

سناریوسازی نرخ نفوذ خودروی خودران اشتراکی (یک تحلیل کمی زیست‌محیطی)

علی رحمانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیررضا مهدوحی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۳ (۷۷-۸۶، صص. ۲، شماره ۲، پژوهشی)

در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۱۹، غلظت آلاینده‌های هوای شهرهای ایران به طور متوسط ۳۵٪ افزایش یافته است. حمل‌ونقل، یکی از منابع اصلی ایجاد آلودگی هوا در کلان‌شهرهاست. در حالی که با افزایش جمعیت نیاز به حمل‌ونقل بیشتر می‌شود، از راهکارهای کاهش نقش حمل‌ونقل در ایجاد آلودگی، می‌توان به شیوه‌ی سفرهای جایگزین اشاره کرد؛ که از لحاظ تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی عملکرد بهتری داشته باشند. خودروهای خودران اشتراکی با توجه به پتانسیلی که دارند، قادر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. اما تخمین آثار شیوه‌ی سفر مذکور، به دلیل وجود مؤلفه‌های رقابتی فراوان، دشوار است. هدف مطالعه‌ی حاضر، یک تحلیل کمی زیست‌محیطی بر حضور خودروی خودران اشتراکی در بخشی از شهر تهران بر مبنای شبیه‌سازی است، که در سناریوهای مختلف انجام شده است. نتایج نشان داده‌اند که سرویس دهی هم‌زمان به دو کاربر در مقایسه با دیگر سناریوهای اشتراک، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا حدود ۱۰٪ کاهش داده است. اما، افزایش اندازه‌ی ناوگان با افزایش تراکم، آثار زیست‌محیطی حمل‌ونقل را پررنگ‌تر کرده است. نرخ نفوذ، تأثیر چشمگیری دارد؛ به طوری که در نرخ نفوذ ۱۰٪، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به سمت صفر میل می‌کند.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی خودروی خودران اشتراکی، اشتراک سواری، خودروی الکتریکی، آلاینده‌های زیست‌محیطی، حمل‌ونقل هوشمند.

۱. مقدمه

انشار گازهای گلخانه‌ای، سایه‌ای تاریک‌تر از همیشه بر آینده‌ی زمین و زمین‌ها 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 توسعه‌یافته و با متوسط درآمد پایین، ۹۰٪ تلفات جانی را به خود اختصاص می‌دهند.^[۱] هزینه‌ی اقتصادی کلی بالغ بر ۸ تریلیون دلار است، که بیش از ۶۱٪ از تولید ناخالص داخلی جهان را شامل می‌شود. افزایش آلودگی هوا، تشدید و بروز بسیاری از بیماری‌ها، مانند: آسم، سرطان، بیماری‌های ریه، بیماری‌های قلبی و عروقی و مرگ زودرس را به دنبال دارد.^[۲] در بین ۱۰ کشور اول تولیدکننده‌ی دی‌اکسیدکربن، در حالی نام ایران با سهم ۱/۹٪ به چشم می‌آید، که سایر کشورهای موجود در

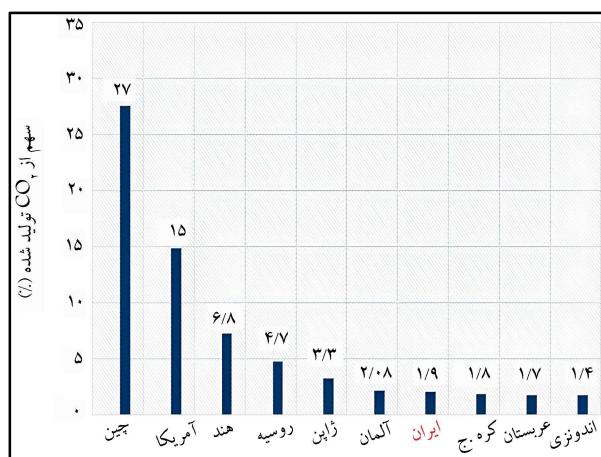
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۵/۴/۱۴۰۲، اصلاحیه ۹/۷/۱۴۰۲، پذیرش ۳/۸/۱۴۰۲.

استناد به این مقاله:

رحمانی، علی و مهدوحی، امیررضا. ۱۴۰۳. سناریوسازی نرخ نفوذ خودروی خودران اشتراکی (یک تحلیل کمی زیست‌محیطی). مهندسی عمران شریف، ۴۰(۲)، صص. ۷۷-۸۶.

DOI:10.24200/J30.2023.62698.3240



شکل ۱. سهم ۱۰ کشور اول تولیدکننده CO₂ در جهان. [۴]

الکتریکی و ترکیب آن با شیوهی سفرهای اشتراکی، که نسبت به سیستم حمل و نقل همگانی منعطف تر و در مقابل خودروهای شخصی ارزان تر است، آثار مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. [۸] اما از مؤلفه‌های اساسی، که در تعیین اثر شیوهی سفر ذکر شده نقشی اساسی دارد، میزان پذیرش است. پذیرشی که به دانش کاربر و آگاهی او از مطلوبیت‌های نهفته‌ی خودروی الکتریکی، و عواملی مانند: در دسترس نبودن محل شارژ، کند بودن شارژ، عدم اطمینان به تکنولوژی و اضطراب محدود (انگرنانی) کاربر برای سرگردان شدن با باتری خالی و بدون گزینه‌ی شارژ مجدد بستگی دارد. [۹] با این حال 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 به‌استفاده از خودروی کوچک‌تر با مصرف بهینه‌ی سوخت تمایل دارند. [۸] ادغام خودروهای الکتریکی با دو شیوهی حرکت نوظهور دیگر، خودروی خودران و سیستم‌های اشتراکی درخواستی^۲، شیوهی سفر جدیدی را با عنوان خودروی خودران اشتراکی (SAVs) (خوفا)^۳ به وجود آورده است، که می‌تواند موانع پذیرش خودروهای الکتریکی به‌خصوص اضطراب محدود را کم‌رنگ سازد و معرفی شیوهی سفری قابل رقابت با خودروی شخصی اما کارآتر را به واقعیت تبدیل کند. [۷] با معرفی خوفا، یکی از عمیق‌ترین تحولات تاریخ حمل و نقل رقم می‌خورد. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰، با تعیین مقررات استفاده از خودروهای خودران، ۹۵٪ از مسافر کیلومتر طی شده در آمریکا، توسط خودروهای خودران الکتریکی انجام شود. این امر موجب ایجاد پیامدهای فراوانی در زمینه‌ی حمل و نقل و بازار نفت جهانی می‌شود و زنجیره‌ی ارزش را دگرگون می‌سازد. [۱۰] تغییراتی که قبل از اتفاق نیاز به تحلیل و بررسی دارند.

۲. مروری بر ادبیات

معايير شهری، اهمیت انکارنشده‌ی در دنیای مدرن دارند. ضمن اینکه کانونی برای ایجاد ازدحام و منبعی برای انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند، راه‌کارهای فراوانی برای کاهش آثار آن‌ها پیشنهاد شده است. راه‌حلی که بیشتر در سطح وسیله‌ی نقلیه متمرکز هستند، مانند: بهبود مصرف سوخت با کارآمدتر کردن موتور و یا تغییر سوخت استفاده‌شده به جایگزین‌های کم‌کربن (الکتریسیته). اما به‌رحل‌هایی که در سطح سیستم اعمال شوند، کمتر توجه شده است. در حالی که سیستم‌های ناکارآمد، تأثیر بسیاری در مصرف انرژی و میزان انتشار آلاینده‌ها دارند؛ [۶] براساس

مطالعات ملی سفرهای خانه‌مینا (NHTS) [۴] در ایالات متحده‌ی آمریکا، سطح اشغال خودرو برای سفرهای خانه‌مینا به‌طور میانگین ۱/۶ نفر در هر وسیله‌ی نقلیه است؛ که این میزان با ظرفیت واقعی آن تفاوت زیادی دارد و نشانه‌ای از حضور پرننگ خودروهای تک‌سرنشین در شبکه‌ی حمل و نقل است. [۱۱] شیوهی سفر 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] هر چند در ارتباط با مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، فرض الکتریکی بودن خودرو، عاملی تعیین‌کننده است. [۱۳] در غیر این صورت، اگر ناوگان از سوخت‌های فسیلی استفاده کند، افزایش وسیله‌ی کیلومتر طی شده می‌تواند هرگونه پیشرفت کارایی ناشی از اشتراک را خنثی کند. [۱۴] هر چند شوپ^۵ (۲۰۰۶)، [۱۵] معتقد است حدود ۳۰٪ از سفرهایی که در نواحی مرکزی شهرها انجام می‌شود، سفرهایی هستند که مجبورند 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 تصادف‌ها و کاهش ازدحام در نواحی مرکزی شهرها شوند. 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 می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در حمل و نقل شهری کمک کنند. اما خوفا، به‌عنوان یک شیوهی تلفیقی از سه شیوهی اخیر، می‌تواند بهبود قابل توجهی در مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهرها ایجاد کند. لوخاندولا و کای^۶ (۲۰۱۸)، [۶] نشان داده‌اند که اثر کاهش خوفا در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، به داشتن اشتراک سواری^۷ (اختصاص دادن یک خوفا به چند کاربر که دارای مبدأ و مقصد یکسان یا نزدیک به هم هستند) بستگی دارد. لیویچ و جونز^۸ (۲۰۱۹)، [۱۷] معتقدند زمانی که خوفا با نرخ نفوذ ۷۰٪، جایگزین خودروی شخصی شود، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود، هر چند وسیله‌ی کیلومتر طی شده با افزایش همراه بود. سالزار^۹ و همکاران (۲۰۱۸)، [۱۸] با ادغام خوفا و حمل و نقل همگانی نشان داده‌اند که حضور خوفا می‌تواند به کاهش ترافیک و هزینه‌های حمل و نقل کمک کند و همچنین به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود. اما باید توجه داشت که آثار کاهش خوفا در میزان انتشار آلاینده‌ها و صرفه‌جویی در سوخت، برای دوره‌ی کوتاه‌مدت قابل رؤیت هستند و آثار آن در درازمدت نامعلوم است. [۱۹] در خصوص خودروی خودران، چه اشتراکی و چه شخصی، مطالعات کمی در ایران صورت گرفته است، که بیشتر آن‌ها حول پذیرش و تأثیر در انتخاب شیوهی سفر، [۲۰] مفاهیم کلی خودروی خودران، [۲۱] هستند، و یا بر پارامترهایی مانند ظرفیت [۲۲] و یا وسیله‌ی کیلومتر طی شده، [۲۳] تمرکز دارند و به آثار زیست‌محیطی شیوهی سفر توجه کمتری شده است. این در حالی است که براساس آمار AQR^{۱۰}، میزان متوسط غلظت آلاینده‌های هوای ایران در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال ۲۰۱۹ با ۳۵٪ افزایش همراه بوده است. تغییر این روند نیازمند معرفی شیوهی سفرهایی است که از لحاظ تولید میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی عملکرد بهینه‌تر و از لحاظ مطلوبیت، قابل رقابت با خودروی شخصی باشند.

با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات گوناگونی با در نظر گرفتن ابعاد مختلف مسئله انجام شده است، که در بخش کنونی به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. در مطالعه‌ی حاضر، علاوه بر سناریوهایی چون نرخ نفوذ و اندازه‌ی ناوگان، با در نظر گرفتن ۳ سیاست اشتراک‌گذاری خودرو (که کمتر به آن‌ها توجه شده است)، حضور خوفا در شبکه به صورت کمی تحلیل شده است. همچنین، خودروهای خودران اشتراکی،

جدول ۱. ویژگی‌های مهم در تعریف شیوهی سفر.

تعریف	پیش فرض	ویژگی
قابلیت شتاب در این شیوهی حرکت (m/s^2)	۲٫۶	accel
قابلیت شتاب کاهشی در این شیوهی حرکت (m/s^2)	۴٫۵	decel
بیشینه‌ی کاهش شتاب فیزیکی ممکن برای این شیوهی حرکت (m/s^2)	۹	emergencyDecel
پارامتر مربوط به مدل تعقیب خودرو	۰٫۵	sigma
پارامتر مربوط به مدل تعقیب خودرو	۱	tau
جای خالی بعد از خودرو پیشگام (m)	۲٫۵	minGap
بیشینه‌ی سرعت (فنی) وسیله‌ی نقلیه (m/s)	۵۵٫۵۵ (۲۰۰ km/h)	maxSpeed
بیشینه‌ی سرعت موردنظر وسیله‌ی نقلیه (m/s)	۲۷٫۷۸ (۱۰۰ km/h)	desiredMaxSpeed
یک کلاس انتشار به‌طور پیش فرض از خودروی سواری بنزینی مطابق با استاندارد آلاینده‌ی ۴ EUR استفاده می‌شود.	PC_G-EU۴	emissionClass
مدل تعقیب خودروی استفاده شده	Krauss	carFollowModel
مدل تغییر خط استفاده شده	LC۲۰۱۳	laneChangeModel



شکل ۲. محدوده‌ی مطالعه شده، بخشی از منطقه‌ی دو شهرداری تهران.

شبیه‌سازی شده است. این شبکه با استفاده از پایگاه داده‌ی OpenStreetMap تعریف و در بازه‌ی زمانی ۲۵ دقیقه، ۶۵۰۰ سفر، که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و زمان بین ورودها به شبکه توزیع نمایی داشته است، شبیه‌سازی شده‌اند.

۲.۳. شیوهی سفرهای فرض شده

ویژگی‌های زیادی در تعریف یک شیوهی سفر نقش دارند، که تعدادی از آن‌ها که در مطالعه‌ی حاضر می‌توانند مهم باشند، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

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

۱.۲.۳. مدل‌های رفتار رانندگی

منطق رانندگی نشان می‌دهد که یک راننده در شرایط ترافیکی واقعی در دو جهت طولی و عرضی چگونگی رفتار می‌کند. در جهت طولی، راننده با پذیرش شکاف مناسب، سرعت مطلوب و شتاب دلخواه از خودروی پیشرو پیروی می‌کند. به عبارت دیگر، راننده باید فاصله‌ی مناسبی را نسبت به خودروی پیشرو حفظ کند و با توجه

کمتر در ایران بررسی و شبیه‌سازی شده‌اند. مطالعه‌ی حاضر با در نظر گرفتن بخشی از شبکه‌ی تهران، سعی بر پرکردن خلأ موجود داشته است.

۳. چارچوب مطالعه

ادبیات موضوع به‌طور واضح جهت تأثیر خودروهای خودران در شرایط ترافیکی را نشان می‌دهد. با این حال، گستردگی و ابعاد نسبی خودروهای خودران اشتراکی و همچنین وابستگی آثار آن‌ها به عوامل موقعیتی مختلف و اجرای خاص فناوری‌ها، نیازمند ابزارهای تحلیلی پیشرفته‌تر است. برای ارزیابی تأثیر خوا، که رفتار رانندگی را دگرگون می‌کند، معمولاً شبیه‌سازی خردنگر استفاده می‌شود.^[۲۵] به‌طور کلی، مدل‌های شبیه‌سازی در حمل و نقل را می‌توان به سه دسته‌ی: کلان‌نگر^{۱۱}، میان‌نگر^{۱۲} و خردنگر^{۱۳} تقسیم کرد.^[۲۶] مدل‌های کلان‌نگر توسط برنامه‌ریزان حمل و نقل برای مدیریت شبکه‌های ترافیکی در مقیاس بزرگ، مانند: بزرگراه‌ها، آزادراه‌ها، ازدحام ترافیک شهری، عملیات حمل و نقل انبوه و مدل‌های تقاضای سفر توسعه می‌یابند و بهره‌برداری می‌شوند. در مدل‌های شبیه‌سازی خردنگر، رفتار همه‌ی خودروهای متفرد در هر مرحله‌ی 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 خودروی دیگر می‌گیرد و این تصمیم‌ها در مدل شبیه‌سازی ثبت می‌شوند. مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده‌ی شبکه‌ی خیابان‌های شهری، تقاطع‌ها، حرکت‌های عابر پیاده، علائم ترافیکی، سیستم‌های چندوجهی^{۱۴}، معمولاً در دسته‌ی 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 به دست آمده در سطح خودرو، دقت کمتری دارد. از مدل‌های میان‌نگر معمولاً در روش‌های تحلیل برنامه‌ریزی حمل و نقل استفاده می‌شود.^[۱۸، ۱۷]

۱.۳. داده‌ی مربوط به تقاضا و محدوده‌ی مطالعه شده

در مطالعه‌ی حاضر، بخشی از منطقه‌ی دو کلان‌شهر تهران (شکل ۲) که دارای ۶۲۵۴ لیه و ۳۳۴۳ گره است، با استفاده از نرم‌افزار SUMO (یک نرم‌افزار خردنگر متن باز)

تحت پوشش حس‌گرها وجود نداشته باشد یا فاصله‌ی بین وسائط نقلیه بیش از ۱۲۰ متر باشد. در حالت کنترل سرعت، شتاب خودروی i در زمان $k + 1$ طبق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$a_{i,k+1} = k_1 (v_{des} - v_{i,k}) \quad (3)$$

که در آن، $a_{i,k+1}$ شتاب وسیله‌نقلیه‌ی i در زمان $k + 1$ است، v_{des} سرعت مطلوب، $v_{i,k}$ سرعت وسیله‌نقلیه‌ی i در زمان k و k_1 ضریب کنترل افزایش سرعت است، که در مطالعه‌ی حاضر برابر با 0.4 s^{-1} در نظر گرفته شده است. [۳۱]

۲. **کنترل شکاف:** در مدل کنترل شکاف، برای حفظ فاصله‌ی مطلوب بین خودرو با سیستم ACC و خودروی پیشرو از کنترل فاصله استفاده می‌شود. با فعال شدن کنترل فاصله، شتاب خودروهایی که مجهز به سیستم ACC هستند، توسط توابع انتقال مرتبه‌ی دوم، براساس انحراف سرعت و فاصله نسبت به خودروی پیشرو در مرحله‌ی بعدی $k + 1$ مطابق رابطه‌ی ۴ تعیین می‌شوند:

$$a_{i,k+1} = k_2 e_{i,k} + k_3 (v_{i-1,k} - v_{i,k}) \quad (4)$$

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 $k_2 = 0.23 \text{ s}^{-2}$ و $k_3 = 0.75 \text{ s}^{-1}$ است. [۳۲]

۳. **کنترل بسته‌شدن شکاف:** کنترل بسته‌شدن شکاف، زمانی که فاصله از خودروی پیشرو کمتر از 10^0 متر باشد با اصلاح پارامترهای رابطه‌ی ۴ به صورت $k_2 = 0.4 \text{ s}^{-2}$ و $k_3 = 0.8 \text{ s}^{-1}$ فعال می‌شود. زمانی که فاصله بین 10^0 تا 120^0 متر باشد، رویکرد کنترلی به صورت هموار به حالت قبلی باز می‌گردد. [۳۲] در مطالعه‌ی میلانز و شلادور^{۱۷} (۲۰۱۴)، رویکرد اخیر برای مدل‌سازی رفتار خودروی خودران توسعه یافته، اما کاملاً در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، برای شبیه‌سازی حرکت طولی خودروهای معمولی از مدل کراوس و برای خوفا از مدل ACC استفاده شده است.

رفتار تغییر خط در جاده‌های چندخطه، یکی دیگر از اجزاء اصلی مدل‌سازی رفتار خردنگر خودرو است. در واقع، مدل‌های تغییر خط، وظیفه‌ی انتخاب خط در جاده‌های چندخطه 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 بوده است که استفاده از مدل‌های تغییر خط مختلف برای خودروهای خودران، تأثیر ناچیزی در شرایط ترافیکی دارد. [۳۴] اما تغییر خط هوشمندانه‌تر در خودروهای خودران نسبت به خودروهای معمولی باعث کاهش اختلال و ناهمگونی می‌شود و در نتیجه شرایط ترافیکی را بهبود می‌بخشد. [۳۵] در مطالعه‌ی حاضر، مدل تغییر خط LC۲۰۱۳ برای خودروی معمولی، [۳۳] و از مدل SL۲۰۱۵ برای خوفا به صورت اصلاح‌شده، [۳۶] استفاده شده است.

۲.۲.۳. مدل‌های انتشار

کلاس انتشار، نشان‌دهنده‌ی یک حالت مشخص از انتشار آلاینده توسط وسیله‌نقلیه است، که براساس مدل‌های انتشار تعریف می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر برای خوفا از مدل خودروهای الکتریکی [۳۷] و برای خودروی معمولی، از مدل پیش‌فرض HBEFA۳/PC-G-EU۴ استفاده شده است، که یک خودروی سواری بنزینی با

به شرایط جاده و ترافیک، سرعت خود را تنظیم کند تا بتواند 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 خودروی تعقیب‌کننده در شرایط ترافیکی متفاوت، توسط پژوهشگران زیادی توصیف شده است. [۲۸] نرم‌افزار استفاده شده می‌تواند بر مبنای مدل‌های تعقیب گوناگونی، از جمله: مدل ویدمان، مدل راننده‌ی هوشمند، مدل کراوس شبیه‌سازی کند. در مطالعه‌ی حاضر از دو مدل تعقیب خودرو برای توصیف حرکت‌های طولی استفاده شده است.

-- **مدل کراوس:** مدل کراوس^{۱۵} (۱۹۹۷) بر مبنای سرعت ایمن خودروی تعقیب‌کننده ایجاد شده است. ایده‌ی اصلی تئوری تعقیب در مدل کراوس، وابستگی تغییر در سرعت وسیله‌نقلیه‌ی i به سرعت وسیله‌نقلیه‌ی 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 رابطه‌ی ۱ تعیین می‌شود:

$$V_{safe} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t) t_r}{\frac{v_l(t) - v_f(t)}{t_b} + t_r} \quad (1)$$

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

مدل کراوس، سرعت دیگری به نام سرعت مطلوب را نیز توصیف می‌کند، که برابر کمینه‌ی سرعت بین سرعت ایمن، بیشینه‌ی سرعت و سرعتی است که قابلیت‌های شتاب در محاسبه‌ی آن در نظر گرفته می‌شود (مطابق رابطه‌ی ۲): [۳۰]

$$v_{des} = \min[v_{max}, v + at, v_{safe}] \quad (2)$$

که در آن، v_{des} سرعت مطلوب، v_{max} بیشینه‌ی سرعت و a متوسط شتاب هستند.

-- **مدل ACC^{۱۶}:** 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 وسیله‌نقلیه‌ی پیشرو را دارند. در حضور وسیله‌نقلیه‌ی پیشرو، این سیستم‌ها با کنترل سرعت وسیله‌نقلیه براساس سرفاصله‌ی مطلوب به راننده کمک می‌کنند تا به طور ایمن‌تر در جریان ترافیک حرکت کند. سیستم‌های ACC در شرایط واقعی آزمایش و تأثیر آن‌ها در جریان ترافیک بررسی شده است. اما اگر وسیله‌نقلیه‌ی 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. [۲۰،۱۷] مدل ACC از سه رویکرد کنترلی برای تعقیب خودرو استفاده می‌کند، که عبارت‌اند از:

۱. **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 وسیله‌نقلیه‌ای در محدوده‌ی

جدول ۲. شیوهی سفرهای استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر.

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

* توزیع نرمال [$\langle \min \rangle$, $\langle \max \rangle$]; [$\langle \text{mean} \rangle$, $\langle \text{std} \rangle$]

جدول ۳. سناریوهای در نظر گرفته شده برای اثرسنجی خوفا.

سناریوی				
۱	۲	۳	۴	۵
سیاست اشتراک	انحصاری دوکاربر	انحصاری چندکاربر	-	-
اندازه‌ی ناوگان	۱۲	۸	۶	۴
نرخ نفوذ (%)	۰	۲۵	۵۰	۷۵

شخصی را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، اندازه‌ی ناوگان ۱۲ به معنای تعریف یک خوفا به ازاء هر ۱۲ خودروی شخصی است. به عبارت دیگر، به ازاء هر ۱۲ تقاضا برای سفر با خوفا، یک خوفا در شبکه تعریف می‌شود. این توصیف در سناریوهای نرخ نفوذ نیز برقرار است، به این معنی که عدد ۲۵ نشان می‌دهد که ۲۵٪ از تقاضا با شیوهی سفر خوفا انجام می‌شود.

در مطالعه‌ی حاضر با در نظر گرفتن ۴۹ سناریو به بررسی حضور خوفا در شبکه و آثار آن در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته و نتایج به دست آمده به صورت میانگین ۱۰ اجرا در هر سناریو (مجموع ۴۹۰ اجرا) در ادامه گزارش شده است.

۴. تحلیل نتایج

با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، که میزان انتشار آلاینده‌های CO و CO₂ را نشان می‌دهند؛ می‌توان نتیجه گرفت که حضور خوفا باعث کاهش انتشار دو گاز آلاینده‌ی CO و CO₂ می‌شود.

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر به نسبت عملکرد بهتری نسبت به سیاست اشتراک انحصاری داشته است؛ به طوری که در نرخ نفوذ ۷۵٪ و با اندازه‌ی ناوگان ۴، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری و سناریو پایه، میزان انتشار CO را به ترتیب حدود ۱۰ و ۸۱ درصد کاهش داده است. در مورد انتشار آلاینده‌ی CO₂ نیز همین روند مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، در سناریوی اخیر، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری و سناریو پایه، میزان انتشار آلاینده‌ی CO₂ را به ترتیب حدود ۴ و ۷۸ درصد کاهش داده است.

درواقع، دلیل ایجاد این اثر می‌تواند به علت نقش خوفا در تسهیل ترافیک باشد. با توجه به ویژگی‌های در نظر گرفته شده برای خوفا، حضور شیوهی سفر خوفا در شبکه

استاندارد یورو ۴ بوده و با استفاده از حالت مبتنی بر HBEFA۳ مدل‌سازی شده است.^[۳۸]

کتابچه‌ی راهنمای عوامل انتشار برای حمل و نقل جاده‌یی، یک برنامه‌ی پایگاه داده مایکروسافت است، که عوامل انتشار را برای همه‌ی دسته‌های فعلی وسائط نقلیه‌ی جاده‌یی، از جمله خودروهای مسافری، وسائط نقلیه‌ی سبک، وسائط نقلیه‌ی سنگین، اتوبوس‌ها و موتورسیکلت‌ها ارائه می‌کند. عوامل مذکور شامل انتشار گازهای گلخانه‌ای خاص بر حسب گرم در کیلومتر برای همه‌ی آلاینده‌ها و همچنین برای مصرف سوخت هستند. عوامل انتشار براساس شبیه‌سازی تعداد زیادی از موقعیت‌های رانندگی، توسط یک مدل انتشار لحظه‌ای مبتنی بر نقشه‌ی انتشار محاسبه می‌شوند. این مدل میزان مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی توسط وسائط نقلیه‌ی جاده‌ای را براساس دینامیک طولی خودرو و نقشه‌های انتشار محاسبه می‌کند.^[۳۸] در مدل خودروهای الکتریکی، فرض می‌شود که انرژی خودرو از جمع مؤلفه‌های 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 (مطابق رابطه‌ی ۵):

$$E_{veh} [k] = E_{kin} [k] + E_{pot} [k] + E_{rot,int} [k] = \frac{m}{\gamma} \cdot v^2 [k] + m \cdot g \cdot h [k] + \frac{j_{int}}{\gamma} \cdot v^2 [k] \quad (5)$$

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 هستند. در مطالعه‌ی حاضر، به صورت کلی دو شیوهی سفر خودروی معمولی و خوفا در نظر گرفته شده است، که پارامترهای تعریف شده‌ی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

۳.۳. سناریوهای شبیه‌سازی

سناریوهای فرض شده در سه بُعد مختلف لحاظ شده‌اند: ۱. سیاست اشتراک، ۲. نرخ نفوذ و ۳. اندازه‌ی ناوگان که در جدول ۳ ارائه شده‌اند. سیاست‌های به اشتراک‌گذاری خوفا در ۳ حالت تعریف می‌شوند:

-- **انحصاری:** در سیاست انحصاری، خودرو براساس 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. سیاست انحصاری، اشتراک سواری ندارد 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 مبدأ 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 کاربر دیگر با مبدأ و مقصد مشابه با توجه به محدودیت ظرفیت خودرو به آن‌ها سرویس می‌دهد.

با توجه به ادبیات پژوهش، هر خوفا می‌تواند جایگزین ۳ تا ۱۲ خودروی شخصی شود؛^[۳۵] در نتیجه، نرخ جایگزینی خوفا با خودروهای شخصی در مطالعه‌ی حاضر، مقادیر ۴، ۶، ۸ و ۱۲ فرض شده است؛ که نرخ جایگزینی خوفا با خودروهای

جدول ۶. تراکم متوسط در شبکه در کمان‌های پُرازدحام برای سناریوهای مختلف: اندازه‌ی ناوگان و سیاست اشتراک (وسیله بر کیلومتر).

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

جدول ۷. سرعت متوسط در شبکه در کمان‌های پُرازدحام برای سناریوهای مختلف: اندازه‌ی ناوگان و سیاست اشتراک (کیلومتر بر ساعت).

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

جدول ۸. حجم متوسط در شبکه در کمان‌های پُرازدحام برای سناریوهای مختلف: اندازه‌ی ناوگان و سیاست اشتراک (وسیله بر ساعت).

پایه	انحصاری چند کاربر	انحصاری دو کاربر	انحصاری	اندازه‌ی ناوگان	
				انحصاری	انحصاری
۳۹۲۴	۲۸۰۰	۳۴۰۲	۳۷۰۵	۴	۴
	۲۵۰۱	۲۹۶۷	۳۲۵۳	۶	۶
	۲۳۳۲	۲۷۲۸	۲۸۱۶	۸	۸
	۱۵۱۸	۱۹۷۸	۲۴۳۸	۱۲	۱۲

اندازه‌ی ناوگان ۴ نسبت به اندازه‌ی ناوگان ۱۲، متوسط تراکم در مسیرهای پُرازدحام را ۱۷۴٪ افزایش داده است. به عبارتی دیگر، افزایش ناوگان هر چند می‌تواند مزایایی از جمله کاهش زمان انتظار را به دنبال داشته باشد، اما با افزایش تراکم و حجم در کمان در نهایت موجب افزایش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. به عنوان مثال، در سیاست اشتراک انحصاری با نرخ نفوذ ۵۰٪، اندازه‌ی ناوگان ۴ به نسبت اندازه‌ی ناوگان ۱۲، میزان انتشار CO_2 را حدود ۱۸٪ افزایش داده است؛ که می‌توان آن را در سایر سیاست‌های اشتراک نیز مشاهده کرد. ترافیک و صف‌های طولانی در جاده‌ها برای کاربران ناخوشایند هستند و ممکن است به آثار روانی نامطلوبی، مانند: استرس، خستگی و عدم تمرکز منجر شوند. همچنین، انتظار در صف‌های ترافیکی می‌تواند منجر به افزایش مصرف سوخت و انرژی شود و در نتیجه آلاینده‌های هوا را افزایش دهد. بنابراین، کاهش ترافیک و صف‌های طولانی می‌تواند به کاهش میزان آلاینده‌ها و مصرف انرژی کمک کند. تأثیر خوا در طول صف به سیاست اشتراک و اندازه‌ی ناوگان بستگی دارد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، براساس قسمت الف، اشتراک سواری با افزایش دسترسی موجب کاهش طول صف و زمان سفر کل در شبکه شده است. همین امر موجب شده است که اشتراک سواری در تولید انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی عملکرد بهتری داشته باشد. در قسمت ب، نیز تأثیر اندازه‌ی ناوگان در طول صف مشاهده می‌شود. افزایش اندازه‌ی ناوگان هر چند زمان سفر کل در شبکه را به نحو چشمگیری کاهش می‌دهد، اما افزایش طول صف می‌تواند اثر نامناسبی در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. به‌طور کلی، عامل اصلی کاهش میزان انتشار ناشی از حضور خوا، استفاده‌ی شیوه‌ی سفر خوا از

جدول ۴. میزان انتشار آلاینده‌ی مونواکسید کربن (CO) بر حسب کیلوگرم بر ساعت (در سناریوهای مختلف: اندازه‌ی ناوگان، سیاست اشتراک و نرخ نفوذ).

سیاست اشتراک	اندازه ناوگان				نرخ نفوذ
	۱۲	۸	۶	۴	
انحصاری	- / -	- / -	- / -	- / -	۱۰۰
	۱ / ۹	۳ / ۳	۳ / ۵	۳ / ۰	۷۵
	۴ / ۷	۵ / ۱	۵ / ۶	۶ / ۹	۵۰
	۸ / ۴	۹ / ۱	۹ / ۵	۱۱ / ۰	۲۵
انحصاری دو کاربر	- / -	- / -	- / -	- / -	۱۰۰
	۱ / ۸	۲ / ۱	۲ / ۳	۲ / ۷	۷۵
	۴ / ۵	۴ / ۸	۵ / ۲	۶ / ۴	۵۰
	۸ / ۳	۸ / ۸	۹ / ۲	۱۰ / ۱	۲۵
انحصاری چند کاربر	- / -	- / -	- / -	- / -	۱۰۰
	۱ / ۹	۲ / ۳	۲ / ۴	۳ / ۰	۷۵
	۴ / ۵	۵ / ۰	۵ / ۳	۶ / ۴	۵۰
	۸ / ۳	۹ / ۱	۹ / ۳	۱۰ / ۴	۲۵
پایه	۱۴ / ۱	۱۴ / ۱	۱۴ / ۱	۱۴ / ۱	
- / -	۱۵ kg				

جدول ۵. میزان انتشار آلاینده‌ی دی‌اکسید کربن (CO_2) بر حسب کیلوگرم بر ساعت (در سناریوهای مختلف: اندازه‌ی ناوگان، سیاست اشتراک و نرخ نفوذ).

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

می‌تواند به‌طور قابل توجهی آثار متفاوتی در ترافیک داشته باشد. در جدول‌های ۶ الی ۸، سه شاخص اصلی برای سنجش وضعیت ترافیک، یعنی سرعت، تراکم و حجم ارائه شده است، که براساس اندازه‌ی ناوگان و سیاست اشتراک در نرخ نفوذ ۱۰۰٪ تفکیک شده‌اند. با توجه به جدول‌های ذکر شده، استفاده از اشتراک سواری و ارائه‌ی خدمات هم‌زمان خوا با بیش از یک کاربر، تراکم در شبکه را کاهش داده است؛ که سبب بهبود سرعت متوسط در شبکه و کاهش صف شده است. این امر باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از ترافیک نیز شده است. به عبارت دیگر، استفاده از اشتراک سواری می‌تواند به بهبود وضعیت ترافیک، کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی شهروندان کمک کند. به عنوان مثال، در اندازه‌ی ناوگان ۴، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به حالت پایه، تراکم و سرعت متوسط را به ترتیب ۲۵٪ کاهش و ۱۷٪ افزایش داده است.

در مقابل می‌توان گفت اندازه‌ی ناوگان با میزان انتشار، رابطه‌ی مستقیم دارد و دلیل آن را می‌توان در جدول‌های ۷ و ۸ مشاهده کرد. در سیاست اشتراک انحصاری،

	انحصاری	انحصاری دو کاربر	انحصاری چند کاربر
۱۲	صفر	صفر	صفر
۸	صفر	صفر	صفر
۶	صفر	صفر	صفر
۴	صفر	صفر	صفر
۱۲	۲/۲۳	۱/۷۶	۱/۹۷
۸	۲/۱	۱/۷	۱/۸۷
۶	۱/۹۸	۱/۷۱	۱/۸۷
۴	۱/۹۵	۱/۶۴	۱/۷۷
۱۲	۳/۹۹	۳/۱۷	۳/۴۸
۸	۳/۸۲	۳/۰۷	۳/۳۸
۶	۳/۶۶	۳/۰	۳/۲۷
۴	۳/۶	۲/۹	۳/۱
۱۲	۵/۶۳	۴/۳۶	۴/۸۴
۸	۵/۴۸	۴/۲۷	۴/۶۲
۶	۵/۲۲	۴/۱۷	۴/۵
۴	۵/۱۷	۴/۰۷	۴/۲۷
۱۲	۷/۳۳	۵/۵۲	۶/۲
۸	۷/۱	۵/۴۳	۵/۸۷
۶	۶/۹۳	۵/۳۴	۵/۶۱
۴	۶/۷۵	۵/۱۸	۵/۳۸

پایه ۲۵٪ ۵۰٪ ۷۵٪ ۱۰۰٪

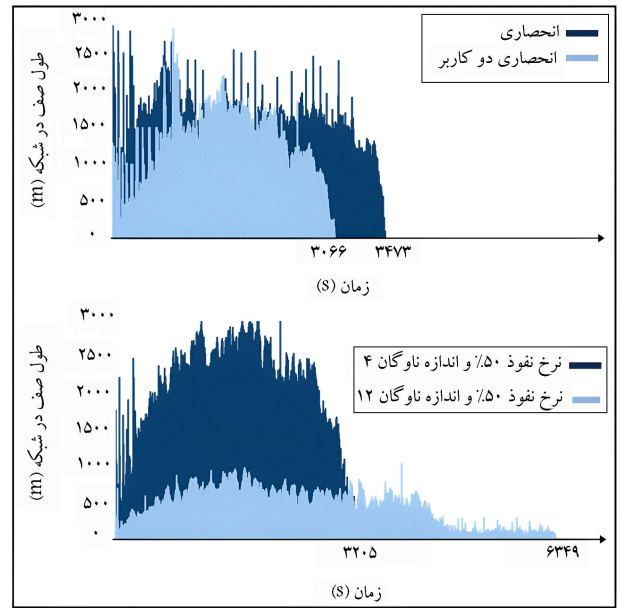
شکل ۵. میزان مصرف الکتریسیته (مگاوات ساعت) براساس اندازه‌ی ناوگان.

ناوگان ۴، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری و سناریوی پایه، میزان مصرف سوخت را به ترتیب حدود ۴ و ۷۸ درصد کاهش داده است. در مورد اندازه‌ی ناوگان می‌توان گفت که با افزایش اندازه‌ی 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٪ و اندازه‌ی ناوگان ۴، میزان مصرف سوخت نسبت به اندازه‌ی ناوگان ۱۲، ۱۸٪ افزایش یافته است. در خوخا که نیروی محرکه از انرژی الکتریسیته به‌دست می‌آید، میزان مصرف انرژی می‌تواند مهم باشد. در شکل ۵، میزان مصرف انرژی توسط خوخا در سناریوهای مختلف مشاهده می‌شود. روشن است با افزایش نرخ نفوذ، میزان مصرف الکتریسیته بیشتر شده و دلیل آن افزایش تعداد سفرهای انجام‌شده با استفاده از شیوه‌ی سفر خوخا بوده است. در مورد سیاست‌های اشتراک، سناریوهای دارای اشتراک سواری، عملکرد بهتری داشته‌اند. در نرخ نفوذ ۱۰٪ و با اندازه‌ی ناوگان ۴، سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر نسبت به سیاست اشتراک انحصاری میزان مصرف را ۲۳٪ کاهش داده است. در ارتباط با اندازه‌ی ناوگان می‌توان گفت که افزایش ناوگان با افزایش دسترسی و کاهش وسیله‌ی کیلومتر طی‌شده،^[۲۳] میزان مصرف انرژی الکتریسیته را کاهش داده است. به‌طوری‌که در سیاست اشتراک انحصاری چند کاربر در نرخ نفوذ ۱۰٪ و اندازه‌ی ناوگان ۴ نسبت به اندازه‌ی ناوگان ۱۲، میزان مصرف انرژی ۱۳٪ کاهش یافته است.

به‌طور خلاصه در جدول ۹، آثار زیست‌محیطی حضور خوخا در شبکه را می‌توان مشاهده کرد، که با توجه به سناریوهای مختلف نرخ نفوذ، سیاست اشتراک و اندازه‌ی ناوگان تفکیک شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

حمل‌ونقل به‌عنوان یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شود، که افزایش روزافزون جمعیت، این موضوع را نگران‌کننده‌تر می‌کند. در مطالعه‌ی حاضر 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



شکل ۳. تأثیر سیاست اشتراک و اندازه‌ی ناوگان در نحوه‌ی تأثیرگذاری خوخا در طول صف در شبکه.

	انحصاری	انحصاری دو کاربر	انحصاری چند کاربر
۱۲	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴
۸	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴
۶	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴
۴	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴	۲۴۷/۸۴
۱۲	۱۶۸/۷۳	۱۷۱/۴۸	۱۶۷/۹۶
۸	۱۷۳/۶۶	۱۷۱/۶۴	۱۷۵/۱۷
۶	۱۷۷/۸۹	۱۷۷/۶۴	۱۷۶/۴۷
۴	۱۸۹/۶۲	۱۸۲/۲۶	۱۸۶/۴۳
۱۲	۱۰۳/۵۲	۱۰۲/۰۷	۱۰۲/۲۷
۸	۱۰۵/۸۱	۱۰۴/۷۶	۱۰۵/۹۹
۶	۱۱۱/۱۹	۱۰۷/۷۵	۱۰۸/۶۷
۴	۱۲۱/۹۵	۱۱۷/۴	۱۱۷/۷۱
۱۲	۴۷/۱۹	۴۶/۸	۴۷/۰۸
۸	۴۹/۸۹	۴۹/۲۴	۵۰/۰۲
۶	۵۳/۴۷	۵۰/۹۵	۵۱/۹۸
۴	۵۶/۹	۵۴/۶	۵۵/۰۶
۱۲	صفر	صفر	صفر
۸	صفر	صفر	صفر
۶	صفر	صفر	صفر
۴	صفر	صفر	صفر

پایه ۲۵٪ ۵۰٪ ۷۵٪ ۱۰۰٪

شکل ۴. میزان مصرف سوخت فسیلی (کیلوگرم) براساس اندازه‌ی ناوگان.

انرژی پاک به‌عنوان نیروی مولد حرکتی است. با افزایش استفاده از خوخا به جای وسائط نقلیه‌ی شخصی، تعداد وسائط نقلیه‌ی معمولی در سیستم کاهش می‌یابد و همین امر موجب کاهش میزان انتشار در محیط زیست می‌شود. در واقع، در صورتی که نرخ نفوذ کامل شود و همه‌ی افراد از خوخا استفاده کنند، میزان آلودگی به سمت صفر میل خواهد کرد. علاوه‌بر میزان انتشار، مصرف سوخت در شبکه‌ی حمل‌ونقل نیز می‌تواند شاخصی از کارایی شبکه باشد. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ نفوذ خوخا، میزان مصرف سوخت توسط خودروهای معمولی کاهش یافته و در نرخ نفوذ ۱۰٪، میزان مصرف سوخت فسیلی صفر شده است. در مورد سیاست‌های اشتراک خودرو می‌توان گفت که سیاست اشتراک انحصاری دو کاربر به نسبت عملکرد بهینه‌تری داشته است. به‌طوری‌که در سناریوی ۷۵٪ با اندازه‌ی

جدول ۹. تأثیر سناریوهای فرض‌شده‌ی نرخ نفوذ، سیاست اشتراک، و اندازه‌ی ناوگان در انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان مصرف انرژی.

سناریو	انتشار گازهای گلخانه‌ای	تأثیر در میزان مصرف انرژی
نرخ نفوذ	نرخ نفوذ، تأثیر چشمگیری دارد. به‌طوری‌که در نرخ نفوذ ۱۰٪ میزان انتشار به سمت 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٪ میزان انتشار را کاهش می‌دهد.	اشتراک سواری میزان مصرف سوخت فسیلی و انرژی الکتریکی را به ترتیب تا ۵ و ۲۳ درصد کاهش می‌دهد.
اندازه‌ی ناوگان	افزایش اندازه‌ی ناوگان مصرف سوخت فسیلی را تا ۱۸٪ و مصرف انرژی الکتریکی را تا ۵۸٪ افزایش می‌دهد.	سوخت فسیلی را تا ۲۰٪ افزایش و مصرف انرژی الکتریکی را تا ۱۳٪ کاهش می‌دهد.

نتایج به‌دست‌آمده، تأییدکننده‌ی نتایج مطالعات پیشین مبنی بر پتانسیل خواخا برای کاهش سهم سیستم حمل‌ونقل از میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و میزان مصرف انرژی است. برخلاف نتیجه‌ی لوخاندولا و کای^{۱۸} (۲۰۱۸)،^[۶] خواخا بدون اشتراک سواری در صورت الکتریکی‌بودن هم می‌تواند میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی را کاهش دهد. مشابه نتیجه‌ی سالزار و همکاران^{۱۹} (۲۰۱۸)،^[۱۸] حضور خواخا در شبکه با کاهش ازدحام می‌تواند عاملی تأثیرگذار در میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی باشد. عوامل زیادی در عملکرد خواخا تأثیر دارند. فرض‌های در نظر گرفته‌شده در ارتباط با هر یک از عوامل مذکور می‌توانند با تغییر نتایج مطالعه همراه باشند. لذا در مقایسه‌ی نتایج مطالعات مختلف، باید به فرض‌های مسئله توجه شود. یکی از عوامل اخیر، متصل‌بودن خودرو است، که این اتصال ممکن است با خودروهای دیگر و یا با زیرساخت باشد. متصل‌بودن خودرو می‌تواند مدل‌های تعقیب، تغییرخط و رفتار خودرو در تقاطع را دست‌خوش تغییر کند. مطالعه‌ی حاضر با فرض عدم اتصال خواخا انجام شده است، که در نظرنگرفتن این فرض می‌تواند مبنای مطالعات بعدی باشد.

از موارد دیگری که می‌تواند محور مطالعات آتی باشد، نحوه‌ی تخصیص خودرو و سیاست اشتراک است. در مطالعه‌ی حاضر، اولویت تخصیص خواخا به کاربرانی بوده است که زودتر درخواست داده باشند، بدون توجه به فاصله‌ی آن‌ها به نزدیک‌ترین خودرو. در حالی که این امکان وجود دارد که بدون اولویت‌بندی براساس زمان درخواست، هر خودرو به نزدیک‌ترین کاربر تخصیص داده شود. در ارتباط با سیاست اشتراک، در مطالعه‌ی حاضر هیچ حدی برای زمان انتظار کاربر برای رسیدن نزدیک‌ترین خواخا در نظر گرفته نشده است. به‌عبارتی دیگر، می‌توان با فرض زمان پیشینه‌ی انتظار، اندازه‌ی ناوگان خواخا را در مطالعات آتی بهینه ساخت.

در مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته شده است. مطالعه‌ای که با در نظر گرفتن ۶۵۰۰ سفر در مدت زمان ۲۵ دقیقه در بخشی از شهر تهران، خلأ مطالعاتی موجود، یعنی بررسی حضور خواخا در شبکه‌ی معابر شهری در ایران با نگاهی زیست‌محیطی را پر می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که:

۱. با افزایش نرخ نفوذ خواخا 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 اندازه‌ی ناوگان خواخا می‌تواند منجر به افزایش میزان انتشار شود، به‌خصوص در سناریوهایی که هر دو شیوه‌ی سفر خواخا و خودروی معمولی حضور دارند.
۴. با افزایش نرخ نفوذ، تعداد وسائط‌نقلیه‌ی معمولی کمتر خواهد شد و همین امر می‌تواند به کاهش مصرف سوخت فسیلی و افزایش مصرف الکتریکی منجر شود.
۵. سیاست اشتراک سواری با کاهش ازدحام و طول صف، می‌تواند میزان مصرف سوخت فسیلی و انرژی الکتریکی را نسبت به سناریوی فقط اشتراک خودرو کاهش دهد.
۶. اندازه‌ی ناوگان می‌تواند تأثیر متفاوتی در مصرف سوخت داشته باشد. به‌عنوان مثال، افزایش اندازه‌ی ناوگان به دلیل افزایش ازدحام باعث افزایش میزان مصرف سوخت فسیلی خواهد شد، اما با بیشترکردن دسترسی و کاهش وسیله‌ی کیلومتر طی‌شده‌ی خالی، می‌تواند مصرف انرژی الکتریکی را کاهش دهد.

پانوشتها

1. Range Anxiety
2. On-Demand Shared Systems
3. Shared Autonomous Vehicles
4. National Household Travel Survey

5. Shoup
6. Lokhandwala & Cai
7. Ride-Sharing
8. Jones & Leibowicz
9. Salazar
10. Air Quality Report
11. Macroscopic

12. Mesoscopic
13. Microscopic
14. Multi-modal Systems
15. Krauß
16. Adaptive Cruise Control
17. Milanès & Shladover
18. Lokhandwala & Cai

منابع (References)

1. Fuller, R., Landrigan, P.J., Balakrishnan, H., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S. and Brauer, M., 2022. Pollution and health: A progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), pp. e535-e547. DOI: 10.1016/S2542-5196(22)00090-0.
2. World Bank, 2022. *The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021*. The World Bank Group, 89 p. DOI: 10.1596/978-1-4648-1816-5.
3. Zehnder, C., Manoylov, K. and Mutiti, S., 2018. *Introduction to Environmental Science*. 2nd Edition, Kendall Hunt Publishing Company.
4. Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P., 2020. CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our world in data*. <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>.
5. Raouf, M., Abedini, R., Omidkhah, M. and Nezhad-moghadam, E., 2020. A favored CO₂ separation over light gases using mixed matrix membrane comprising polysulfone/polyethylene glycol and graphene hydroxyl nanoparticles. *Process Safety and Environmental Protection*, 133, pp.394-407. DOI: 10.1016/J.PSEP.2019.11.002.
6. Lokhandwala, M. and Cai, H., 2018. Dynamic ride sharing using traditional taxis and shared autonomous taxis: A case study of NYC. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 97, pp. 45-60. DOI: 10.1016/J.TRC.2018.10.007.
7. Bauer, G.S., Greenblatt, J.B. and Gerke, B.F., 2018. Cost, energy, and environmental impact of automated electric taxi fleets in Manhattan. *Environmental Science & Technology*, 52(8), pp. 4920-4928. DOI: 10.1021/acs.est.7b04732.
8. Chen, T.D., Kockelman, K.M. and Hanna, J.P., 2016. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, pp. 243-254. DOI: 10.1016/j.tra.2016.08.020.
9. Broadbent, G.H., Metternicht, G.I. and Wiedmann, T.O., 2021. Increasing electric vehicle uptake by updating public policies to shift attitudes and perceptions: Case study of New Zealand. *Energies*, 14(10), pp. 1-20. DOI: 10.3390/en14102920.
10. Arbib, J. and Seba, T., 2017. *Rethinking Transportation 2020-2030: The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-Combustion Vehicle and Oil Industries*. RethinkX, 162 p.
11. Santos, A., McGuckin, N., Nakamoto, H.Y., Gray, D. and Liss, S., 2011. *Summary of Travel Trends: 2009 National Household Travel Survey*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 83 p. <https://nhts.ornl.gov/2009/pub/stt.pdf>.
12. Caulfield, B., 2009. Estimating the environmental benefits of ride-sharing: A case study of Dublin. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(7), pp. 527-531. DOI: 10.1016/J.TRD.2009.07.008.
13. Vleugel, J.M. and Bal, F., 2018. More space and improved living conditions in cities with autonomous vehicles. *International Journal of Design & Nature and Eco-dynamics*, 12(4), pp. 505-515. DOI: 10.2495/DNE-V12-N4-505-515.
14. Fulton, L.M., 2018. Three revolutions in urban passenger travel. *Joule*, 2(4), pp. 575-578. DOI: 10.1016/j.joule.2018.03.005.
15. Shoup, D.C., 2006. Cruising for parking. *Transport Policy*, 13(6), pp. 479-486. DOI: 10.1016/j.tranpol.2006.05.005.
16. Fagnant, D.J. and Kockelman, K.M., 2014. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, pp. 1-13. DOI: 10.1016/J.TRC.2013.12.001.
17. Jones, E.C. and Leibowicz, B.D., 2019. Contributions of shared autonomous vehicles to climate change mitigation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, pp. 279-298. DOI: 10.1016/j.trd.2019.05.005.
18. Salazar, M., Rossi, F., Schiffer, M., Onder, C.H. and Pavone, M., 2018. On the interaction between autonomous mobility-on-demand and public transportation systems. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, pp. 2262-2269. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569381.
19. Milakis, D., Van Arem, B. and Van Wee, B., 2017. Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21(4), pp. 324-348. [In Persian]. DOI: 10.1080/15472450.2017.1291351.
20. Afandizadeh, Sh., Jafari, R. and Kalantari, N., 2021. 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). *Journal of Transportation Research*, 18(3), pp. 29-40. [In Persian].
21. Asaiesh, Sh. and Hemati, S., 2020. The investigation and evaluation of the performance of autonomous vehicles and their role in intelligent transportation systems. *Presented at the 6th National Congress of Civil Engineering, Architecture, and Urban Development*, Tehran. [In Persian].
22. Karbasi, A. and Saffarzadeh, M., 2022. Investigating the effect of automated vehicles and connected and automated vehicles on the capacity of freeways using microscopic simulation. *Journal of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology*, 54(5), pp. 1691-1704. [In Persian].
23. Rahmani, A. and Mamdoohi, A.R., 2023. 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].
24. Ariana, R., 2022. *World Air Quality Report*. IQAir, 47 p. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-india-stateless/2023/03/2fe33d7a-2022-world-air-quality-report.pdf>.
 25. Narayanan, S., Chaniotakis, E. and Antoniou, C., 2020. Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111, pp. 255-293. DOI: 10.1016/j.trc.2019.12.008.
 26. Ahmed, H.U., Huang, Y. and Lu, P., 2021. A review of car-following models and modeling tools for human and autonomous-ready driving behaviors in micro-simulation. *Smart Cities*, 4(1), pp. 314-335. DOI: 10.3390/SMARTCITIES4010019.
 27. Lochrane, T., 2014. A new multidimensional psychophysical framework for modeling car-following in a free-way work zone. *Electronic Theses and Dissertations*, 4592. University of Central Florida.
 28. Hoogendoorn, S.P. and Hoogendoorn, R., 2010. Generic calibration framework for joint estimation of car-following models by using microscopic data. *Transportation Research Record*, 2188(1), pp. 37-45. DOI: 10.3141/2188-05.
 29. Krauß, S., 1998. Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. *Engineering, Environmental Science*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:111793371>.
 30. Song, J., Wu, Y., Xu, Z. and Lin, X., 2014. Research on car-following model based on SUMO. In *The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology*, IEEE, pp. 47-55. DOI: 10.1109/ICAIT.2014.7019528.
 31. Milanés, V. and Shladover, S.E., 2014. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, pp. 285-300. DOI: 10.1016/J.TRC.2014.09.001.
 32. Xiao, L., Wang, M. and Van Arem, B., 2017. Realistic car-following models for microscopic simulation of adaptive and cooperative adaptive cruise control vehicles. *Transportation Research Record*, 2623(1), pp. 1-9. DOI: 10.3141/2623-01.
 33. Erdmann, J., 2015. SUMO's lane-changing model, In *Modeling Mobility with Open Data: 2nd SUMO Conference 2014 Berlin, Germany*. Springer International Publishing, pp. 105-123. DOI: 10.1007/978-3-319-15024-6_7.
 34. Liu, Y., Guo, J., Taplin, J. and Wang, Y., 2017. Characteristic analysis of mixed traffic flow of regular and autonomous vehicles using cellular automata. *Journal of Advanced Transportation*, 2017(1), pp. 1-10. DOI: 10.1155/2017/8142074.
 35. Al-Turki, M., Ratrouf, N.T., Rahman, S.M. and Reza, I., 2021. Impacts of autonomous vehicles on traffic flow characteristics under mixed traffic environment: Future perspectives. *Sustainability*, 13(19), pp. 11052. DOI: 10.3390/su131911052.
 36. Mintsis, E., Koutras, D., Porfyri, K., Mitsakis, E., Lücken, L., Erdmann, J., Floetteroed, Y., Alms, R., Rondinone, M. and Maerivoet, S., 2018. Modelling, simulation and assessment of vehicle automations and automated vehicles' driver behaviour in mixed traffic. *TransAID Deliverable*.
 37. Krumnow, M. and Kretschmer, A., 2014. Real-time simulations based on live detector data—experiences of using SUMO in a traffic management system. In *Simulation of Urban Mobility: First International Conference, SUMO 2013, Berlin, Germany, 2013. Revised Selected Papers 1*, pp. 136-145. DOI: 10.1007/978-3-662-45079-6-10.
 38. Keller, M., Hausberger, S., Matzer, C., Wüthrich, P. and Notter, B., 2017. HBEFA Version 3.3, Hintergrundbericht. *INFRAS, Bern, Schweiz*.