بررسی سیاست‌های رفتاری برای کاهش انتشار از خودروهای سبک شهری (مطالعه موردی: منطقه ۱۳ شهر تهران)

مقاله علمی – پژوهشی

محمد عرفان درکی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
اکرم عوامی*، دانشیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
زهرا برزگر، استادیار، گروه مطالعات محیط زیست، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، تهران، ایران
بهرام ملک محمدی، دانشیار، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: avami@sharif.edu

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵– پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
صفحه ۴۷۶-۴۶۱

چکیده

این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌سازی مبتنی بر عامل در ابزار MATSim، به بررسی سناریوهای رفتاری و تاثیر این سناریوها بر ترافیک و انتشار آلاینده‌ها در منطقه ۱۳ شهر تهران بررسی کرده است برای این مطالعه، ابتدا جمعیت مصنوعی منطقه سیزده با حفظ ویژگی‌های جمعیتی توسعه داده شد و سپس با استفاده از مدل سازی عامل بنیان سناریوهای رفتاری شبیه‌سازی شدند و انتشارات هر سناریو محاسبه شد. نتایج نشان داد که سناریوی دورکاری با کاهش چشمگیر تردد وسایل نقلیه و آلاینده‌هایی نظیر CO_2، NOx، SO_2 و $PM_{2.5}$، مؤثرترین راهکار برای بهبود کیفیت هوا و کاهش ترافیک است. در مقابل، ساعات کاری منعطف به دلیل ایجاد سفرهای جانبی، تأثیر محدودی بر کاهش آلودگی هوا داشت و حتی در برخی موارد منجر به افزایش انتشار آلاینده‌ها شد. در برخی موارد حتی منجر به افزایش انتشار آلاینده‌ها نظیر CO_2 تا ۹٪ شد. توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری نیز با کاهش وابستگی به خودروهای شخصی، توانست انتشار CO_2 را تا ۲۶٪ کاهش دهد و سهم استفاده از دوچرخه را به ۵۱٫۶٪ برساند. این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب سیاست‌های مدیریت تقاضای سفر با توسعه زیرساخت‌های پایدار، نظیر دوچرخه‌سواری و حمل‌ونقل عمومی پاک، می‌تواند به کاهش معنادار آلودگی و ترافیک در شهرهای پرتراکم منجر شود.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی عامل بنیان، سناریوهای رفتاری، آلودگی، ذرات معلق، ترافیک

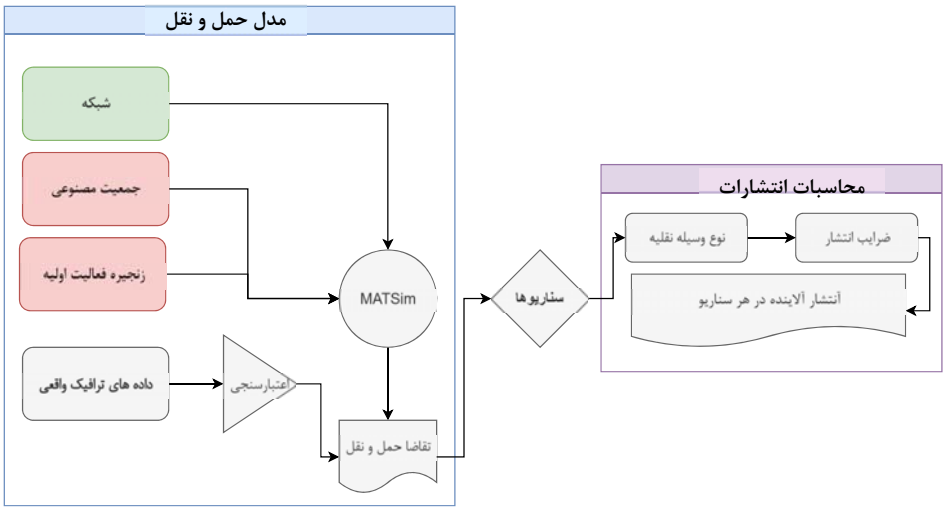
۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، گسترش بی‌رویه مناطق شهری و افزایش حجم سفرهای درون‌شهری، برنامه‌ریزی در حوزه حمل‌ونقل را با چالش‌های جدی روبه‌رو ساخته است. رشد جمعیت و تمرکز فعالیت‌های اقتصادی در کلان‌شهرهایی مانند تهران، مستلزم اتخاذ رویکردهایی است که علاوه بر تأمین نیازهای جابه‌جایی، کمترین اثرات مخرب زیست‌محیطی و بیشترین کارایی انرژی را به همراه داشته باشد. به همین دلیل، سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل باید به‌گونه‌ای باشد که هم‌زمان با پاسخ‌گویی به تقاضای فزاینده سفر، اهداف توسعه پایدار را نیز محقق سازد. اهمیت این رویکرد زمانی برجسته‌تر می‌شود که بدانیم مشکلات ترافیکی و ازدحام، افزون بر ایجاد آلودگی هوا، خطرات ایمنی و اختلال در کارایی حمل‌ونقل را نیز در پی دارند (Babaei et al., 2023). تعهد به پایداری و هم‌سویی با اهداف توسعه پایدار (SDGs) در نتیجه، مدیریت ماهرانه ترافیک و کاهش ازدحام برای ایجاد مناطق شهری دوستدار محیط زیست و هم‌راستا با توسعه پایدار، بسیار حائز اهمیت است (Avami &

Boroushaki, 2011). در ادبیات پژوهشی، بخشی از مطالعات بر حوزه‌هایی نظیر پیش‌بینی تقاضای سوخت، تغییر ناوگان خودرویی و بهبود جریان ترافیک متمرکز شده‌اند، اما نقش سیاست‌های رفتاری در کاهش آلاینده‌های خودروهای سبک، به‌ویژه در مناطق شهری خاص مانند منطقه ۱۳ تهران، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. ازاین‌رو، مطالعه حاضر قصد دارد با تمرکز بر ارزیابی مداخلات رفتاری در محدوده‌ای مشخص، این خلأ پژوهشی را برطرف کند. توسعه پایدار و تعهد به اهداف آن در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، تأکید دارد که علاوه بر پاسخ‌گویی به تقاضای سفر، اقدامات عملی برای مدیریت ترافیک و کنترل ازدحام صورت گیرد(Lu et al., 2022). سیستم‌های حمل‌ونقلی طی چند دهه گذشته به‌سرعت پیچیده‌تر شده‌اند، به‌گونه‌ای که بررسی‌های کلان دیگر کافی نیست و نیاز به رویکردهای نوین و چندلایه احساس می‌شود. ازاین‌رو، مدل‌سازی ترافیک بر اساس سطوح مختلف جزئیات (ماکروسکوپی، میکروسکوپی و مزوسکوپی) رواج یافته است(Axhausen & Herz, 1989; Jiménez et al., 2016; Nguyen et al., 2021) مدل‌سازی ترافیک را می‌توان بر اساس روش‌شناسی به سه دسته طبقه‌بندی کرد: شبیه‌سازی ماکروسکوپی، میکروسکوپی و مزوسکوپی (Erfan Doraki et al., 2024) دسته اول، شبیه‌سازی ماکروسکوپی، شامل استفاده از مدل‌های ریاضی در سطح کلان برای شبیه‌سازی جریان‌های ترافیکی است که معمولاً در مناطق وسیع به کار می‌رود. با این حال، به دلیل تمرکز این مدل‌ها بر متغیرهای جمعی و مفروضات ساده، توانایی آن‌ها در بازنمایی دقیق حرکات در سطح خطوط ترافیکی، امواج توقف و حرکت، ناهمگونی رفتارهای فردی، تغییرات کوتاه‌مدت زمانی و ویژگی‌های جزئی شبکه محدود است Rotem-Mindali). Weltevreden, 2013) & به عنوان نمونه، مطالعه‌ای با استفاده از مدل‌سازی ماکروسکوپی، تغییرات قابل توجه به سمت خودروهای اقتصادی و تقاضای سوخت در بخش حمل‌ونقل ایران را پیش‌بینی کرد و هدف آن دستیابی به پایداری از طریق کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی بود (Kachoee et al., 2017). دسته دوم، شبیه‌سازی میکروسکوپی، بر شبیه‌سازی دقیق و جزئی عناصر مستقل متمرکز است و اغلب برای شبیه‌سازی ترافیک در مناطق شهری به کار می‌رود. بررسی اقدامات روزانه افراد، به ویژه در سطح جزئی، همواره یک چالش برجسته بوده است. به همین دلیل، استفاده از رویکردهای مبتنی بر عامل در این حوزه مورد بررسی قرار گرفته است(Baradaran et al., 2023). شبیه‌سازی مزوسکوپی، که بین شبیه‌سازی ماکروسکوپی و میکروسکوپی قرار می‌گیرد، عناصر هر دو روش را ترکیب کرده و تعادلی میان دقت و پیچیدگی محاسباتی فراهم می‌کند. مدل‌های مزوسکوپی پویایی‌های ترافیک را در سطحی متوسط از جزئیات شبیه‌سازی می‌کنند و تعادلی بین انتزاع سطح بالای مدل‌های ماکروسکوپی و تعاملات دقیق فردی در مدل‌های میکروسکوپی ارائه می‌دهند. با شبیه‌سازی عوامل به صورت فردی، مدل‌های مزوسکوپی می‌توانند بینش‌هایی در مورد پدیده‌های نوظهور ترافیکی و تعاملاتی که بر جریان کلی ترافیک تأثیر می‌گذارند فراهم کنند و آن‌ها را به ویژه برای مطالعه سناریوهای پیچیده ترافیک شهری و برنامه‌ریزی شبکه حمل‌ونقل مفید می‌سازد(Dasoomi et al., 2023)

مدل‌سازی مبتنی بر عامل (ABM) یک رویکرد در سطح خرد برای مدل‌سازی است که امکان شبیه‌سازی دقیق سیستم‌های پیچیده با دقت بالا را فراهم می‌کند. عبارت "سیستم‌های پیچیده" به سیستم‌هایی اشاره دارد که از تعداد زیادی اجزای متعامل تشکیل شده‌اند. ایده اصلی در پشت ABM این است که پدیده‌های مختلف در سراسر جهان می‌توانند از طریق استفاده از عوامل(Agents) ، محیط، و مشخص کردن تعاملات بین عوامل و بین محیط و عوامل به‌طور مناسبی بازنمایی شوند (Wilensky, 2015). مدل‌سازی مبتنی بر عامل به نوعی پیاده‌سازی هوش مصنوعی غیرمتمرکز است. مدل حمل‌ونقل چندعاملی (MATSim) یک مدل شبیه‌سازی مبتنی بر عامل است که به‌تازگی توسعه یافته و پتانسیل قابل‌توجهی در سیستم‌های حمل‌ونقل دارد (آکس‌هاوزن و همکاران، ۲۰۱۶). اگرچه MATSim یک مدل مبتنی بر عامل است، اما به دلیل استفاده از رویکرد ساده‌شده صف برای بارگذاری شبکه، در سطح مزوسکوپی عمل می‌کند. این ویژگی به MATSim امکان می‌دهد تا سیستم‌های حمل‌ونقل شهری در مقیاس بزرگ را با ترکیبی از دقت و کارایی محاسباتی شبیه‌سازی کند، که برای شبیه‌سازی‌های دقیق و در عین حال مقیاس‌پذیر ضروری است (W Axhausen et al., 2016). این مدل ترافیک را با استفاده از داده‌های مربوط به فعالیت‌های افراد شبیه‌سازی می‌کند. این داده‌ها می‌توانند از طریق نمونه‌گیری سیستماتیک جمع‌آوری

شده یا به‌صورت تصادفی تولید شوند. این فرآیند در تکرارهای متوالی انجام می‌شود تا کارایی کلی اقدامات اولیه را بهبود بخشد. هر عامل در این مدل دارای حافظه‌ای است که شامل توالی تعریف‌شده‌ای از اقدامات از زنجیره فعالیت‌های روزانه آن‌ها و یک امتیاز مرتبط است، و برنامه‌ای با بالاترین امتیاز برای هر عامل انتخاب می‌شود (Flötteröd & Kickhöfer, 2018). با وجود گسترش این شیوه‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترافیک در ابعاد مختلف، هنوز کمبود پژوهش در بررسی تأثیر «سیاست‌های رفتاری» بر کاهش انتشار آلاینده‌های خودروهای سبک احساس می‌شود. تمرکز اغلب مطالعات بیشتر بر جنبه‌های فنی نظیر الگوهای سفر یا تغییرات ناوگان خودرویی بوده و به تأثیر مداخلات آموزشی، فرهنگی و مشوق‌های رفتاری کمتر پرداخته شده است. بنابراین، پژوهش حاضر تلاشی است در راستای پر کردن این شکاف با تمرکز بر منطقه ۱۳ شهر تهران؛ به این صورت که در چارچوبی یکپارچه، اثر راهکارهای رفتاری مختلف بر جریان ترافیک، میزان انتشار آلاینده‌ها و تصمیم‌گیری کاربران حمل‌ونقل بررسی گردد. این پروژه با هدف اصلی بررسی سناریوهای مبتنی بر سیاست‌های رفتاری برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های ناشی از حمل‌ونقل در یکی از مناطق شهر تهران، از طریق مدل‌سازی مبتنی بر عامل طراحی شده است. علاوه بر این هدف اصلی، پروژه شامل چهار هدف فرعی است: بررسی میزان تردد در شریان‌های اصلی، شناسایی زنجیره فعالیت عامل‌های مختلف، مدل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های معیار، تحلیل تأثیر رفتار عوامل مختلف بر جریان ترافیک و میزان انتشارات، و در نهایت، اولویت‌بندی سناریوها و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کنترل انتشارها با تکیه بر خروجی‌های مدل‌سازی. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه بتواند سیاست‌گذاران و مدیران شهری را در انتخاب استراتژی‌های مناسب برای مدیریت آلودگی، ساماندهی حمل‌ونقل و بهبود کیفیت زندگی شهروندان یاری کند. همچنین، این رویکرد می‌تواند به ارتقای آگاهی عمومی درباره تأثیر تصمیمات فردی در آلودگی هوا کمک کرده و در کنار آن، گامی مؤثر در دستیابی به اهداف پایداری در حوزه حمل‌ونقل شهری باشد.



شکل ۱. چهارچوب کلی مطالعه

۲-روش شناسی

چهارچوب کلی روش شناسی وطالعه، با تمرکز بر زنجیره فعالیت آنالیز رفتاری افراد ساکن در شکل ۱ آورده شده است. برای انجام این مطالعه از مدل‌سازی عامل بنیان و مدل MATSim استفاده شده است. استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی ترافیک، رفتار سفر افراد را به صورت دقیق نشان می‌دهد؛ همچنین می‌توان سناریوهای مقیاس بزرگ را پیاده کرد و به برنامه ریزان و سیاست گذاران اجازه می‌دهد تا سناریوهای مختلف حمل‌ونقل، پروژه‌های زیرساختی و مداخلات سیاستی

را آزمایش و ارزیابی کنند و به آن‌ها کمک می‌کند تا تأثیرات بالقوه آن‌ها بر سیستم حمل‌ونقل را بهتر درک کنند و تصمیمات آگاهانه‌تری بگیرند. در این پژوهش، با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد منطقه ۱۳ تهران، این منطقه به‌عنوان منطقه مورد مطالعه برای مدل‌سازی انتخاب شده است. این منطقه با جمعیت نسبتاً کم، تعداد اندک سفرهای عبوری و ورودی، و میزان پایین جذب سفر، بستری مناسب برای تحلیل‌های مبتنی بر ABM فراهم می‌کند. علاوه بر این، آلودگی هوا در منطقه عمدتاً ناشی از حمل‌ونقل شخصی است و تعداد مراکز صنعتی و سفرهای ورودی و عبوری در آن حداقل است. این ویژگی‌ها، همراه با چالش‌های ترافیکی موجود، امکان استفاده از مدل‌های پیشرفته‌ای مانند MATSim را برای شبیه‌سازی و تحلیل سیستم حمل‌ونقل منطقه ۱۳ فراهم می‌سازد و می‌تواند بینشی دقیق‌تر برای ارائه راهکارهای پایدار و بهبود کیفیت زندگی در این منطقه ارائه دهد. این مدل به دو سری داده ورودی برای شبیه‌سازی ترافیک نیاز دارد. داده‌های شبکه و داده‌های زنجیره فعالیت. با توجه به این شکل مدل MATSim به زنجیره فعالیت روزانه افراد و شبکه مسیرهای رفت و آمد نیاز دارد. از این رو ابتدا به توسعه زنجیره فعالیت افراد با استفاده از روش‌های وابسته به داده. شبکه مورد نیاز مدل نیز با استفاده از بانک اطلاعاتی OSM استخراج می‌گردد. در نهایت پس از اجرای مدل، برای کالیبره‌کردن پارامترهای آن، از داده‌های ترافیکی پلتفرم نشان و داده‌های دریافت شده از سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهر تهران و افزونه کالیبراسیون شبیه‌سازی‌های ترافیکی پویا با در نظرگرفتن جریمه در تابع هدف برای انطباق جریان ترافیکی با واقعیت، استفاده می‌گردد.

۳-شبیه‌سازی ترافیک

مدل MATSim از استراتژی‌های گوناگون برای شبیه‌سازی رفتار عامل‌ها در شبکه حمل‌ونقل بهره می‌گیرد. این استراتژی‌ها شامل انتخاب مسیر، زمان‌بندی فعالیت‌ها، تغییر وسایل نقلیه، و تنظیم حالت حمل‌ونقل هستند که به عامل‌ها اجازه می‌دهند تصمیمات خود را بهینه‌سازی کرده و واکنش‌های واقع‌گرایانه‌ای به تغییرات محیطی و ترافیکی نشان دهند. روش‌های پیشرفته مسیریابی همچون الگوریتم‌های*A، Dijkstra، و مسیریابی مبتنی بر تجربیات گذشته یا توزیع ترافیک، امکان انتخاب مسیرهای بهینه را فراهم می‌کنند. این استراتژی‌ها به مدل MATSim کمک می‌کنند تا رفتار سفر افراد را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند و تأثیر سناریوهای مختلف را بر ترافیک و شبکه حمل‌ونقل بررسی کند. داده‌های ورودی این مدل شامل جمعیت، شبکه حمل‌ونقل منطقه ۱۳، زنجیره فعالیت اولیه عامل‌ها و داده‌های کاربری زمین است. خروجی‌های مدل شامل زمان سفر، توزیع استفاده از وسایل نقلیه مختلف، زنجیره فعالیت نهایی عامل‌ها، میزان تردد و ازدحام شبکه می‌شود. این داده‌ها به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا اثرات سیاست‌های مختلف حمل‌ونقل را ارزیابی کرده و راه‌حل‌های بهینه‌ای برای کاهش ترافیک و انتشار آلاینده‌ها ارائه دهند. همچنین در این مدل پارامترهای متعددی برای شبیه‌سازی دقیق رفتار سفرها و تصمیم‌گیری‌های عامل‌ها استفاده می‌شود. این پارامترها شامل موارد مرتبط با عدم مطلوبیت سفر (مانند نارضایتی از زمان سفر با خودرو، موتورسیکلت، دوچرخه یا پیاده‌روی)، زمان‌بندی فعالیت‌ها (مانند جریمه‌های ناشی از دیر رسیدن، زود رسیدن یا اجرای ناقص فعالیت‌ها)، و شبکه حمل‌ونقل (مانند ظرفیت جریان شبکه و جریمه‌های استفاده از حمل‌ونقل عمومی) هستند. همچنین پارامترهایی برای ارزیابی فعالیت‌ها و شبیه‌سازی حرکت عامل‌ها (مانند تلپورت و فاصله مستقیم) تعریف شده‌اند که برای تنظیم دقیق‌تر شبیه‌سازی استفاده می‌شوند. این پارامترها به مدل اجازه می‌دهند تا رفتارهای سفر، تعاملات میان عامل‌ها و تغییرات ناشی از سیاست‌های حمل‌ونقل را شبیه‌سازی کند. فرایند کالیبراسیون این پارامترها با استفاده از داده‌های واقعی انجام می‌شود تا دقت مدل در بازتولید رفتارهای واقعی و پیش‌بینی تأثیر سیاست‌ها افزایش یابد. تنظیم مناسب این پارامترها باعث می‌شود که نتایج نهایی مدل مطابق با شرایط واقعی باشد.

فرایند مدلسازی با استخراج داده‌های (OSM) مربوط به منطقه ۱۳ تهران آغاز می‌شود. این داده‌ها پس از پیش‌پردازش شامل حذف افزونگی‌ها، تبدیل مختصات جغرافیایی به سیستم مختصات مناسب (UTM)، و ساده‌سازی شبکه برای کاهش بار محاسباتی آماده می‌شوند. شبکه نهایی شامل ۳۸۶۳ نقطه اتصال و ۷۸۶۱ پیوند است که هر پیوند به‌عنوان راه یک‌طرفه یا دوطرفه با ظرفیت و سرعت مجاز مشخص تعریف شده است. داده‌های نقشه وارد شده به مدل، با فرمت ویژه MATSim آماده می‌شوند، به‌گونه‌ای که ابتدا مختصات نقاط اتصال تعریف و سپس شریان‌ها به‌عنوان ارتباط بین این نقاط با ویژگی‌های خاص مشخص می‌شوند. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق، خروجی‌ها و ورودی‌های منطقه از سایر مناطق شهری نیز با استفاده از

Google Map APIشناسایی شده و نقاط نماینده آن‌ها در شبکه تعریف می‌گردند. این نقاط شامل مسیرهایی از مناطق مختلف تهران هستند که از طریق نقاط مشخصی در منطقه ۱۳ وارد یا خارج می‌شوند. در نهایت، شبکه نهایی پس از اعمال تغییرات لازم (مانند بستن مرزهای منطقه با دوربرگردان‌ها و تنظیم پیوندهای گمشده) آماده می‌شود تا به عنوان ورودی در مدل MATSim استفاده شود. این تنظیمات امکان تحلیل جریان‌های ترافیکی ورودی و خروجی به منطقه را نیز فراهم می‌کند.

توسعه تقاضا سفر اولیه

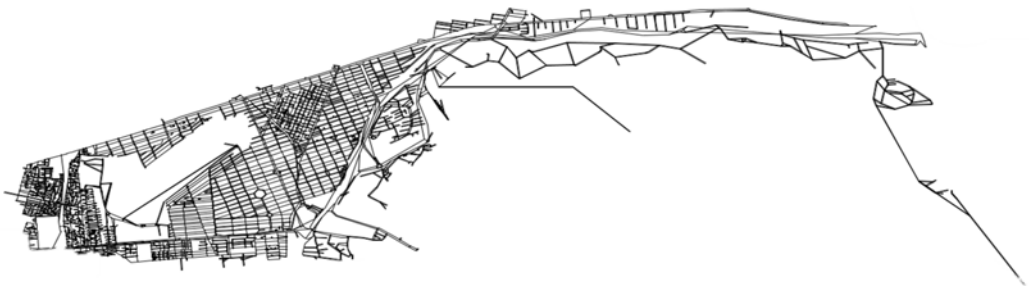
تولید جمعیت مصنوعی یکی از گام‌های اساسی در مدل‌سازی فعالیت‌محور و شبیه‌سازی‌های عامل‌بنیان است که برای پیش‌بینی تقاضای حمل‌ونقل و تحلیل الگوهای رفتاری افراد در مقیاس شهری به کار می‌رود. در شرایطی که داده‌های واقعی و دقیق برای تمامی افراد و خانوارها در دسترس نیست، استفاده از روش‌های تولید جمعیت مصنوعی به پژوهشگران امکان می‌دهد تا با بهره‌گیری از داده‌های نمونه و الگوریتم‌های پیشرفته، جمعیت شبیه‌سازی‌شده‌ای را تولید کنند که ویژگی‌های جمعیتی و اجتماعی واقعی را بازتاب دهد. این فرایند به‌ویژه در پروژه‌های مرتبط با حمل‌ونقل شهری و تحلیل تقاضا، نقش کلیدی ایفا می‌کند، چرا که دقت داده‌های ورودی می‌تواند به‌طور مستقیم بر کیفیت نتایج شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری‌های بعدی تأثیر بگذارد. چندین روش برای تولید جمعیت مصنوعی وجود دارد که از میان آن‌ها، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به‌دلیل نداشتن محدودیت در تولید داده و نیاز به داده‌های نمونه کمتر، مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم که از فرایند تبلور و سرد شدن تدریجی در طبیعت الهام گرفته، برای یافتن کمینه‌های بهینه در مسائل پیچیده به کار می‌رود. در این روش، با ایجاد یک جمعیت اولیه تصادفی و به‌کارگیری جداول محدودکننده (مانند تعداد کل جمعیت، جنسیت و هرم سنی) فرایند تولید جمعیت اصلاح و بهینه‌سازی می‌شود. ویژگی متمایز این الگوریتم، امکان پذیرش موقت حالت‌های کمتر مطلوب برای فرار از کمینه‌های محلی است که منجر به شبیه‌سازی دقیق‌تری می‌شود.

در این پروژه، به‌منظور پیش‌بینی تقاضای ترافیک با استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان و نبود داده‌های فردی مناسب، جمعیت مصنوعی بر اساس داده‌های سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ تولید شده است. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده در چارچوب متن‌باز مدل‌سازی انعطاف‌پذیر (Harland, 2013) اجرا شد و داده‌های تولیدشده با استفاده از ضریب رشد جمعیتی ۱,۱ برای سال ۱۳۹۹ تعدیل شدند. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به افراد و خانوارها بوده و در نهایت با ترکیب این دو، جمعیت مصنوعی شبیه‌سازی‌شده تشکیل شد.

ورودی‌های مدل شامل داده‌های سرشماری ۱۳۹۵، مانند هرم سنی، تعداد زنان و مردان، و تعداد خانوارها به تفکیک اعضا و مناطق بود. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به طور جداگانه برای افراد و خانوارها اجرا شد و خروجی‌های آن پس از اعتبارسنجی ترکیب گردید. این فرایند امکان تولید جمعیتی مشابه با توزیع جمعیتی واقعی شهر تهران را فراهم کرد.

بعد از توسعه جمعیت مصنوعی، نیاز به برنامه زمانی دقیق برای هر عامل در قالب مجموعه‌ای از فعالیت‌های روزانه است. در این مطالعه، از «الگوهای فعالیت اسکلتی» استفاده شده که توالی فعالیت‌های روزانه افراد را بدون اطلاعات زمانی و مکانی دقیق تعریف می‌کند.

به دلیل نبود داده‌های جامع از زنجیره فعالیت‌ها، نظرسنجی سفر برای ثبت فعالیت‌های روزانه افراد انجام شده است. داده‌های نظرسنجی شامل مشخصات جمعیت‌شناختی و اجتماعی خانوارها بود که با الگوریتم خوشه‌بندی K-mean به گروه‌های همگن بر اساس معیارهایی مانند تعداد افراد، وضعیت شاغل یا محصل بودن و منطقه زندگی دسته‌بندی شدند.



شکل ۲. شبکه نهایی منطقه ۱۳

خوشه‌بندی داده‌ها با الگوریتم K-mean بر اساس کمینه‌سازی مجموع مربعات فاصله از مرکز خوشه انجام شد. برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها، از روش Elbow استفاده شد که در آن تغییر شیب مجموع مربعات خطا بر حسب تعداد خوشه‌ها بررسی می‌شود. خانوارهای مصنوعی که پیش‌تر با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده تولید شده بودند، بر اساس شباهت‌های اجتماعی–جمعیتی با استفاده از تکنیک KNN به خوشه‌های مشابه تخصیص داده شدند. در این مرحله، فعالیت‌های خانوارهای نظرسنجی به صورت تصادفی به خانوارهای مصنوعی داخل همان خوشه اختصاص داده شد. در نهایت، زنجیره فعالیت اسکلتی برای هر عضو از خانوارهای مصنوعی تولید شد که با ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و اجتماعی آن‌ها منطبق است. این فرایند تضمین می‌کند که توالی فعالیت‌های اختصاص‌یافته به جمعیت مصنوعی، نمایانگر الگوهای واقعی فعالیت در جامعه هدف باشد.

محاسبه انتشارات

برای برآورد میزان آلودگی هوا، از ضرایب انتشار وسایل نقلیه استفاده می‌شود. این ضرایب از منابع معتبر مانند پایگاه‌های داده، ادبیات علمی یا مقامات حمل‌ونقل دولتی به دست می‌آیند و شامل اطلاعاتی درباره دسته‌بندی خودروها، نوع سوخت، شرایط عملیاتی و میزان انتشار آلاینده‌ها هستند. در مدلMATSim، تخمین آلودگی هوا طی چند مرحله انجام می‌شود. ابتدا ضرایب انتشار آلاینده‌های مختلف، از جمله NOx، SO2، PM2.5، PM10 و CO2 برای انواع وسایل نقلیه مانند خودروهای بنزینی و گازسوز یا موتورسیکلت‌ها، گردآوری می‌شوند. این ضرایب در جدول ۱ ارائه شده‌اند و مبنای محاسبه انتشارات در شبیه‌سازی هستند.

در گام بعد، شبیه‌سازی MATSim برای بازتولید رفتار سفرها و تخمین فعالیت‌های حمل‌ونقل اجرا می‌شود. این فرایند داده‌هایی نظیر کیلومتر طی‌شده وسیله نقلیه یا ساعات طی‌شده وسیله نقلیه را برای هر نوع وسیله نقلیه تولید می‌کند. سپس، انتشارات هر آلاینده با ضرب ضرایب انتشار مربوطه در سطح فعالیت وسیله نقلیه (رابطه ۱) محاسبه می‌شود. به این ترتیب، مجموع انتشارات ناشی از خودروها در دوره‌های زمانی مشخص برآورد می‌گردد و نمای جامعی از میزان تجمعی انتشار آلاینده‌ها در طول دوره شبیه‌سازی به دست می‌آید.

$$Emission\ Factor \times VKT = Emission \quad (۱)$$

برای کاهش هزینه‌های محاسباتی و محدودیت‌های داده، در این مطالعه فرضیاتی در مدل‌سازی عامل‌بنیان ترافیک اعمال شده است. به دلیل نبود نظرسنجی زنجیره فعالیت برای کل شهر تهران، یک منطقه نمونه برای مدل‌سازی انتخاب شد. این انتخاب، علاوه بر کاهش هزینه محاسباتی، امکان دسترسی به داده‌های واقعی را فراهم می‌کند. همچنین، شبکه راه‌ها در افق زمانی مدل‌سازی ثابت فرض شده است، زیرا داده‌های تاریخی نشان‌دهنده تغییرات جزئی در شبکه هستند و این فرض تأثیری بر دقت آینده‌پژوهی مدل ندارد. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های حمل‌ونقل عمومی، این مدل تنها به محاسبه انتشارات خودروهای شخصی می‌پردازد. با این حال، سناریوهای ترویج حمل‌ونقل عمومی به‌صورت غیرمستقیم و از طریق تأثیر بر تعداد خودروهای شخصی بررسی می‌شوند. علاوه بر این، سفرها به ساکنین منطقه محدود شده است و شبکه راه‌ها برای منطقه انتخابی بسته فرض شده تا تأثیر ورودی‌های سفر از سایر مناطق کاهش یابد. منطقه انتخابی نیز به‌گونه‌ای تعیین شده که کمترین میزان سفر ورودی از سایر مناطق را داشته باشد.

سناریوهای توسعه داده شده

در این پروژه، شش سناریو در دو دسته رفتاری و زیرساختی برای تحلیل تأثیرات مختلف بر شبکه حمل‌ونقل و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توسعه داده شده‌اند. .این سناریوها بر اساس پیشینه مطالعاتی و شناسایی مسائل کلیدی در حوزه حمل‌ونقل شهری و رفتارهای اجتماعی انتخاب شده‌اند تا بتوانند تغییرات قابل‌توجهی در کاهش ترافیک و آلودگی هوا ایجاد کنند (Dasoomi et al., 2023; Herring et al., 2017; Ismail & Michael, 2023). افزایش خرید آنلاین: این سناریو تأثیر افزایش خرید الکترونیکی بر کاهش سفرهای خرید فیزیکی را بررسی می‌کند. سه نرخ پذیرش ۲۴٪، ۵۴٪ و ۷۰٪ برای کاهش سفرهای خرید در نظر گرفته شده است. زمان صرفه‌جویی‌شده به فعالیت‌های خانگی یا اوقات فراغت اختصاص می‌یابد تا تأثیر بر ترافیک و ازدحام ارزیابی شود.

جدول ۱. ضرایب انتشارات

منبع انتشار	سوخت	NO_X	SO_2	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$CO_{2,eq}$
		تن بر یک میلیارد کیلومتر تردد				هزارتن بر یک میلیارد کیلومتر تردد
خودرو	غیراگزوزی			۲۲,۱۱ (Wang et al., 2011)	۳۳,۷۲ (Saatcioglu et al., 2011)	
	بنزین	۶۶۰ (al, 2021)	۲۹ (Wang et al., 2011)	۱۱ (al, 2021)	۲۱,۲۷ (Saatcioglu et al., 2011)	۲۶۱,۰۴ (Wang et al., 2011)
	CNG	۱۲۷۰ (Y. Hojjat, 2021)				۲۰۶,۸۷ (Y. Hojjat, 2021)
موتورسیکلت	غیراگزوزی			۴۲,۷۶ (Saatcioglu et al., 2011)		
	بنزین	۷۰ (Saatcioglu et al., 2011)	۰,۹۴ (Saatcioglu et al., 2011)	۲۲,۱۴ (Saatcioglu et al., 2011)		۱۰۰,۰۰ (Saatcioglu et al., 2011)

ساعات کاری شناور: این سناریو به بررسی تأثیر برنامه‌های کاری انعطاف‌پذیر بر کاهش ازدحام ساعات اوج می‌پردازد. نرخ‌های پذیرش بین ۲۱٪ تا ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده و زمان‌های شروع و پایان کار کارکنان در پنجره‌های زمانی مختلف توزیع می‌شود. این تغییر در توزیع تقاضا، تأثیرات مثبت بر جریان ترافیک و میانگین زمان سفر را تحلیل می‌کند.

-دورکاری و آموزش آنلاین: با نرخ‌های پذیرش متفاوت (۱۴٪ تا ۱۰۰٪ برای دورکاری و ۷,۵٪ تا ۷۰٪ برای آموزش آنلاین)، این سناریو تأثیر کاهش سفرهای کاری و آموزشی را بررسی می‌کند. سفرهای مربوطه حذف یا کاهش یافته و فعالیت‌های خانگی جایگزین می‌شوند. -افزایش ظرفیت شبکه: این سناریو افزایش تدریجی ظرفیت جاده‌ها تا چهار برابر وضعیت فعلی را بررسی می‌کند. هدف، تحلیل تأثیر بهبود زیرساخت‌های جاده‌ای بر جریان ترافیک و کاهش ازدحام است.

-افزایش ظرفیت شبکه: این سناریو افزایش تدریجی ظرفیت جاده‌ها تا چهار برابر وضعیت فعلی را بررسی می‌کند. هدف، تحلیل تأثیر بهبود زیرساخت‌های جاده‌ای بر جریان ترافیک و کاهش ازدحام است.

-توسعه مسیرهای دوچرخه‌سواری: این سناریو بر ایجاد و گسترش زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری متمرکز است. مسیرهای ایمن و متصل به مراکز مهم شهری طراحی شده و گزینه دوچرخه‌سواری به‌عنوان یک روش حمل‌ونقل پایدار در مدل در نظر گرفته می‌شود.

این سناریوها با نرخ‌های نفوذ مختلف در رفتار جمعیت پیاده‌سازی شده‌اند و تأثیرات آن‌ها بر ترافیک، ازدحام، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تحلیل می‌شود.

۴-نتایج

نتایج جامع این مطالعه در سه بخش اصلی تقسیم‌بندی شده است. ابتدا با معرفی شبکه حمل و نقل و جمعیت مصنوعی، مدل اعتبارسنجی می‌شود و بعد از بررسی داده های جمعیتی و توسعه جمعیت مصنوعی، با استفاده از مدل MATSim سپس تحلیل دقیق بر اساس معیارهای عملکرد سیستم حمل‌ونقل مانند تراکم ترافیک، زمان سفر، و میزان انتشارات انجام می‌شود. به‌علاوه، ارزیابی نتایج در سناریوهای مختلف حمل‌ونقل به‌منظور بررسی پتانسیل بهبود و تغییرات در الگوهای رفتاری مسافران نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

اعتبارسنجی و کالیبراسیون مدل

در این مطالعه، کالیبراسیون مدل MATSim با استفاده از روشBrute Force انجام شده است. این روش شامل تنظیم

پارامترهای کلیدی مدل (مانند عدم مطلوبیت زمان سفر با خودرو، جریمه‌های زمانی و ضریب ظرفیت جریان شبکه) است. برای هر پارامتر، بازه‌های مشخصی تعریف شد و تمامی ترکیبات ممکن مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های متعددی اجرا شدند تا بهترین ترکیب پارامترها که با داده‌های واقعی مطابقت بیشتری دارند، انتخاب شود. پارامترهای بهینه نهایی، مانند عدم مطلوبیت زمان سفر با خودرو (۲-) و ضریب ظرفیت شبکه (٤)، در مدل برای هرچه واقعی‌تر کردن نتایج شبیه‌سازی، استفاده شدند. از کالیبراسیون، مدل با داده‌های واقعی ترافیکی مناطق مختلف تهران مقایسه شد. معیارهایی مانند میانگین قدرمطلق خطا(MAE)، میانگین درصدی قدرمطلق خطا(MAPE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، و ضریب همبستگی پیرسون (r) برای ارزیابی دقت مدل استفاده شدند. مقایسه نشان داد که مدل در معابر محلی دقت بالایی دارد، اما در معابری که تحت تأثیر ترددهای گذرا هستند، خطاها بیشتر است. به‌عنوان‌مثال، درصد خطای نسبی در برخی معابر به کمتر از ۱٪ و در برخی دیگر به بیش از ۲۷٪ می‌رسد. نتایج اعتبارسنجی در جدول ۲ برای هشت معبر پرتردد و کلیدی در منطقه سیزده آورده شده است. معیار انتخاب این معابر وجود داده‌های مناسب و تردد عادی بود به طوری که روند کلی ترافیک در مناطق در این معابر نمایان است.

همانطور که مشخص است، معیارهای اعتبارسنجی نشان‌دهنده دقت مناسب مدل هستند. این مقادیر نشان‌دهنده توانایی مدل در بازتولید الگوهای واقعی ترافیکی هستند. بااین‌حال، بهبود دقت مدل در معابر با ترددهای گذرا نیازمند لحاظ این ترددها در شبیه‌سازی است. در مجموع، مدل MATSim پس از کالیبراسیون معتبر بوده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت ترافیک و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری استفاده شود.

جدول ۲. اعتبارسنجی مدل

شناسه معبر	تردد گزارش شده	تردد مدل	مقدار مطلق تفاوت	درصد خطا (٪)
۱	۲۹۵	۲۳۵	٦۰	۲۰,۳٤
۲	۱۳۲٥	۱۳۱٥	۱۰	۰,۷٥
۳	٦۸٤	٦٦۷	۱۷	۲,٤۹
٤	٤۲۷۱	۳۸۱۹	٤٥۲	۱۰,٥۸
٥	٤۸۷۰	۳٥۱۰	۱۳٦۰	۲۷,۹۲
٦	۲۲۳۰	۲۱۰۰	۱۳۰	٥,۸۳
۷	۱۳۲٦	۱۷۷۲	٤٤٦	۳۳,٦۳
۸	٤٦۸	٤۰٤	٦٤	۱۳,٦۸

نتایج اجرای سناریوها

همانطور که گفته شد، این مطالعه به بررسی تأثیر سناریوهای مختلف رفتاری و زیرساختی بر کاهش تراکم ترافیکی، بهبود جریان حمل‌ونقل، کاهش زمان سفر، و کاهش انتشار گازهای آلاینده پرداخته است. سناریوی پایه به‌عنوان مرجع، وضعیت فعلی شبکه حمل‌ونقل شهری را بدون هیچ‌گونه مداخله‌ای بازتاب می‌دهد. این سناریو با ۲٤۳٦۷ سفر روزانه، میانگین زمان سفر ۱۲۷,٦۳ دقیقه و میانگین مسافت طی‌شده ۱٦,۱۸ کیلومتر، شدت اوج ترافیک در ساعات صبحگاهی و عصرگاهی را نشان می‌دهد. سهم بالای خودروهای شخصی (۷۰٪)، موتورسیکلت (۱۳٪) و پیاده‌روی (۱٥٪) بیانگر چالش‌های جدی در زمینه مدیریت ترافیک و نیاز به مداخلات برنامه‌ریزی‌شده است.

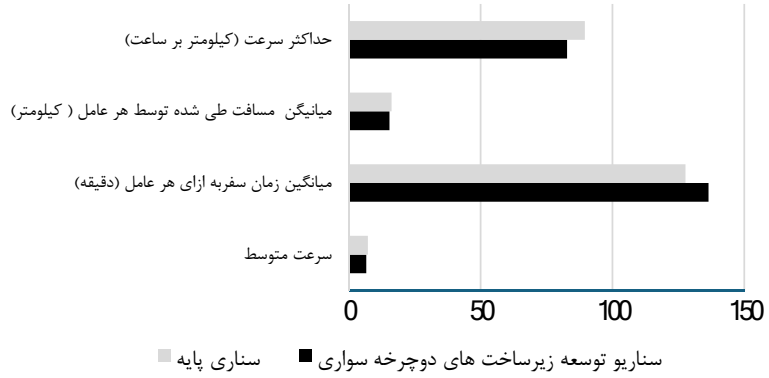
در سناریوی دورکاری، افزایش نفوذ این سیاست به کاهش قابل‌توجهی در حجم ترافیک، زمان سفر، و مسافت طی‌شده منجر شد. در سناریوی ۱۰۰٪ دورکاری، حذف سفرهای کاری باعث کاهش اوج ترافیک شد و خیابان‌ها خلوت‌تر شدند. بااین‌حال، این خلوتی خیابان‌ها جذابیت استفاده از خودروهای شخصی را افزایش داد و سهم خودروها در سفرهای شهری بیشتر شد. این تغییر رفتار نشان داد که دورکاری به‌تنهایی کافی نیست و سیاست‌های تشویقی برای استفاده از حمل‌ونقل عمومی و مودهای پایدار مانند دوچرخه‌سواری باید به‌صورت مکمل به کار گرفته شوند تا تأثیرات منفی کاهش یافته و نتایج مثبت تقویت شوند. سناریوهای خرید آنلاین و آموزش آنلاین، تأثیرات

کمتری بر کاهش تراکم ترافیک نشان دادند. با کاهش سفرهای حضوری برای خرید و تحصیل، سفرهای جایگزین مانند فعالیت‌های تفریحی یا تحویل کالا ایجاد شدند که از میزان اثرگذاری این سناریوها کاستند. در سناریوی خرید آنلاین با نفوذ ۷۰٪، ترافیک کاهش یافت اما این تغییر به اندازه سناریوی دورکاری قابل‌توجه نبود. در مورد آموزش آنلاین نیز به دلیل محدود بودن سهم دانش‌آموزان و دانشجویان در شبکه ترافیکی، کاهش ترافیک محدود بود. این نتایج نشان می‌دهند که چنین سناریوهایی باید با سیاست‌های مدیریتی و زیرساختی مکمل تقویت شوند. سناریوی ساعات کاری شناور یکی از سیاست‌های مؤثر برای توزیع یکنواخت‌تر ترافیک در طول روز بود. با افزایش نفوذ این سناریو به ۱۰۰٪، اوج ترافیک به‌طور کامل حذف شد و ترافیک در طول روز پراکنده‌تر شد. این سیاست باعث کاهش زمان سفر و بهبود جریان ترافیکی شد، اما در سطوح پایین‌تر نفوذ تأثیر محدودی داشت. برای بهره‌گیری بهینه از این سیاست، نیاز به مدیریت و هماهنگی مؤثر وجود دارد تا از جابه‌جایی اوج ترافیک به ساعات دیگر جلوگیری شود. در شکل ۳ میانگین زمان سفر در هر سناریو مشخص شده است. دورکاری ۱۰۰٪ بیشترین کاهش زمان سفر نسبت به حالت پایه و ساعت کاری شناور ۲۱٪ کمترین کاهش را نشان داده است.

افزایش ظرفیت شبکه یکی از راهکارهای رایج برای کاهش تراکم بود که در این مطالعه بررسی شد. اگرچه در سناریوهای افزایش ظرفیت، کاهش محدودی در زمان سفر و افزایش سرعت متوسط مشاهده شد، اما پدیده ترافیک القایی (Hills, 1996) باعث افزایش تعداد سفرها و کاهش مزایای این سیاست شد. این نتایج نشان دادند که افزایش ظرفیت به‌تنهایی کافی نیست و باید با مدیریت تقاضای سفر و توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل پایدار ترکیب شود تا اثرات منفی به حداقل برسد.

در نهایت، سناریوی توسعه زیرساخت دوچرخه‌سواری به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش وابستگی به خودروهای شخصی و موتورسیکلت، نتایج مثبتی ارائه داد. ایجاد زیرساخت‌های ایمن و مناسب باعث شد سهم استفاده از دوچرخه به بیش از ۵۰٪ برسد و استفاده از خودروهای شخصی و موتورسیکلت کاهش یابد. این تغییر رفتار سفر به کاهش میانگین زمان و مسافت طی‌شده و همچنین بهبود کیفیت هوای شهری منجر شد. نتایج نشان دادند که ایجاد زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ترافیک شهری را کاهش دهد و به توسعه پایدار کمک کند (شکل ٤)

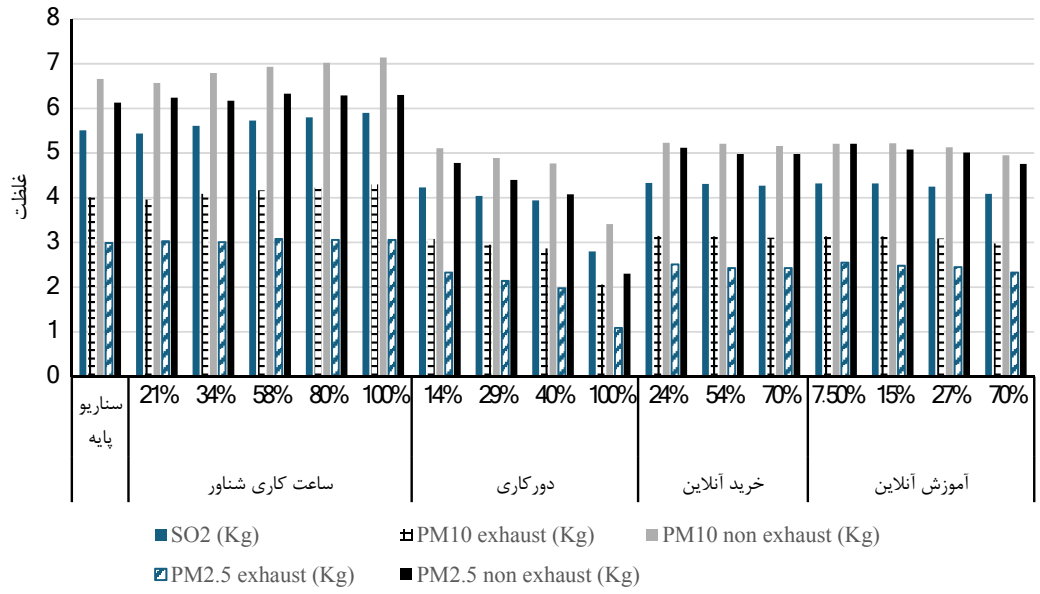
شکل ۲. میانگین زمان سفر هر یک از سناریوها در مقایسه با حالت پایه



شکل ۳. مقایسه سناریو پایه با سناریو توسعه زیرساخت‌های دوچرخه سواری

مقایسه شاخص‌های کلیدی حمل‌ونقل در سناریوهای مختلف نشان داد که سناریوهای دورکاری و توسعه زیرساخت دوچرخه‌سواری بیشترین تأثیر را در کاهش تراکم ترافیکی، کاهش میانگین زمان و مسافت سفر، و بهبود جریان حمل‌ونقل داشتند. ساعات کاری شناور نیز نتایج مثبتی داشت، اما به سیاست‌های پشتیبانی برای کاهش وابستگی به خودرو نیاز دارد. سناریوهای خرید آنلاین و آموزش آنلاین نیز به‌تنهایی تأثیر محدودی داشتند و باید با سایر سیاست‌ها ترکیب شوند تا تعادل بهتری میان نیازهای حمل‌ونقل و پایداری شهری ایجاد شود.

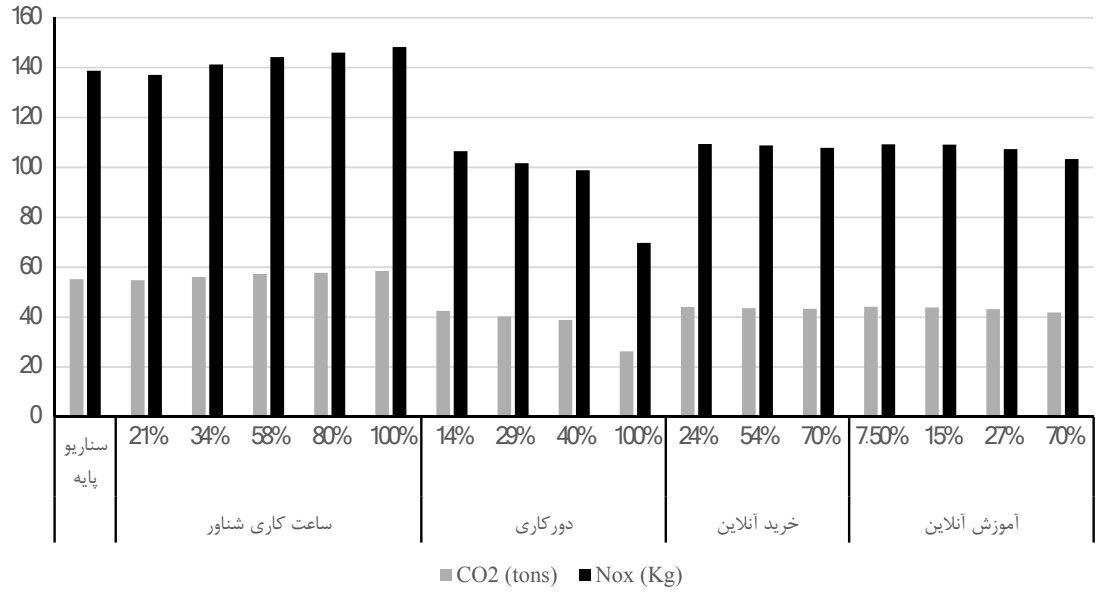
در کنار این یافته‌ها، تحلیل اثرات سناریوها بر انتشار آلاینده‌ها نشان داد که دورکاری مؤثرترین سناریو در کاهش آلودگی هوا بوده و توانسته است میزان انتشار CO_2 و سایر آلاینده‌ها را به طور قابل توجهی کاهش دهد. توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری نیز به دلیل کاهش استفاده از خودروهای شخصی و عدم استفاده از سوخت‌های فسیلی، سهم قابل توجهی در کاهش آلودگی هوا داشت. بااین‌حال، سناریوی ساعات کاری منعطف، به دلیل افزایش استفاده از خودروهای شخصی در ساعات غیر اوج و ایجاد ترافیک القایی، تأثیر محدودی در کاهش آلودگی هوا داشت و حتی در برخی موارد منجر به افزایش انتشار آلاینده‌ها شد .تحلیل اثرات این سناریوها بر انتشار آلاینده‌ها نشان داد که دورکاری در کاهش آلودگی هوا مؤثرترین راهکار است. این سناریو توانست انتشار CO_2 را به ۲۵,۲۲ تن در روز کاهش دهد که ناشی از حذف سفرهای کاری و کاهش استفاده از خودروهای شخصی است. علاوه بر CO_2، این سناریو باعث کاهش چشمگیر سایر آلاینده‌ها نیز شد، به‌ویژه NOx که به ۶۳,۷۸ کیلوگرم در روز کاهش یافت، SO_2 که به ۰,۷۶ کیلوگرم در روز رسید، و PM که تا ۱,۱۱ کیلوگرم در روز کاهش پیدا کرد. همچنین، PM به ۲,۰۶ کیلوگرم در روز رسید که نشان‌دهنده اثرات مثبت دورکاری در کاهش ذرات معلق نیز است .توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری نیز به دلیل کاهش استفاده از خودروهای شخصی و عدم استفاده از سوخت‌های فسیلی، سهم قابل توجهی در کاهش انتشار آلاینده‌ها داشت. در این سناریو، انتشار CO_2 به ۳۶,۴ تن در روز کاهش یافت. انتشار NOx نیز به ۹۲,۱ کیلوگرم در روز کاهش یافت. سایر آلاینده‌ها مانند SO_2 و ذرات معلق نیز به حداقل مقدار ممکن رسیدند، به‌طوری‌که $PM_{2.5}$ به ۱,۵۴ کیلوگرم و PM به ۲,۹۳ کیلوگرم کاهش یافت. این نشان می‌دهد که دوچرخه‌سواری تأثیر بسزایی در کاهش آلودگی هوا دارد. سناریوی ساعات کاری منعطف، به‌رغم کاهش تراکم ترافیک در ساعات اوج، به دلیل ایجاد ترافیک القایی و افزایش استفاده از خودروهای شخصی در ساعات غیر اوج، به افزایش انتشار آلاینده‌ها منجر شد. با نرخ نفوذ ۱۰۰٪، انتشار CO_2 از خودروهای بنزینی به ۵۲,۷۴ تن در روز افزایش یافت. سایر آلاینده‌ها مانند NOx و SO_2 نیز به ترتیب به ۱۳۳,۳۶ کیلوگرم و ۱,۰۲ کیلوگرم در روز افزایش یافتند. ذرات معلق نیز روند افزایشی داشتند و به ترتیب به ۲,۲۲ و ۴,۳ کیلوگرم در روز رسیدند. این نشان می‌دهد که این سناریو بدون ترکیب با سایر سیاست‌ها نمی‌تواند تأثیر مثبتی بر کاهش آلودگی هوا داشته باشد.



شکل ٤. انتشار آلاینده ها به تفکیک سناریو در هر روز (۱)

سناریوهای خرید آنلاین و آموزش آنلاین نیز، هرچند کاهش‌هایی در انتشار آلاینده‌ها داشتند، اما تأثیر آن‌ها محدود بود. در سناریوی خرید آنلاین، انتشار CO2 به ۳۸,۱۵ تن در روز کاهش یافت، اما نیاز به جابجایی کالاها با وسایل نقلیه، کاهش آلاینده‌ها را محدود کرد. سایر آلاینده‌ها نیز به همین نسبت کاهش یافتند، به‌طوری‌که NOx به ۱۰۰,۱۳ کیلوگرم، SO2 به ۰,۸۹ کیلوگرم، و PM به ترتیب به ۱,٦۱ و ۳,۰۲ کیلوگرم در روز کاهش یافتند. آموزش آنلاین نیز، به دلیل سهم کمتر سفرهای آموزشی در کل ترددهای شهری، تأثیر کمتری بر کاهش انتشار آلاینده‌ها داشت. افزایش ظرفیت شبکه حمل‌ونقل نیز برخلاف انتظار، به دلیل پدیده ترافیک القایی، تأثیر کمی در کاهش آلودگی هوا داشت. در سطح سوم این سناریو، انتشار CO2به ٤۸,٥۸ تن در روز افزایش یافت و NOx نیز به ۱۲۷,۲ کیلوگرم در روز رسید. انتشار ذرات معلق PM2.5 و PM نیز به ترتیب به ۲,۱٤ و ٤,۱۲ کیلوگرم در روز افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت به‌تنهایی برای کاهش آلودگی کافی نیست و باید با اقدامات مکمل نظیر کاهش تردد خودروهای شخصی و توسعه حمل‌ونقل عمومی همراه شود. دوچرخه‌سواری به‌عنوان یکی از پایدارترین گزینه‌های حمل‌ونقل، تأثیرات مثبتی در کاهش آلودگی هوا نشان داد. در این سناریو، انتشار PM و سایر ذرات معلق به حداقل رسید. این نشان می‌دهد که توسعه زیرساخت‌های مناسب و تشویق استفاده از دوچرخه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زیست‌محیطی داشته باشد. در شکل‌های ٥ و ٦ انتشارات آلاینده‌های محاسبه شده را با حالت پایه مقایسه شده است.

یکی از یافته‌های مهم این مطالعه، نیاز به ترکیب سناریوها برای دستیابی به نتایج بهتر است. به‌عنوان‌مثال، ترکیب دورکاری با خرید آنلاین و توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری می‌تواند تأثیرات هم‌افزایی داشته باشد و منجر به کاهش چشمگیرتر آلاینده‌ها شود. این رویکرد چندجانبه، علاوه بر کاهش آلودگی، می‌تواند به بهبود بهره‌وری افراد و کاهش هزینه‌های اقتصادی مرتبط با آلودگی هوا نیز کمک کند. در نهایت، نتایج این تحلیل نشان داد که سناریوی دورکاری، مؤثرترین راهکار برای کاهش آلودگی هوا است و می‌تواند به‌عنوان یک سیاست کلیدی در برنامه‌ریزی‌های شهری به کار گرفته شود. استفاده از دوچرخه و توسعه زیرساخت‌های آن نیز یک راهکار پایدار و بلندمدت برای کاهش وابستگی به خودروهای شخصی و بهبود کیفیت هوای شهری است. بااین‌حال، برخی سناریوها نظیر ساعات کاری منعطف، بدون سیاست‌های تکمیلی مناسب، تأثیر محدودی در کاهش آلودگی هوا دارند و حتی ممکن است انتشار آلاینده‌ها را افزایش دهند. برای رسیدن به یک شهر پایدار و پاک، لازم است برنامه‌ریزی جامع با ترکیب سناریوهای مؤثر، توسعه زیرساخت‌های مناسب و سیاست‌های تشویقی برای استفاده از روش‌های پایدار حمل‌ونقل انجام شود. این تحلیل به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا با اتخاذ رویکردهای مناسب، از اثرات منفی سناریوهای منفرد جلوگیری کرده و به بهبود کیفیت هوای شهری و سلامت عمومی کمک کنند.



شکل ۵. انتشار آلاینده‌ها به تفکیک سناریو در هر روز (۲)

۵-نتیجه‌گیری

مدل‌سازی انجام‌شده در این مطالعه با استفاده از ابزار MATSim و با بهره‌گیری از رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر عامل، امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار سفر افراد و تعامل آن‌ها با زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهری را فراهم کرد. این روش شامل سه مرحله اصلی بود: تولید جمعیت مصنوعی، تعریف زنجیره‌های فعالیتی اولیه، و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف. داده‌های جمعیتی و سرشماری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند تبرید شبیه‌سازی‌شده پردازش شدند تا نمایشی واقعی از جمعیت هدف ایجاد شود. زنجیره‌های فعالیتی اولیه با استفاده از تکنیک‌های خوشه‌بندی مانند K-means استخراج و برای شبیه‌سازی وارد مدل شدند. شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای از طریق داده‌های OpenStreetMap تهیه و پس از پیش‌پردازش وارد مدل شد. شبیه‌سازی سناریوها شامل تغییر متغیرهایی مانند ساعات کاری شناور، نرخ نفوذ دورکاری، سهم خرید و آموزش آنلاین، و توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری بود. کالیبراسیون مدل با استفاده از روش Brute Force انجام شد و معیارهای آماری مانند MAE، MAPE و RMSE برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها به کار گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سناریوی دورکاری مؤثرترین رویکرد برای کاهش تراکم ترافیک، کاهش میانگین زمان و مسافت سفر، و کاهش انتشار آلاینده‌ها است. این سناریو توانست با حذف سفرهای کاری، میزان انتشار آلاینده‌هایی مانند CO2، NOx، SO2 و PM را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. سناریوی ساعات کاری منعطف، اگرچه به کاهش تراکم در ساعات اوج کمک کرد، اما به دلیل ایجاد ترافیک القایی و پراکنده شدن سفرها در طول روز، اثربخشی کمتری در کاهش آلودگی هوا داشت. سناریوهای خرید آنلاین و آموزش آنلاین نیز تأثیرات مثبتی بر کاهش تردد و آلودگی هوا داشتند، اما به دلیل سفرهای جایگزین مرتبط با تحویل کالاها یا فعالیت‌های غیرمرتبط با آموزش، این تأثیرات محدود بودند. در سناریوی افزایش ظرفیت جاده‌ها، اگرچه جریان ترافیک بهبود یافت و سرعت متوسط افزایش پیدا کرد، اما پدیده ترافیک القایی موجب افزایش تعداد سفرها شد که در بلندمدت ممکن است اثرات منفی بر آلودگی هوا داشته باشد. در مقابل، توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری توانست با افزایش سهم سفرهای پاک، تأثیر قابل‌توجهی در کاهش آلودگی و بهبود کیفیت زندگی شهری داشته باشد. این مطالعه نشان داد

که ترکیب سناریوهای مختلف و توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل پایدار، همراه با مدیریت تقاضای سفر، می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر کاهش ترافیک و آلودگی هوا داشته باشد. به عنوان مثال، ترکیب سناریوی دورکاری با توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری و افزایش سهم خرید آنلاین می‌تواند اثربخشی اقدامات را افزایش دهد. همچنین، ترویج استفاده از وسایل حمل‌ونقل عمومی پاک و اعمال محدودیت‌های ترافیکی مانند ممنوعیت استفاده از موتورسیکلت‌های کاربراتوری و خودروهای پرمصرف می‌تواند به کاهش بیشتر آلودگی هوا کمک کند. با توجه به یافته‌ها، در شرایط اضطرار آلودگی هوا، اجرای فوری سناریوی دورکاری با نرخ نفوذ ۱۰۰٪ و انتقال به آموزش آنلاین برای دانش‌آموزان و دانشجویان پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، تشویق به خرید آنلاین از طریق ارائه تخفیف‌ها و مشوق‌های اقتصادی، محدودیت تردد خودروهای شخصی، و توسعه زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا ایفا کند. در بلندمدت، سرمایه‌گذاری در توسعه حمل‌ونقل عمومی پاک و فرهنگ‌سازی برای استفاده از مودهای حمل‌ونقل پایدار از جمله دوچرخه‌سواری، گامی اساسی در بهبود کیفیت زندگی شهری خواهد بود. برای اجرای این سیاست‌ها، هماهنگی بین بخش‌های مختلف، اطلاع‌رسانی مناسب و جلب مشارکت عمومی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به عنوان مسیری برای تحقیقات آینده، در حالی که داده‌های ترکیبی جمعیت به‌عنوان منبع ارزشمندی برای تجزیه و تحلیل فعلی استفاده می‌شوند، مطالعات آینده می‌توانند از ادغام داده‌های نظرسنجی، مانند دفترچه خاطرات سفر خانوار، برای اصلاح بیشتر مدل‌سازی تقاضای سفر و افزایش دقت شبیه‌سازی بهره ببرند. با ترکیب داده‌های ترکیبی جمعیت با داده‌های نظرسنجی دنیای واقعی، می‌توان بینش عمیق‌تری در مورد الگوهای رفتار سفر به دست آورد و مدل‌های حمل‌ونقل شهری جامع‌تر و قابل اعتمادتری را توسعه داد. در نظر گرفتن تغییرات و به روز رسانی های احتمالی در شبکه حمل و نقل در سناریوهای آینده، بینش های ارزشمندی را در مورد چشم انداز شهری در حال تحول ارائه می دهد و کاربرد یافته های ما را در زمینه های دنیای واقعی افزایش می دهد. بنابراین، ترکیب تجزیه و تحلیل تغییر شبکه در تلاش‌های تحقیقاتی آینده برای دریافت ماهیت پویای سیستم‌های حمل و نقل شهری توصیه می‌شود. همچنین ضروری است که عدم دسترسی به برنامه های توسعه شهری به عنوان یک محدودیت برجسته شود و بر نیاز به داده‌های جامع‌تر در مطالعات آتی تأکید شود. در نهایت، می‌توان با دیدن تاثیرات حمل و نقل عمومی در نتایج، سناریوهای مطرح شده را هر چه دقیق تر بررسی کرد.

٦-مراجع

-Avami, A., & Boroushaki, M. (2011). Energy consumption forecasting of Iran using recurrent neural networks. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, *6*(4), *339-347* .

-Axhausen, K. W., & Herz ,R. (1989). Simulating activity chains: German approach. *Journal of Transportation Engineering*, *115*(3), *316-325* .

-Babaei, A., Khedmati, M., Jokar, M. R. A., & Tirkolaee, E. B. (2023). An integrated decision support system to achieve sustainable development in transportation routes with traffic flow. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(21), 60367-60382 .

-Baradaran, H., Bozorgvar, H., Nourallahzadeh, Z., & Rasaizadi, A. (2023). Effectiveness of Flexible Working Hours on Traffic Index, a Case Study for Tehran. *Advance Researches in Civil Engineering*, *5*(1), 56-69 .

-Dasoomi, M., Naderan, A., & Allahviranloo, T. (2023). A novel hybrid machine learning model for shopping trip estimation: A case study of Tehran, Iran. *Transportation Engineering*, *14*, 1-2.

-Erfan Doraki, M., Avami, A., Boroushaki, M., & Amini, Z. (2024). Agent-Based Modeling for Sustainable UrbanPassenger Vehicle Mobility: A Caseof Tehran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *135*, 104380 .

-Flötteröd, G., & Kickhöfer, B. (2018). Choice models in matsim. *Technische Universität Berlin .*

-Herring, L., Moulton, J., & Toriello, M. (2017). The future of grocery–in store and online. In: McKinsey and Company New York, NY.

-Hills, P. J. (1996). What is induced traffic? *Transportation*, *23*, 5-16 .

-Ismail, S. R., & Michael, F. L. (2023). Systematic Review of Flexible Work Arrangements Impact on Employee Performance. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, *13*(11), 824-838 .

-Jiménez, D., Muñoz ,F., Arias, S., & Hincapie, J. (2016). Software for calibration of transmodeler traffic microsimulation models. IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).

-Kachoee, M. S., Haghi, P., & Avami, A. (2017). Optimal design for gasoline supply chain planning in Iran: technical, economical, and environmental perspectives. *International Journal of Energy Technology and Policy*, *13*(3), 224-248 .

-Lu, K. F., Wang, H. W., Li, X. B., Peng, Z. R., He, H. D., & Wang, Z. P. (2022). Assessing the effects of non-local traffic restriction policy on urban air quality. *Transport Policy*, *115*, 62-74 .

-Nguyen, J., Powers, S. T., Urquhart, N., Farrenkopf, T., & Guckert, M. (2021). An overview of agent-based traffic simulators. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, *12*, 100486 .

-Rotem-Mindali, O., & Weltevreden, J. W. (2013). Transport effects of e-commerce: what can be learned after years of research? *Transportation*, *40*, 867-885.

-Saatcioglu, T., Alp, K., Hanedar, A. & Avsar, E. (2011). Effect of the Marmaray project on air pollution in Istanbul: an IVE model application. *Fresenius Environmental Bulletin*, *20*(9A), *2340-2349* .

-W Axhausen, K., Horni, A., & Nagel, K. (2016). The multi-agent transport simulation MATSim. *Ubiquity Press* .

-Wang, A., Ge, Y., Tan, J., Fu, M., Shah, A. N., Ding, Y., Zhao, H., & Liang, B. (2011). On-road pollutant emission and fuel consumption characteristics of buses in Beijing. *Journal of Environmental Sciences*, *23*(3), 419-426 .

-Wilensky, U. (2015). An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with Netlogo. *The MIT Press*.

-Wooldridge, M. (1997). Agent-based software engineering. *IEE Proceedings-Software*, *144*(1), *26-37*.

-Y. Hojjat, S. Z. (2021). The list of air pollutant emissions caused by man-made sources in the metropolis of Tehran, including compilation and evaluation of emission reduction scenarios for the base year of 2017 (in Persian). *Tehran University Publishing Institute.*

Investigation of Behavioral Policies to Reduce the Emissions of Light Vehicles (Case Study: District 13 of Tehran City)

Mohammad Erfan Doraki, M.Sc., Grad., Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
Akram Avami, Associate Professor, Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
Zahra Barzegar, Assistant Professor, Environmental Studies, Tehran Urban Research and Planning Center, Tehran, Iran.
Behram Malek Mohammadi, Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: avami@sharif.edu

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT
This study employs an agent-based modeling approach using the MATSim tool to examine various behavioral scenarios and their effects on traffic flow and pollutant emissions in District *13* of Tehran. First, an artificial population of this district was developed while preserving key demographic characteristics. Subsequently, different behavioral scenarios were simulated through agent-based modeling, and the corresponding emissions were calculated. The results indicate that teleworking significantly reduces vehicle traffic and pollutants such as CO_2, NOx, SO_2, and $PM_{2.5}$, making it the most effective strategy for improving air quality and mitigating congestion. In contrast, flexible working hours exerted a limited impact on reducing air pollution—primarily due to additional trips generated—and in some cases even led to increased emissions, including a 9% rise in CO_2. Furthermore, expanding bicycle infrastructure decreased reliance on private cars, cutting CO_2 emissions by up to 26% and raising the modal share of bicycle use to 51.6%. Overall, this research demonstrates that combining travel demand management policies with sustainable infrastructure—such as cycling networks and clean public transportation—can significantly curtail pollution and traffic congestion in densely populated urban areas.

Keywords: Agent-Based Modeling, Behavioral Scenarios, Pollution, PM, Traffic