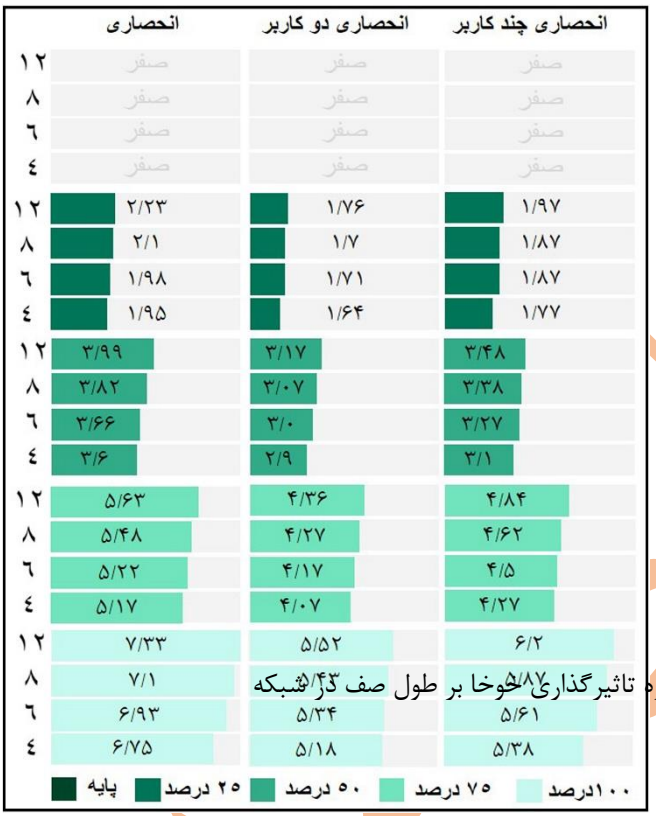
۶	۳۲۵۳	۲۹۶۷	۲۵۰۱	۳۹۲۴
۸	۲۸۱۶	۲۷۲۸	۲۳۳۲	
۱۲	۲۴۳۸	۱۹۷۸	۱۵۱۸	

در مقابل می‌توان گفت اندازه ناوگان با میزان انتشار رابطه مستقیم دارد و دلیل آن‌را در جدول ۷ و ۸ می‌توان مشاهده کرد. در سیاست اشتراک انحصاری اندازه ناوگان ۴ نسبت به اندازه ناوگان ۱۲، متوسط تراکم در مسیرهای پر ازدحام را ۱۷۴ درصد افزایش داده است. به‌عبارتی دیگر افزایش ناوگان هرچند می‌تواند مزایایی از جمله کاهش زمان انتظار را بدنبال داشته باشد اما با افزایش تراکم و حجم در کمان، در نهایت موجب افزایش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. به‌عنوان مثال در سیاست اشتراک انحصاری با نرخ نفوذ ۵۰ درصد، اندازه ناوگان ۴ به نسبت اندازه ناوگان ۱۲ میزان انتشار CO_2 را حدود ۱۸ درصد افزایش می‌دهد. این افزایش میزان انتشار ناشی از افزایش ناوگان را می‌توان در سایر سیاست‌های اشتراک نیز مشاهده کرد. ترافیک و صف‌های طولانی در جاده‌ها برای کاربران ناخوشایند هستند و ممکن است به اثرات روانی نامطلوبی مانند استرس، خستگی و عدم تمرکز منجر شوند. همچنین، انتظاردر صف‌های ترافیکی می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت و انرژی شده و در نتیجه آلاینده‌های هوا را افزایش دهد. بنابراین، کاهش ترافیک و صف‌های طولانی می‌تواند به کاهش میزان آلاینده‌ها و مصرف انرژی کمک کند. تاثیر خوخا بر طول صف به سیاست اشتراک و اندازه ناوگان بستگی دارد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، براساس قست الف، اشتراک سواری با افزایش دسترسی موجب کاهش طول صف و زمان سفر کل در شبکه می‌شود. همین امر موجب می‌شود که اشتراک سواری در تولید انتشار آلاینده‌های زیست محیطی عملکرد بهتری داشته. قسمت ب تاثیر اندازه ناوگان بر طول صف را نشان می‌دهد. افزایش اندازه ناوگان هرچند زمان سفر کل در شبکه را به نحو چشمگیری کاهش می‌دهد اما با افزایش طول صف می‌تواند اثر نامناسبی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. به‌طور کلی، عامل اصلی کاهش میزان انتشار ناشی از حضور خوخا، استفاده این شیوه سفر از انرژی پاک به‌عنوان نیروی مولد حرکتی است. با افزایش استفاده از خوخا به جای وسایل نقلیه شخصی، تعداد وسایل نقلیه معمولی در سیستم کاهش یافته و همین امر موجب کاهش میزان انتشار در محیط زیست می‌شود. در واقع، در صورتی که نرخ نفوذ کامل شود و همه افراد از خوخا استفاده کنند، میزان آلودگی به صفر میل خواهد کرد. علاوه بر میزان انتشار، مصرف سوخت در شبکه حمل‌ونقل نیز می‌تواند شاخصی از کارایی شبکه باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ نفوذ خوخا، میزان مصرف سوخت توسط خودروهای معمولی کاهش می‌یابد و در نرخ نفوذ ۱۰۰ درصد، میزان مصرف سوخت فسیلی صفر می‌شود. در مورد سیاست‌های اشتراک خودرو





شکل۳: تاثیر سیاست اشتراک و اندازه ناوگان بر نحوه تاثیرگذاری خوخا بر طول صف در شبکه



شکل۵: میزان مصرف الکتریسیته (مگاوات ساعت) براساس اندازه ناوگان

شکل۴: میزان مصرف سوخت فسیلی (کیلوگرم) براساس اندازه ناوگان

می‌توان گفت که سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر به نسبت عملکرد بهینه‌تری دارد. به‌طوری که در سناریوی ۷۵ درصد با اندازه ناوگان ۴، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری و سناریو پایه، میزان مصرف سوخت را به ترتیب حدود ۴ درصد و ۷۸ درصد کاهش می‌دهد. در مورد اندازه ناوگان می‌توان گفت که با افزایش اندازه ناوگان و افزایش ازدحام ناشی از آن، میزان مصرف سوخت با افزایش نسبی همراه است. به‌عنوان مثال، در سیاست اشتراک انحصاری با نرخ نفوذ ۵۰ درصد و اندازه ناوگان ۴، میزان مصرف سوخت نسبت به اندازه ناوگان ۱۲، ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. در خوخا که نیروی محرکه از انرژی الکتریسیته بدست می‌آید میزان مصرف انرژی می‌تواند مهم باشد. شکل ۵ میزان مصرف انرژی توسط خوخا در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. روشن است با افزایش نرخ نفوذ میزان مصرف الکتریسیته بیشتر شده و دلیل آن افزایش تعداد سفرهای انجام شده با استفاده از شیوه‌سفر خوخا است. در مورد سیاست‌های اشتراک، سناریوهای دارای اشتراک سواری از عملکرد بهتری برخوردار هستند. در نرخ نفوذ ۱۰۰ درصد و با اندازه ناوگان۴ سیاست اشتراک انحصاری دوکاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری میزان مصرف را ۲۳ درصد کاهش می‌دهد. در ارتباط با اندازه ناوگان می‌توان گفت، افزایش ناوگان با افزایش دسترسی و کاهش وسیله کیلومتر طی شده [۲۳] میزان مصرف انرژی الکتریسیته را کاهش می‌دهد. به‌طوری که در سیاست اشتراک انحصاری چند کاربر در نرخ نفوذ ۱۰۰ درصد اندازه ناوگان ۴ نسبت به اندازه ناوگان ۱۲ میزان مصرف انرژی را ۱۳ درصد کاهش می‌دهد.

به‌طور خلاصه در جدل ۶ می‌توان تاثیرات زیست محیطی حضور خوخا در شبکه را مشاهده کرد که باتوجه به سناریوهای مختلف نرخ نفوذ، سیاست اشتراک و اندازه ناوگان تفکیک شده‌اند.

جدول۶: تاثیر سناریوهای فرض شده نرخ نفوذ، سیاست اشتراک و اندازه ناوگان بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان مصرف انرژی

سناریو	انتشار گازهای گلخانه‌ای	تاثیر بر میزان مصرف انرژی
نرخ نفوذ	نرخ نفوذ تاثیر چشمگیری دارد. به‌طوری که در نرخ نفوذ ۱۰۰ درصد میزان انتشار به صفر میل می‌کند.	افزایش نرخ نفوذ موجب کاهش مصرف سوخت فسیلی و افزایش مصرف انرژی الکتریکی می‌شود.
سیاست اشتراک	اشتراک سواری دو کاربر نسبت به سایر سناریوهای اشتراک تا ۱۰ درصد میزان انتشار را کاهش می‌دهد.	اشتراک سواری میزان مصرف سوخت فسیلی و انرژی الکتریسیته را به ترتیب تا ۵ درصد و ۲۳ درصد کاهش می‌دهد.
اندازه ناوگان	افزایش اندازه ناوگان مصرف سوخت فسیلی را تا ۱۸ درصد و مصرف انرژی الکتریسیته را تا ۵۸ درصد افزایش می‌دهد.	سوخت فسیلی را تا ۲۰ درصد افزایش و مصرف انرژی الکتریسیته را تا ۱۳ درصد کاهش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

حمل‌ونقل به‌عنوان یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شود که افزایش روز افزون جمعیت این موضوع را نگران کننده‌تر می‌کند. این مطالعه با شبیه‌سازی ۴۹ سناریو (۱۰ اجرا برای هر سناریو، مجموع ۴۹۰ اجرا) به بررسی تأثیر خوخا به‌عنوان یک راه‌کار برای کاهش نقش حمل‌ونقل در انتشار گازهای گلخانه‌ای بر مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌پردازد. مطالعه‌ای که با در نظر گرفتن ۶۵۰۰ سفر در مدت زمان ۲۵ دقیقه در بخشی از شهر تهران، خلا مطالعاتی موجود، یعنی بررسی حضور خوخا در شبکه معابر شهری در ایران با نگاهی زیست محیطی را پر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که:

۱. با افزایش نرخ نفوذ خوخا در شبکه، میزان انتشار آلاینده‌های هوا کاهش می‌یابد.
۲. سیاست اشتراک سواری نسبت به سیاست اشتراک خودرو می‌تواند در کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها عملکرد بهتری نشان دهد.
۳. افزایش اندازه ناوگان خوخا می‌تواند منجر به افزایش میزان انتشار شود، به خصوص در سناریوهایی که هر دو شیوه سفر خوخا و خودرو معمولی حضور دارند.
۴. با افزایش نرخ نفوذ، تعداد وسایل نقلیه معمولی کمتر خواهد شد و همین امر می‌تواند به کاهش مصرف سوخت فسیلی و افزایش مصرف الکتریسیته منجر شود.
۵. سیاست اشتراک سواری با کاهش ازدحام و طول صف، می‌تواند میزان مصرف سوخت فسیلی و انرژی الکتریسیته را نسبت به سناریو صرفا اشتراک خودرو کاهش دهد.
۶. اندازه ناوگان می‌تواند تاثیر متفاوتی بر مصرف سوخت داشته باشد. به عنوان مثال، افزایش اندازه ناوگان به‌دلیل افزایش ازدحام باعث افزایش میزان مصرف سوخت فسیلی خواهد شد، اما با بیشتر کردن دسترسی و کاهش وسیله کیلومتر طی شده خالی، می‌تواند مصرف انرژی الکتریسیته را کاهش داد.

نتایج حاصل تایید کننده نتایج مطالعات پیشین، مبنی بر پتانسیل خوخا برای کاهش سهم سیستم حمل‌ونقل از میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و میزان مصرف انرژی است. برخلاف نتیجه لوخاندولا و کای [۶] خوخا بدون اشتراک سواری در صورت الکتریکی بودن هم می‌تواند میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی را کاهش دهد. مشابه نتیجه سالزار و همکاران [۱۸] حضور خوخا در شبکه با کاهش ازدحام می‌تواند عاملی تاثیر گذار بر میزان انتشار باشد. عوامل زیادی بر عملکرد خوخا تاثیر دارند. فرض‌های در نظر گرفته شده در ارتباط با هر یک از این عوامل می‌توانند با تغییر نتایج مطالعه همراه باشند. لذا در مقایسه نتایج مطالعات مختلف، باید به

فرض‌های مسئله توجه شود. یکی از این عوامل، متصل بودن خودرو است که این اتصال ممکن است با خودروهای دیگر و یا با زیرساخت باشد. متصل بودن خودرو می‌تواند مدل‌های تعقیب، تغییرخط و رفتار خودرو در تقاطع را دست‌خوش تغییر کند. این مطالعه با فرض عدم اتصال خوخا انجام شده که در نظر نگرفتن این فرض می‌تواند مبنای مطالعات بعدی باشد.

از موارد دیگری که می‌تواند محور مطالعات آتی باشد، نحوه تخصیص خودرو و سیاست اشتراک است. در این مطالعه اولویت تخصیص خوخا به کاربرانی است که زودتر درخواست داده باشند، بدون توجه به فاصله آنها به نزدیک‌ترین خودرو. در حالی که این امکان وجود دارد که بدون اولویت بندی بر اساس زمان درخواست، هر خودرو به نزدیکترین کاربر تخصیص داده شود.

در ارتباط با سیاست اشتراک، در این مطالعه هیچ حدی برای زمان انتظار کاربر برای رسیدن نزدیکترین خوخا درنظر گرفته نشده است. به‌عبارتی دیگر می‌توان با فرض زمان انتظار حداکثر، اندازه ناوگان خوخا را در مطالعات آتی بهینه کرد.

۷-مراجع

[۱] Fuller, R., Landrigan, P.J. and Balakrishnan, ۲۰۲۲. Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*, *6*(۶), pp.e۵۳۵-e۵۴۷. doi: ۱۰,۱۰۱۶/S۲۵۴۲-۵۱۹۶(۲۲)۰۰۰۹۰-۰.

[۲] World Bank, ۲۰۲۲. *The Global Health Cost of PM2. 5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021*. The World Bank. doi: ۱۰,۱۵۹۶/۹۷۸-۱-۴۶۴۸-۱۸۱۶-۵

[۳] Zehnder C., Manoylov K. and Mutiti, S.,۲۰۱۸. Introduction to Environmental Science : ۲nd Edition.

[۴] Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P., ۲۰۲۰. CO_2 and greenhouse gas emissions. *Our world in data*.

[۵] Raouf, M., Abedini, R., Omidkhah, M. and Nezhadmoghadam, E., ۲۰۲۰. A favored $CO^۲$ separation over light gases using mixed matrix membrane comprising polysulfone/polyethylene glycol and graphene hydroxyl nanoparticles. *Process Safety and Environmental Protection*, *133*, pp.۳۹۴-۴۰۷. doi: ۱۰,۱۰۱۶/J.PSEP.۲۰۱۹,۱۱,۰۰۲.

[۶] Lokhandwala, M. and Cai, H., ۲۰۱۸. Dynamic ride sharing using traditional taxis and shared autonomous taxis: A case study of NYC. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *97*, pp.۴۵-۶۰. doi: ۱۰,۱۰۱۶/J.TRC.۲۰۱۸,۱۰,۰۰۷.

[۷] Bauer, G.S., Greenblatt, J.B. and Gerke, B.F., ۲۰۱۸. Cost, energy, and environmental impact of automated electric taxi fleets in Manhattan. *Environmental science & technology*, *52*(۸), pp.۴۹۲۰-۴۹۲۸. doi: ۱۰,۱۰۲۱/acs.est.۷b۰۴۷۳۲.

[۸] Chen, T.D., Kockelman, K.M. and Hanna, J.P., ۲۰۱۶. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *94*, pp.۲۴۳-۲۵۴. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.tra.۲۰۱۶,۰۸,۰۲۰.

[۹] Broadbent, G.H., Metternicht, G.I. and Wiedmann, T.O., ۲۰۲۱. Increasing electric vehicle uptake by updating public policies to shift attitudes and perceptions: case study of New Zealand. *Energies*, *14*(۱۰), p.۲۹۲۰. doi: ۱۰,۳۳۹۰/en۱۴۱۰۲۹۲۰

[۱۰] Arbib, J. and Seba, T., ۲۰۱۷. *Rethinking transportation 2020-2030: The disruption of transportation and the collapse of the internal-combustion vehicle and oil industries*. RethinkX.

[۱۱] Santos, A., McGuckin, N., Nakamoto, H.Y., Gray, D. and Liss, S., ۲۰۱۱. *Summary of travel trends: 2009 national household travel survey* (No. FHWA-PL-۱۱-۰۲۲). United States. Federal Highway Administration.

[۱۲] Caulfield, B., ۲۰۰۹. Estimating the environmental benefits of ride-sharing: A case study of Dublin. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *14*(۷), pp.۵۲۷-۵۳۱. doi: ۱۰,۱۰۱۶/J.TRD.۲۰۰۹,۰۷,۰۰۸.

[۱۳] Vleugel, J.M. and Bal, F., ۲۰۱۸. More space and improved living conditions in cities with autonomous vehicles. *International Journal of Design & Nature*

Systems. *presented at the 6th National Congress of Civil Engineering, Architecture, and Urban Development. Tehran.* (In Persian).

[۲۲] Karbasi A. and Saffarzadeh M., ۲۰۲۲. Investigating the effect of Automated Vehicles and Connected and Automated Vehicles on the capacity of freeways using microscopic simulation," p*ublished in the Journal of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology* vol. ۵۴, no. ۵, pp. ۱۶۹۱–۱۷۰۴. (In Persian).

[۲۳] Rahmani A. and Mamdoohi A.R, ۲۰۲۳. Shared Autonomous Vehicles Effect on Vehicle-Km Traveled(VKT): A Case Study in a Part of Tehran. *19th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, Tehran, Iran*. (In Persian).

[۲۴] R. Ariana, "۲۰۲۲ World Air Quality Report," pp. ۱–۲۳,۲۰۲۲, https://www.greenpeace.org/static/planet۴-india-stateless/۲۰۲۳/۰۳/۲fe۳۳d۷a-۲۰۲۲-world-air-quality-report.pdf

[۲۵] Narayanan, S., Chaniotakis, E. and Antoniou, C., ۲۰۲۰. Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *111*, pp.۲۵۵-۲۹۳. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.trc.۲۰۱۹,۱۲,۰۰۸.

[۲۶] Ahmed, H.U., Huang, Y. and Lu, P., ۲۰۲۱. A review of car-following models and modeling tools for human and autonomous-ready driving behaviors in micro-simulation. *Smart Cities*, *4*(۱), pp.۳۱۴-۳۳۵. doi: ۱۰,۳۳۹۰/SMARTCITIES۴۰۱۰۰۱۹

[۲۷] Lochrane, T., ۲۰۱۴. A new multidimensional psycho-physical framework for modeling car-following in a freeway work zone. *Electronic Theses and Dissertations*. ۴۵۹۲. University of Central Florida.

[۲۸] Hoogendoorn, S.P. and Hoogendoorn, R., ۲۰۱۰. Generic calibration framework for joint estimation of car-following models by using microscopic data. *Transportation Research Record*, *2188*(۱), pp.۳۷-۴۵. doi: ۱۰,۳۱۴۱/۲۱۸۸-۰۵.

[۲۹] Krauß, S., ۱۹۹۸. Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. *and Ecodynamics*, *12*(۴), pp.۵۰۵-۵۱۵. doi: ۱۰,۲۴۹۵/DNE-V۱۲-N۴-۵۰۵-۵۱۵.

[۱۴] Fulton, L.M., ۲۰۱۸. Three revolutions in urban passenger travel. *Joule*, *2*(۴), pp.۵۷۵-۵۷۸. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.joule.۲۰۱۸,۰۳,۰۰۵.

[۱۵] Shoup, D.C., ۲۰۰۶. Cruising for parking. *Transport policy*, *13*(۶), pp.۴۷۹-۴۸۶. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.tranpol.۲۰۰۶,۰۵,۰۰۵.

[۱۶] Fagnant, D.J. and Kockelman, K.M., ۲۰۱۴. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *40*, pp.۱-۱۳. doi: ۱۰,۱۰۱۶/J.TRC.۲۰۱۳,۱۲,۰۰۱.

[۱۷] Jones, E.C. and Leibowicz, B.D., ۲۰۱۹. Contributions of shared autonomous vehicles to climate change mitigation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *72*, pp.۲۷۹-۲۹۸. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.trd.۲۰۱۹,۰۵,۰۰۵.

[۱۸] Salazar, M., Rossi, F., Schiffer, M., Onder, C.H. and Pavone, M., ۲۰۱۸, November. On the interaction between autonomous mobility-on-demand and public transportation systems. In *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)* (pp. ۲۲۶۲-۲۲۶۹). IEEE. doi: ۱۰,۱۱۰۹/ITSC.۲۰۱۸,۸۵۶۹۳۸۱.

[۱۹] Milakis, D., Van Arem, B. and Van Wee, B., ۲۰۱۷. Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, *21*(۴), pp.۳۲۴-۳۴۸. doi: ۱۰,۱۰۸۰/۱۵۴۷۲۴۵۰,۲۰۱۷,۱۲۹۱۳۵۱.

[۲۰] Afandizadeh Sh., Jafari R.and N. Kalantari ,۲۰۲۱. The Impact of Personal and Shared Autonomous Vehicles on Mode Choice for Different Travel Purposes Considering Changes in Three Variables of Travel Time, Parking Cost, and Operating Cost (Case Study: Qom City). *published in the Journal of Transportation Research*, vol. ۱۸, no. ۳, pp. ۲۹–۴۰. (In Persian).

[۲۱] Asaiesh Sh. and Hemati S., ۲۰۲۰. The Investigation and Evaluation of the Performance of Autonomous Vehicles and Their Role in Intelligent Transportation

of using SUMO in a traffic management system. In *Simulation of Urban Mobility: First International Conference, SUMO 2013, Berlin, Germany, May 15-17, 2013. Revised Selected Papers 1* (pp. ۱۳۶-۱۴۵). doi: ۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۶۶۲-۴۵۰۷۹-۶_۱۰.

[۳۸] Keller, M., Hausberger, S., Matzer, C., Wüthrich, P. and Notter, B., ۲۰۱۷. HBEFA Version ۳,۳, Hintergrundbericht. *INFRAS, Bern, Schweiz.*

[۳۰] Song, J., Wu, Y., Xu, Z. and Lin, X., ۲۰۱۴, November. Research on car-following model based on SUMO. In *The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology* (pp. ۴۷-۵۵). IEEE. doi: ۱۰,۱۱۰۹/ICAIT.۲۰۱۴,۷۰۱۹۵۲۸

[۳۱] Milanés, V. and Shladover, S.E., ۲۰۱۴. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *48*, pp.۲۸۵-۳۰۰. doi: ۱۰,۱۰۱۶/J.TRC.۲۰۱۴,۰۹,۰۰۱.

[۳۲] Xiao, L., Wang, M. and Van Arem, B., ۲۰۱۷. Realistic car-following models for microscopic simulation of adaptive and cooperative adaptive cruise control vehicles. *Transportation Research Record*, *2623*(۱), pp.۱-۹. doi: ۱۰,۳۱۴۱/۲۶۲۳-۰۱

[۳۳] Erdmann, J., ۲۰۱۵. SUMO's lane-changing model. In *Modeling Mobility with Open Data: 2nd SUMO Conference 2014 Berlin, Germany, May 15-16, 2014* (pp. ۱۰۵-۱۲۳). Springer International Publishing. doi: ۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۱۵۰۲۴-۶_۷

[۳۴] Liu, Y., Guo, J., Taplin, J. and Wang, Y., ۲۰۱۷. Characteristic analysis of mixed traffic flow of regular and autonomous vehicles using cellular automata. *Journal of Advanced Transportation*, *2017*. doi: ۱۰,۱۱۵۵/۲۰۱۷/۸۱۴۲۰۷۴.

[۳۵] Al-Turki, M., Ratrout, N.T., Rahman, S.M. and Reza, I., ۲۰۲۱. Impacts of autonomous vehicles on traffic flow characteristics under mixed traffic environment:Future perspectives. *Sustainability*, *13*(۱۹), p.۱۱۰۵۲. doi: ۱۰,۳۳۹۰/su۱۳۱۹۱۱۰۵۲.

[۳۶] Mintsis, E., Koutras, D., Porfyri, K., Mitsakis, E., Lücken, L., Erdmann, J., Floetteroed, Y., Alms, R., Rondinone, M. and Maerivoet, S., ۲۰۱۸. Modelling, simulation and assessment of vehicle automations and automated vehicles' driver behaviour in mixed traffic. *TransAID Deliverable*.

[۳۷] Krumnow, M. and Kretschmer, A., ۲۰۱۴. Real-Time simulations based on live detector data–experiences

ویرایش نشده

ویراستاری نشده