مقاله پژوهشی

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و پنجم، شماره شش، شهریورماه ۱۴۰۲ (۵۷-۳۹)

برآورد میزان مصرف سوخت و آلودگی هوای ناشی از تردد سامانه اتوبوس‌های تندرو شهری با استفاده از مدل‌سازی عامل بنیان

رحمان نورمحمدی[۱]

سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی[۲*]

a.khatami@atu.ac.ir

اکبر عالم تبریز[۳]

رضا احتشام راثی[۴]

امیر دانشور[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۳**

چکیده

زمینه و هدف: افزایش ترافیک مشکلات زیادی را در کلان شهرها به همراه داشته که مهمترین آن آلودگی هوا و افزایش مصرف بی رویه سوخت است، از اقداماتی که می توان انجام داد، توجه به حمل و نقل عمومی به ویژه سامانه اتوبوس‌های تندرو است، زیرا علاوه بر کاهش هزینه‌های اجتماعی می‌تواند در کاهش آلودگی هوا نیز بسیار موثر باشد. هدف اصلی این تحقیق، مطالعه میزان مصرف سوخت و میزان انتشار انواع آلاینده‌های هوا شامل گازهـای CO_2 ، CH_4 ، N_2O در سناریوهای مختلف سامانه اتوبوس های تندرو است.

روش بررسی: از آنجـا کـه پدیده‌های ترافیکی و ازدحام دارای خصوصیاتی از جمله پیچیدگی و پویـایی هستند، مدل‌سازی آنها با مدل‌های ریاضی معمول بسیار دشوار و بعضاً غیرممکن است. به همین منظـور، مـی‌تـوان از تکنولوژی‌های مبتنی بر عامل که دارای همخـوانی بـالایی بـا ایـن خصوصـیات هستند، بهـره گرفـت. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی عامل‌بنیان سیستم عملکرد اتوبوس‌های تندرو شهری (BRT)، میزان مصرف سوخت و همچنین میزان تولید آلاینده‌های هوا برآورد شده است. تأکید این پژوهش بر این مطلب است که برای کنترل مصرف سوخت و بهبود عوامل آلاینده می‌بایست چه تغییراتی در پارامترهای موثر شامل سرعت اتوبوس‌ها، زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها و زمان‌بندی اعزام اتوبوس‌ها ایجاد شود. در این تحقیق، از نرم افزار پایهٔ NetLogo برای کدنویسی مدل و اجرای شبیه سازی آن استفاده شده و سه سناریو متفاوت در خط یک اتوبوس های تندرو شهر تهران در نظر گرفته شده است.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۳- استاد،گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۵- استادیار،گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

یافته ها: پس از تحلیل و مقایسهٔ وضعیت‌های مختلف، پیشنهادهایی برای کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های هوا ارائه شده است، از جمله این که با تغییرات جزئی در پارامترهای زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها و همچنین تغییرات در زمان اعزام اتوبوس‌ها از پایانه می‌توان نسبت به بهبود وضعیت میزان مصرف سوخت و آلودگی هوا اقدام نمود. نتایج حاکی از آن است که یکی از وضعیت های بهبود یافته مربوط به وضعیت افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها و در سناریو پل بوده که میزان انتشار گازهـای CO_2، CH_4، N_2O به ترتیب برابر ۱۴۵۸/۶ و ۱/۱۲۲ و ۱۱/۷۸۱ در یک ساعت زمان پیک مسافری می باشد.

بحث و نتیجه گیری: نتایج حاصل شده حاکی از آن است که دستیابی به اهداف کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا در وضعیت سناریوی پل نسبت به دو سناریوی دیگر مناسب‌تر است. همچنین در صورت امکان در تقاطع‌های دارای ترافیک بالا نسبت به ایجاد پل اقدام گردد و یا ایجاد سامانه چراغ‌های راهنمایی هوشمند نیز در دستور کار باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی عامل بنیان، نت لوگو، اتوبوس های تندرو، گازوئیل، آلودگی هوا.

J. Env. Sci. Tech., Vol 25, No. 6, September 2023

Estimating the amount of fuel consumption and air pollution caused by the traffic of buses rapid transit using agent-based modeling

Noormohammadi Rahman[1]
Khatami Firoozabadi Seyed Mohammadali [2*]
a.khatami@atu.ac.ir
Alamtabriz Akbar[3]
Ehtesham Rasi Reza[4]
Daneshvar Amir[5]

Admission Date: May 3, 2023 Date Received: March 6, 2023

Abstract

Background and Objective: The increased traffic has been followed by many problems in metropolitans, the key of which is air pollution and excessive fuel consumption. Paying attention to public transportation, particularly the bus rapid transit (BRT) system is one of the measures that may be taken, since besides reducing social expenses, it may be very effective in declining air pollution. The main objective of the present research is to study the fuel consumption rate and the emissions rate of various air pollutants including CO_2, CH_4, and N_2O gases in various scenarios of BRT system.

Material and Methodology: Since traffic and congestion phenomena are complex and dynamic, it is very difficult and sometimes impossible to model them with common mathematical models. To this end, agent-based technologies, highly compatible with these characteristics, can be utilized. In the current research, BRT system's performance, the fuel consumption rate, and the amount of air pollutants production are estimated using agent-based modeling. This study emphasizes what changes should be made in effective parameters such as bus speed and bus stop time at stations, as well as bus dispatch timing in order to control fuel consumption and reduce pollution factors. This research uses NetLogo software to code the model and run its simulation and considers three different scenarios in line one of BRT system in Tehran (Iran).

Findings: following the analysis and comparison of different scenarios, suggestions are made to decline fuel consumption and air pollutants, such as minor changes in the parameters of bus stop times at stations as well as changes in the dispatch time of buses from the terminal in order to reduce fuel consumption and air pollution rates. The results indicate that one of the improved situations was

1- PhD student, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran. *(*Corresponding Author*)
3- Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
5- Assistant Professor, Department of Information Technology Management, Electronic Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

related to the situation of increasing the bus dispatch time parameter and in the bridge scenario, CO_2, CH_4, and N_2O emissions are 1458.6, 1.122, and 11.781, respectively, in one hour of peak passenger time.

Discussion and Conclusion: According to the results, achieving the goal of reducing fuel consumption and air pollution rates is more suitable in the bridge scenario compared to the other two scenarios. Furthermore, if possible, it is suggested to build bridges at intersections with high traffic, or put the smart traffic light system on the agenda.

Keywords: Agent-based Modeling, NetLogo, Rapid Buses, Gasoline, Air Pollution.

مقدمه

هدف بشریت در طول تاریخ برای دستیابی به بالاترین درجات رفاه منجر به ایجاد تحولات بزرگی شده است. این تحولات از ابتدای انقلاب صنعتی شگفت انگیز بوده و به پیامدهایی مثبت مانند افزایش ثروت و سطح زندگی شهروندان منجر شده است (۱). از سوی دیگر، پیشرفت‌های صنعت باعث تخریب نگران‌کننده‌ی محیط‌زیست، غلظت گازهای گلخانه‌ای که بر تغییرات آب‌وهوایی تأثیر می‌گذارد، سروصدا در شهرها، افزایش جمعیت، عادات مصرف ناپایدار و فشارهای دیگر بر ظرفیت محدود منابع زمین شده است (۲).

تقریباً ۴۰٪ از کل مصرف انرژی جهانی و ۲۳٪ از انتشار گازهای گلخانه ای جهانی در صنعت، ناشی از استفاده از سوخت های فسیلی می باشد. تقریباً سه چهارم انتشارهای صنعتی ناشی از فرآیندهایی است که به گرمای با دمای بالا نیاز دارند. آنها موانع فناوری و همچنین فرصت هایی را برای به دست آوردن مزایای زیست محیطی ارائه می دهند که با تغییر به سوخت های پاک تر از زغال سنگ می توان به آنها دست یافت. کربن زدایی عمیق بخش صنعت یک چالش جهانی است، اگرچه این امر به ویژه برای کشورهای در حال توسعه که تحت پروتکل کیوتو ملزم به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای خود نبوده و شاهد رشد چشمگیر حجم تولید خود بوده اند، اهمیت دارد (۳).

مسئله آلودگی هوا در سالیان اخیر به معضلی پیچیده در بسیاری از کلانشهرها تبدیل شده است (۴). وضعیت نامطلوب آلودگی هوا در بسیاری از کلان شهرها مستقیماً با عملکرد سیستم حمل ونقل و ترافیک در آنها مرتبط بوده و در کلان شهرهایی مانند تهران به علت عدم گسترش سیستم حمل ونقل عمومی انبوه، موجب استفاده بی رویه از وسایل نقلیه موتوری توسط شهروندان و انتشار مقادیر زیادی از انواع آلاینده های زیست محیطی در سطح شهر شده است، به همین دلیل در نزدیکی خیابان های بزرگ و پرتردد در کلانشهر تهران، نگرانی هایی در ارتباط با اثرات سوء آلاینده های هوای خروجی از اگزوز وسایل نقلیه بر سلامت ساکنان این اماکن ایجاد شده است (۵).

برابر گزارش کنوانسیون تغییرات آب و هوایی سازمان ملل[1] در سال ۲۰۱۳؛ در میان فعالیت های گوناگون بشر، بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه ای مربوط به بخش انرژی بوده است و از میان گازهای گلخانه ای بیشترین انتشار به ترتیب CO_2 با ۸۲ درصد، CH_4 با ۱۱ درصد و N_2O با ۵ درصد مربوط می شود. گازهای گلخانه ای منتشر شده از فعالیت های انسانی شامل: دی اکسیدکربن (CO_2)، متان (CH_4) ، نیتروس اکساید (N_2O) ، هیدروفلوئوروکربن ها (HFCS) ، پرفلوئوروکربن ها (PFCS) و سولفور هگزافلوراید (SF_6) می باشند (۶). حمل و نقل، منشأ اصلی انتشار گازهای گلخانه ای می باشد. ۲۵ درصد از انتشار دی اکسید کربن ناشی از وسایل نقلیه و حمل و نقل در سال تخمین زده شده است (۷). همچنین خودروها بزرگترین مصرف کننده مواد نفتی در بخش حمل و نقل هستند. گازهای CO_2، CH_4، N_2O در اثر مصرف سوخت های فسیلی در خودروها منتشر می شوند (۸).

از طرفی یکی از مهم ترین نقاط ضعف سیستم حمل و نقل مسافر با اتوبوس های شهری، کند بودن و کارایی پایین این

1- UNFCCC

سیستم ها است. با افزایش تراکم ترافیک در شهرها و ایجاد مشکلات عدیده ناشی از تردد وسایط نقلیه نیاز برای راه حل های جدید حمل و نقل بیشتر احساس می‌گردد. در چنین شهرهایی سیستم اتوبوس سریع به عنوان یک راهکار مؤثر و جذاب به منظور رقابت با وسایل نقلیه شخصی مطرح می باشد تا دسترسی به نقاط مرکزی شهر، مناطق مسکونی و حومه شهر برای تمامی افراد ساکن در شهرها امکان پذیر شود (۹).

با نگاهی به آمار و ارقام ارائه شده از سوی سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران و مقایسه آن با تجربه موفق سایر کشورها مشخص شده است که سیستم حمل ونقل مسافر با اتوبوس های شهری در برخی از شاخص ها دچار عدم مطلوبیت هستند. مانند مصرف سوخت و تولید آلاینده های هوا که با صرف هزینه های کمی می توان این شاخص ها را به سطح قابل قبولی ارتقا داد.

سیستم های حمل و نقل زمینی امروزه با چالش بزرگی به نام ازدحام روبرو هستند، از آنجا که پدیده های ترافیکی و ازدحام دارای خصوصیاتی از جمله پیچیدگی و پویایی است، مدل سازی آن با مدل های ریاضی معمول بسیار دشوار و بعضاً غیر ممکن است. به همین منظور در مدل سازی پدیده ازدحام و تشخیص پارامترهای موثر در کاهش یا افزایش آن می توان از تکنولوژی های مبتنی بر عامل ها که همخوانی بالایی با این خصوصیات دارند بهره گرفت. این تکنولوژی ها به علت ماهیت خاصشان که این امکان را فراهم می کند که هر عامل به طور مستقل و بدون نیاز به کمک عامل های دیگر نیز بتواند عمل کند، ابزاری مناسب برای مدیریت هوشمند ترافیک، عابرین و کاربران سیستم های حمل و نقل (به خصوص حمل و نقل زمینی)به حساب می آیند.(۱۰)

مدل سازی مبتنی بر عامل به مدل سازان اجازه می دهد که قواعد رفتاری و وضعیتی را که افراد در آن قرار می گیرند، مشخص کرده و در نهایت با اجرای مدل سازی و یا شبیه سازی رفتار افراد و گروه ها را در خروجی مدل مشاهده نمایند .همچنین مدل سازی مبتنی بر عامل می‌تواند از ایجاد مدل های قطعی و تصادفی سلسله مراتبی پشتیبانی کند، جایی که نتایج در سطوح بالاتر بر روی کنش ها و واکنش های سطوح پایین تر به سادگی قابل چشم پوشی نیست. از دیگر ویژگی های مدل سازی مبتنی بر عامل این است که از ایجاد و مطالعه سیستم های جامع با سطوح چند گانه که سطوح بالاتر و پایین تر به طور همزمان یکدیگر را تحت تاثیر قرار می دهند پشتیبانی می کند. در مدل های مبتنی بر عامل، عموماً عامل ها نماینده تصمیم گیران در سیستم هستند. عامل ها در هر وضعیتی گرایش دارند که انطباقی و انعطاف پذیر رفتار کنند، عامل ها معمولاً در سیستم به صورت مجزا قابل شناسایی هستند. به هر حال لازم نیست که عامل ها به صورت کاملاً جدا از یکدیگر قابل تفکیک باشند بلکه مرزهای جداکننده عامل ها می تواند مبهم باشد. همچنین عامل ها می توانند بخش قابل توجهی از داده ها را با یکدیگر به اشتراک بگذارند (۱۱).

در این تحقیق از میان خطوط مختلف BRT تهران، خط یک (میدان آزادی به چهار راه تهرانپارس) مورد بررسی قرار گرفته است. در این خط، وضعیت های مختلف در نرم افزار نت لوگو شبیه سازی شده است، زیرا امروزه به منظور امکان سنجی ایجاد یک سیستم جدید و یا بهبود عملکرد یک سیستم موجود، از انواع نرم افزارهای شبیه سازی کامپیوتری استفاده می شود و همان طور که قابل بررسی است در پروژه های ترافیکی با توجه به پیچیدگی کار و تداخل آن با رفتارهای انسانی، مبحث شبیه سازی اهمیتی دو چندان می یابد، زیرا بدون کمک گرفتن از نرم افزارهای کامپیوتری به سختی می توان اثر چندین عامل مختلف را به صورت همزمان بررسی نمود. از این رو خط یک BRT به عنوان یکی از پرتردد ترین خطوط BRT کلان شهر تهران با در نظرگیری تمامی پارامترهای امکان سنجی از جمله سرعت، زمان اعزام اتوبوس ها، زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها، جریان ترافیک، چراغ های راهنمایی، ایستگاه ها و هندسه مسیر را در وضعیت های مختلف شبیه سازی نموده و تأثیر هر کدام از متغیرهای ورودی بر کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده ها بررسی شده است.

هدف اصلی این تحقیق، مطالعه میزان مصرف سوخت و تولید انواع آلاینده های هوا شامل گازهای CO_2، CH_4 ، N_2O در

سناریوهای مختلف سامانه اتوبوس های تندرو است و در واقع به دنبال پاسخ به این سؤال اساسی است که با تغییر پارامترهای موثر از جمله سرعت اتوبوس ها، زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها، زمان اعزام اتوبوس ها از پایانه در سناریوها و وضعیت های مختلف، مصرف سوخت و تولید آلاینده های هوا در سیستم اتوبوس های تندرو به چه میزان می باشد؟ و راهکارهای کاهش آن کدام اند. در همین راستا سناریوهای مدنظر به شرح ذیل می باشد:

سناریو اول : سیستم عادی BRT

سناریو دوم : سیستم BRT با نصب چراغ های هوشمند در تقاطع ها

سناریو سوم : سیستم BRT با ایجاد سازه های غیرهمسطح (پل) در تقاطع ها

پیشینه تحقیق

متصدی زرندی و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی به بررسی اثر سامانه اتوبوس تندرو بر انتشار گازهای گلخانه ای در شهر تهران پرداخته‌اند. متدولوژی تحقیق بر اساس روش پیشنهادی IPCCو بهره گیری از فاکتورهای انتشار جهانی می باشد. نتایج تحقیق نشان داد که میزان انتشار هر مسافر در سامانه تندرو در سه خط یک و چهار و هفت به ترتیب برابر با ۱۸۸/۹ و ۱۸۹/۱ و ۲۸۲/۷ (p/gr) است. همچنین میانگین میزان کاهش انتشار هر مسافر توسط سامانه تندرو در مقایسه با قبل از اجرای سامانه برابر با ۲۹۹/۸ گرم به ازای هر مسافر می باشد (۱۲).

احسانی و همکاران (۱۳۹۲) به مدل سازی مصرف سوخت خودروها و انتشار کربن دی اکسید در حمل و نقل جاده ای با تاکید بر اثر انرژی های تجدیدپذیر پرداخته اند. این مقاله ضمن مدل‌سازی مصرف سوخت خودروها با در نظر گرفتن پارامترهای جدیدی نظیر دما، نوع رانندگی، کارایی سوخت، به معرفی انواع سوخت های تجدیدپذیر و اثرات مخرب ناشی از کربن دی اکسید منتشرشده حاصل از سوخت خودرو پرداخته است. تحقیقات و یافته ها نشان داد که مصرف سوخت و انتشار کربن دی اکسید ارتباط تنگانگی با دما، وزن خودرو، نوع رانندگی و نوع سوخت دارد (۱۳).

رضائی آقامیرلو وهمکاران (۱۳۹۳) اثر اجرای سامانه اتوبوس-های تندرو بر آلودگی هوا در شهر تبریز را مورد سنجش قرار داده اند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که عملکرد سامانه اتوبوس های تندرو تنها در کاهش دی اکسید نیتروژن قابل توجه می باشد و در سایر موارد تاثیر چندانی بر کاهش آلاینده ها نداشته و حتی در مورد دی اکسید گوگرد موجب افزایش جزئی در طول مسیر سامانه اتوبوس های تندرو شده است (۱۴).

نصرالهی و پوشدوزباشی (۱۳۹۵)، با هدف بررسی آلودگی هوای ناشی از تردد وسایل حمل ونقل عمومی درون شهری در شهرستان یزد و برآورد آلودگی ناشی از آنها در این مسیر پرداخته اند. داده های مورد نیاز این مطالعه از طریق مراجعه به سازمان تاکسیرانی و اتوبوسرانی شهرستان یزد و همچنین مراجعه میدانی در بین رانندگان جمع آوری شده است. طبق نتایج به دست آمده، تردد وسایل نقلیه عمومی در شهرستان یزد باعث انتشار سالانه ۳۰۶ تن ذرات معلق،۷۳۰ تن هیدروکربور، ۱۴۲۴ تن مونو اکسید کربن، ۶۸۹۳۴ تن دی اکسید کربن، ۳۸۹ تن دی اکسید گوگرد، ۴ تن تری اکسید گوگرد و ۶۶۶ تن مونو اکسید نیتروژن می شود (۱۵).

اشرفی و همکاران (۱۳۹۷)، به بررسی اثرات گسترش اتوبوس های تندرو شهری بر ترافیک و آلودگی هوا با استفاده از مدل EMME/2 وIVE مطالعه موردی: خط شماره ۱۰ مسیر برگشت دانشگاه آزاد به سمت میدان آزادی پرداخته اند. بر اساس نتایج در مقایسه دو سناریوی وجود و فقدان BRT برای آلاینده مونوکسیدکربن موجب کاهش ۰/۹۲ کیلوگرم ۱۳۴ در طول ۱۲ ساعت اندازه گیری شده بود. همچنین آلاینده ترکیبات آلی فرار ۵/۱۳ کیلوگرم کاهش یافته است. اکسیدهای نیتروژن ۰/۸ کیلوگرم و اکسیدهای گوگرد ۰/۹۷ کیلوگرم افزایش داشته است. همچنین مقادیر آلاینده ذرات معلق ۰/۴۸ کیلوگرم و نیز مقادیر بنزن ۰/۴۸ کیلوگرم کاهش یافته بود. وجود BRT برای مقایسه دو سناریو گاز گلخانه ای دی اکسیدکربن موجب کاهش ۴۳۶۱/۱۹۷ کیلوگرم در طول ۱۲ ساعت اندازه گیری شده بود. همچنین تأثیر به‌کارگیری BRT

موجب کاهش ۰/۳۷ کیلوگرم اکسید نیتروس و ۶/۸۶ کیلوگرم متان در طول این مدت شده بود (۱۶).

کمال نصیر و همکاران[1] (۲۰۱۴) به بررسی تکنیک ها و فن آوری های ITS برای کاهش مصرف سوخت و به حداقل رساندن آلاینده اگزوز می‌پردازند. این تأثیر زیست محیطی برنامه ITS برای ارائه راه حل سبز پیشرفته را برجسته کرده است. این مطالعه موردی همچنین تأیید می‌کند که فناوری ITS مصرف سوخت و آلاینده های اگزوز را در محیط شهری کاهش خواهد داد (۱۷).

میزدراک و همکاران[2] (۲۰۱۹)، به مدل سازی پتانسیل سیستم حمل و نقل فعال برای بهبود سلامت، کاهش هزینه مراقبت های بهداشتی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای پرداخته اند. سناریوهای مدل‌سازی شده منجر به افزایش سلامتی و طول عمر افراد گردیده است. صرفه جویی در هزینه مراقبت های بهداشتی بین ۱۲۷ میلیون دلار نیوزلند (۱۰۱ میلیون دلار تا ۱۵۷ میلیون دلار UI) و ۲/۱ میلیارد دلار نیوزلند (۱/۶ تا ۲/۶ میلیارد دلار UI) بود. انتشار گازهای گلخانه ای تا ۱۹۴ کیلوگرم CO_2e در سال کاهش یافت، اگرچه تغییرات در انتشار در سناریوی پیاده‌روی قابل توجه نبود (۱۸).

مویا و همکاران[3] (۲۰۲۰)، به مقایسه سناریوهای مبتنی بر عامل برای ارزیابی سرمایه گذاری سوئیچینگ سوخت در انتقال انرژی بخش صنعت هند پرداخته اند. نتایج همچنین نشان دهنده ناهمگونی منحصر به فرد سرمایه گذاران صنعتی تعویض سوخت با اهداف سرمایه گذاری متمایز و آینده نگری محدود در مورد هزینه ها است. درک مخارج سرمایه ای بالا برای کربن زدایی یک مانع قابل توجه برای انتقال انرژی در صنعت است و باید از طریق سیاست گذاری موثر (مانند سیاست کربن/قیمت) مورد توجه قرار گیرد (۳).

ون و همکاران[4] (۲۰۲۱)، به بررسی تأثیر انتخاب ویژگی‌های ورودی بر مدل‌های انتشار وسایل نقلیه دیزلی سبک رانده شده در جاده‌های واقعی پرداخته اند. در این تحقیق از مدل رگرسیون تقویت گرادیان (GBR) برای آموزش و پیش‌بینی انتشار اکسید نیتروژن (NO_x)، دی‌اکسید کربن (CO_2)، و مصرف سوخت خودروهای دیزلی واقعی رانندگی در سناریوهای شهری، حومه‌ها و بزرگراه‌ها استفاده شد. بهترین مدل NO_x دارای مقادیر ضریب تعیین ۰/۹۹ و ۰/۹۹ و ۰/۹۹ در هر الگوی رانندگی (شهری، حومه شهر و بزرگراه) بود. پیش‌بینی‌های مسیر دوم دارای مقادیر ضریب تعیین به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۹ و ۰/۹۶ بود. بهترین مدل CO_2 مقادیر ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ در هر الگوی رانندگی داشت. پیش‌بینی‌های مسیر دوم دارای مقادیر ضریب تعیین به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۸۲ و ۰/۸۳ بود. مهم‌ترین ویژگی‌های مدل NO_x، سرعت جریان جرمی هوا (g/s)، سرعت جریان خروجی اگزوز (m^3/min) و CO_2 (ppm) است، در حالی که ویژگی‌های مهم برای مدل CO_2 سرعت جریان خروجی اگزوز (m^3/min) و سرعت جریان جرمی هوا (g/s) است. خاطر نشان می شود که مدل های رگرسیون مبتنی بر سه ویژگی برتر ممکن است پیش بینی هایی بسیار نزدیک به داده های اندازه گیری شده ارائه دهند (۱۹).

دووان و همکاران[5] (۲۰۲۱) به بررسی اثرات کاهش آلاینده های هوا و انتشار CO_2 در حمل و نقل جاده ای شهری تا سال ۲۰۳۵ در چونگ کینگ، کشور چین پرداخته اند. نتایج نشان داد که سناریوی تغییر حالت‌های حمل‌ونقل بیشترین پتانسیل را برای کاهش مصرف انرژی تا ۳۰/۹درصد و کاهش انتشار آلاینده‌های هوا و CO_2 تقریباً ۲۷-۳۲ درصد در مقایسه با سناریوی تجاری معمول (BAU) در سال ۲۰۳۵ نشان می‌دهد. سناریوی بهبود بهره وری انرژی همچنین مزایای مشترک قابل توجهی را برای کاهش آلاینده های هوا و انتشار CO_2 ارائه کرد. با این وجود، سناریوی ترویج سوخت جایگزین ممکن است انتشار ذرات ریز ($PM_{2.5}$) را تا ۲/۲ درصد در مقایسه با BAU در سال ۲۰۳۵ تحت پاکی برق منطقه‌ای در سال ۲۰۱۷ افزایش دهد (۲۰).

1- Kamal Nasir et al
2- Mizdrak et al
3- Moyaa et al
4- Wen et al
5- Duan et al

فیلیگرانا و همکاران[1](۲۰۲۲) در تحقیقی با هدف کاهش انتشار CO_2 و آلودگی هوا و همچنین مزایای سلامتی سیاست‌های حمل‌ونقل شهری از قبیل وسایل نقلیه الکتریکی و پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری را در سیاتل واشنگتن اندازه‌گیری کرده اند. برای بررسی هدف تحقیق سناریوهای مختلفی طراحی شد، نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می دهد که افزایش استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی، پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری باعث کاهش انتشار CO_2 تا ۷۴۴ تن در سال (۳۰٪) و کاهش میانگین سالانه غلظت‌های NO_x و $PM_{2.5}$ اولیه تولید شده به میزان ۰/۳۲ ppb (۱۳٪) و ۰/۰۸ میکروگرم می‌شود (۲۱).

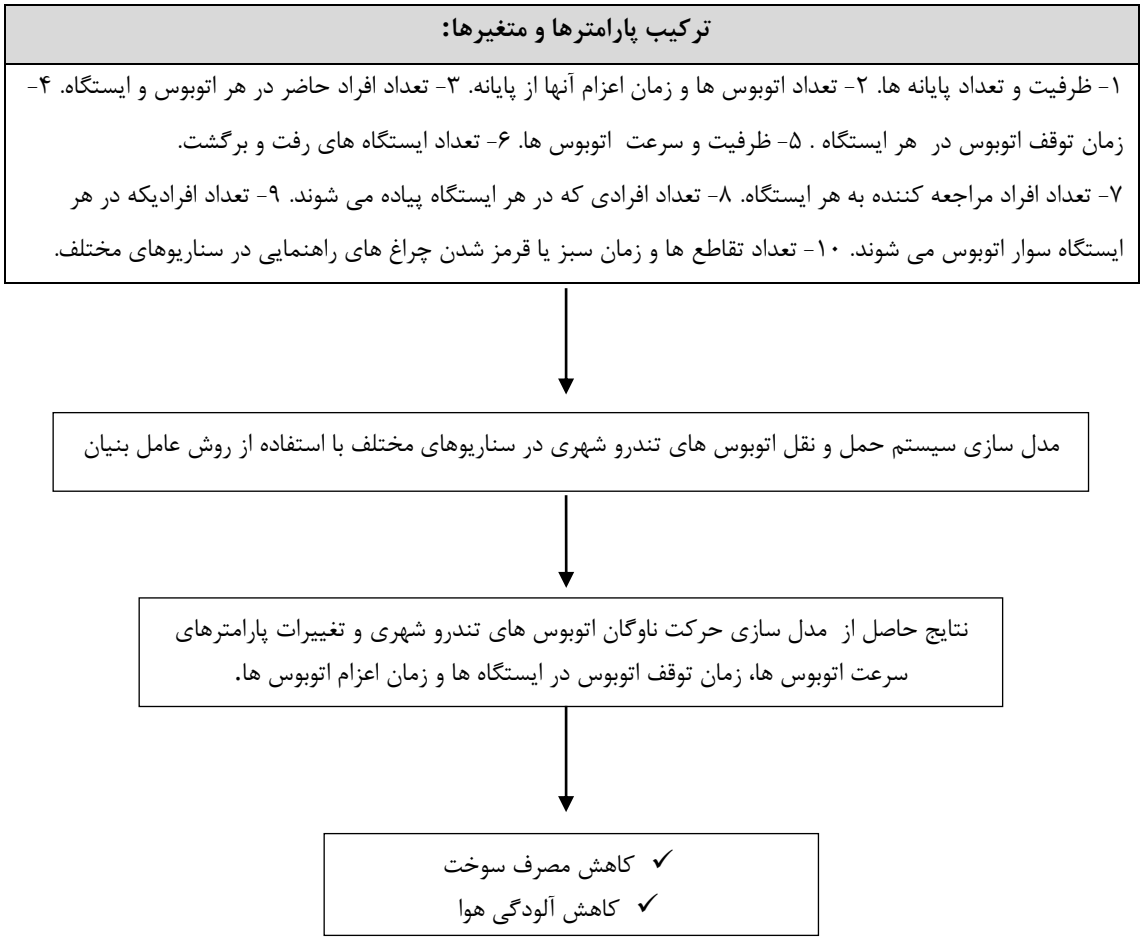
در سال های اخیر یکی از بزرگترین اهداف طراحی و برنامه ریزی شهری، به ویژه در قسمت های مرکزی شهر، کاهش اتکا و وابستگی به خودروهای شخصی به منظور پایداری و سرزندگی شهرها می باشد. در حقیقت به نظر می رسد دوران برنامه ریزی و طراحی شهری صرفاً بر اساس تأمین دسترسی به خودرو به پایان آمده، لذا امروزه متخصصان و خبرگان در حوزه حمل و نقل و مدیریت شهری درصدد ارائه گزینه هایی برای کاهش نیاز به خودروهای شخصی می باشند. لذا انجام این پروژه از لحاظ ارزیابی میزان اثربخشی سیستم اتوبوس های تندرو شهری که یکی از عوامل استفاده نکردن از خودروهای شخصی هستند، در کاهش و مقابله با آلودگی هوا و ترافیک ضروری به نظر می رسد. در نتیجه پژوهش جاری با هدف اصلی دستیابی به میزان مصرف سوخت ناوگان اتوبوس های تندرو شهری و همین طور میزان تولید آلاینده های هوا با تغییر در پارامترهای موثر در سه سناریو وضعیت موجود، چراغ هوشمند و پل انجام گردیده تا میزان و نحوه اثرگذاری سیستم اتوبوس های تندرو بر شاخص های آلودگی هوا و مصرف سوخت مشخص شود.

ضمناً روش شبیه‌سازی عامل بنیان مدلی است که شامل یک یا چند عامل است که این عوامل در یک محیط قرار دارند. عوامل می‌توانند با هم در ارتباط باشند و بر هم تأثیر بگذارند. در واقع، یک مدل عامل محور دارای ساختاری پویا و پایین به بالا (جزء به کل) است. این مدل‌ها به طور معمول با سیستم‌ها و مسائل پیچیده مواجه بوده و دارای قابلیت‌های ابداعی و خلاقانه هستند. این روش بهترین شیوه برای مدل‌سازی در نقاطی است که با عواملی هوشمند مثل انسان مواجه هستند (۲۲). شبیه سازی مبتنی بر عامل، رویکرد شبیه سازی نسبتاً جدیدی به شمار می رود که در خلق نتایج محسوس و درک پذیر برای مدیران در سیستم های پیچیده مفید است و می توان آن را در بررسی رفتار هر یک از اعضای سیستم های پیچیده به کار برد. مبنای این نوع شبیه سازی، عامل های هوشمند نرم افزاری ای هستند که به صورت کنش گرا و مستقل برنامه ریزی شده اند و قادر به برقراری ارتباط با یکدیگر و درک محیط خود هستند (۲۳).

مدل سازی عامل بنیان در مقایسه با سایر روش های مدل سازی جدیدتر است؛ به گونه ای که تا اوایل قرن بیستم، صرفاً یک مفهوم علمی بدون کاربرد واقعی محسوب می شد. کاربرد این روش مدل سازی بین سال های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ توسط پژوهشگران آغاز شد و دلایل آن عبارت بودند از: احساس نیاز به اشراف با عمق بیشتر در رفتار سیستم ها که در روش های قبلی میسر نبود؛ توسعه و پیشرفت در تکنیک های مدل سازی برگرفته از علوم رایانه ای نظیر مدل سازی شی گرا، UML و نمودارهای حالت و رشد سریع در قدرت پردازشگری CPU ها و حافظه های رایانه ای. مدل های عامل بنیان به سرعت پردازش و حافظه بیشتری نسبت به سایر رقبای سنتی خود نیاز داشته و برای این روش مدل سازی نیز یک زبان استاندارد وجود ندارد، ساختار عامل بنیان به ویرایشگرهای گرافیکی یا دستورات مرتبط است که در نرم افزار مربوطه تعریف شده اند و رفتار عامل ها با روش های متفاوتی قابل تشخیص است (۲۴).

در شکل شماره ۱ مراحل مدل مفهومی شامل احصاء پارامترها و متغیرها، مدل سازی عامل بنیان سیستم BRT در سناریوهای مختلف، تغییرات و دستکاری پارامترهای موثر و نهایتاً دستیابی به اهداف مورد نظر مشهود است.

1- Filigrana et al



شکل ۱- مدل مفهومی تحقیق

Figure 1. Conceptual model of the research

روش تحقیق

این تحقیق از منظر هدف، کاربردی است. همچنین ماهیت آن بر پایه مطالعه موردی می باشد. این پژوهش آمیخته و مبتنی بر استراتژی اکتشافی می باشد. یک مدل عامل بنیان دارای سه مولفه عامل ها (شامل خواص و قواعد رفتاری)، محیط (بستر یا شرایط پیرامونی تعامل عامل ها) و تعاملات (نوع و الگوی ارتباطی عامل ها با یکدیگر و محیط) می باشد. طبق مراحل مدل‌سازی عامل بنیان، پس از بررسی مبانی نظری پژوهش، عامل های نقش آفرین در سیستم حمل و نقل اتوبوس های تندرو شهری شناسایی شده اند. سپس داده های استاندارد تهیه و پارامترهای مهم انتخاب شده اند. پس از آن، جهت انجام شبیه سازی، نرم افزار نت لوگو انتخاب و سپس مراحل کدنویسی جهت معرفی عامل ها و تعاملات میان آنها اجرا شده است. در مرحله پایانی پس از اعتبارسنجی مدل و تأیید اعتبار آن، اجرای مدل بر مبنای داده های استاندارد صورت پذیرفت و نتایج حاصل از آن تبیین گردیده است.

برخی از داده هایی که برای فرایند شبیه سازی مسیر مورد نیاز بود بر اساس آمار و اطلاعات سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران و شرکت واحد اتوبوسرانی اخذ شده است و برخی دیگر از آمار به صورت میدانی جمع آوری گردیده است. قلمرو زمانی جمع آوری داده های میدانی به تفکیک در ساعات پیک و عادی مسافری در برخی از روزهای غیرتعطیل در سال ۱۴۰۰ و شش ماهه نخست سال ۱۴۰۱ و همچنین قلمرو مکانی تحقیق در خط یک اتوبوس‌های تندرو شهر تهران بوده است. در این مطالعه از برنامه پایه NetLogo برای کدنویسی مدل و اجرای شبیه سازی عامل بنیان در ناوگان BRT استفاده شده است.

تعداد زیاد عامل های مستقل، همکاری های داخلی بین عامل ها، تأثیر زمان روی نتایج شبیه سازی و پویایی موجود در شبکه، بعضی از مشخصه های مسئله پیش رو بوده اند؛ بر اساس نتیجه های تحقیق رند و راست (۲۵)، وجود این خصوصیت ها در مسئله تأیید می کند که مدل‌سازی عامل بنیان راه حل مناسبی برای حل این مسئله است.

جهت دستیابی به قابلیت اطمینان بالا در مدل شبیه سازی و نتایج آن، به طور معمول رفتار مدل در شبیه سازی خروجی ها با شرایط تجربی مقایسه می گردد(۲۶). که البته در این مطالعه از روش تحلیل حساسیت استفاده شده است. این روش شامل ایجاد تغییر و دستکاری مقادیر ورودی مدل برای مشخص شدن اثر آنها بر رفتار مدل یا خروجی های برنامه شبیه سازی است. بدین منظور، با تغییر برخی متغیرهای تأثیرگذار ورودی که در شکل ۱ نیز آورده شده است، خروجی های مدل ثبت و بررسی شد که با مباحث تئوریک و نظر خبرگان حوزه حمل و نقل کاملاً همخوانی داشته است.

مفروضات مهم لحاظ شده در شبیه سازی

در جدول ۱ به برخی از مفروضاتی اشاره شده است که در کدنویسی مدل و شبیه سازی از آنها استفاده شده است.

جدول ۱- برخی از مفروضات مهم لحاظ شده در شبیه سازی

Table 1. Some important assumptions included in the simulation

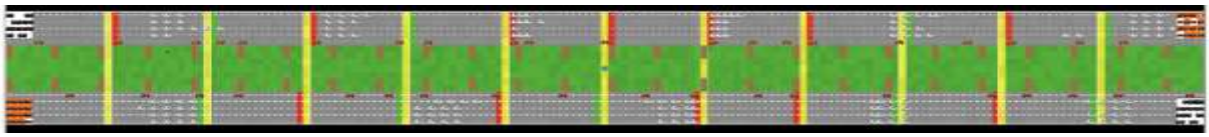
ردیف	مفروضات	توضیحات
۱	تعداد مسافرانی که وارد هر ایستگاه می شوند.	در هر ۱۰ ثانیه بر اساس احتمال ورود مسافر به ایستگاه (بسته به زمان پیک یا غیر پیک) به صورت رندوم یک نفر به مسافران ایستگاه اضافه می شود.
۲	تعداد مسافرانی که به صورت تصادفی از اتوبوس پیاده می شوند.	طبق برآورد میدانی به طور میانگین ۵ درصد از مسافرین داخل اتوبوس به صورت تصادفی در هر ایستگاه پیاده می شوند.
۳	تعداد مسافرانی که در هر ایستگاه سوار اتوبوس می شوند.	بر اساس ظرفیت باقیمانده اتوبوس و زمان توقف اتوبوس در ایستگاه
۴	مجموع میزان مصرف سوخت اتوبوس ها	تعداد اتوبوس های دو کابین فعال از نوع کینگ لانگ[1] در خط یک برابر با ۱۶۶ دستگاه می باشد و به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر حرکت یک اتوبوس ۸۰ لیتر گازوئیل مصرف می شود. و همچنین به ازای هر دقیقه توقف یک اتوبوس ۰/۳۵ لیتر گازوئیل مصرف می گردد (www. Kinglong-bus.com).
۵	مجموع میزان تولید آلاینده های CO_2 و N_2O و CH_4	به ازای هر لیتر مصرف گازوئیل ۲/۶ کیلوگرم آلاینده CO_2 و همچنین ۰/۰۲۱ کیلوگرم N_2O و ۰/۰۰۲ کیلوگرم CH_4 تولید می شود (۱۲، ۲۷ و ۲۸).
۶	زمان چراغ قرمز به صورت عادی ۱۲۰ ثانیه تعریف شده و همچنین زمان چراغ سبز به صورت عادی ۸۰ ثانیه می باشد.	طول مسیر خط یک دارای ۱۱ تقاطع و چراغ راهنمایی می باشد.

1- King Long

۷	زمان تأخیر در فعال شدن چراغ هوشمند ۳۰ ثانیه تعریف شده است.	-------
۸	موقعیت تمامی ایستگاه ها از حیث جمعیت مسافری به صورت یکسان در نظر گرفته شده است.	طول مسیر برابر با ۱۸/۵ کیلومتر و تعداد ایستگاه های خط یک در هر یک از مسیرهای دو طرفه رفت و برگشت برابر با ۲۶ ایستگاه می باشد.

یافته ها

در این بخش میزان مصرف سوخت گازوئیل و همچنین میزان انتشار آلاینده های CO_2 و N_2O و CH_4 حاصل از خروجی نرم افزار با مطالعه سناریو های مختلف و با تغییرات در پارامترهای موثر ذکر شده در یک ساعت (۶۰ دقیقه) زمان پیک مسافری مدنظر بوده که به ترتیب در دو جدول شماره ۲ و ۳ آورده شده است. ضمناً در شکل ۲ نمای کلی از مسیر رفت و برگشت شبیه سازی شده از خروجی نرم افزار نت لوگو در سناریو وضعیت موجود مشهود می باشد.



شکل ۲- نمای کلی از مسیر شبیه سازی شده از خروجی نرم افزار در سناریو وضعیت موجود(تحت پارامترهای فعلی)

Figure 2. Overview of the simulated path from the software output in the status quo scenario (under current parameters)

در جدول ۲ میزان مصرف سوخت گازوئیل در هر یک از سناریوهای مختلف با تغییر در پارامترهای موثر مشخص شده است. بر اساس اطلاعات دریافتی از شرکت واحد اتوبوسرانی زمان اعزام اتوبوس ها از ۷۰ تا ۲۲۵ ثانیه ، زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها از ۳۰ تا ۴۵ ثانیه و همچنین سرعت اتوبوس ها از ۴۰ تا ۶۰ کیلومتر بر ساعت می باشد.

جدول ۲- میزان مصرف سوخت بر اساس تغییرات در پارامترهای موثر در سناریوهای مختلف

Table 2. Fuel consumption based on changes in effective parameters in different scenarios

تغییرات پارامترها	پارامترهای موثر	بازه‌ی متغیر	سناریو وضعیت موجود	سناریو چراغ هوشمند	سناریو پل
تحت پارامترهای فعلی	زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
	زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۳۵	۳۵	۳۵
	سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۴۵	۴۵	۴۵
نتیجه	میزان مصرف سوخت (گازوئیل)		۱۱۲۸	۱۰۷۹	۱۰۷۰
افزایش پارامتر سرعت	زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
	زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۳۵	۳۵	۳۵
	سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
نتیجه	میزان مصرف سوخت (گازوئیل)		۱۱۸۰	۱۱۲۸	۱۱۱۷
کاهش پارامتر سرعت	زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰

	زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۳۵	۳۵	۳۵
	سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۴۰	۴۰	۴۰
نتیجه	میزان مصرف سوخت (گازوئیل)		۱۱۰۶	۱۰۶۵	۱۰۵۶
افزایش پارامتر زمان توقف در ایستگاه ها	زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
	زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
	سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۴۵	۴۵	۴۵
نتیجه	میزان مصرف سوخت (گازوئیل)		۱۱۳۱	۱۱۱۶	۱۱۰۶
کاهش پارامتر زمان توقف در ایستگاه ها	زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
	زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۳۰	۳۰	۳۰
	سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۴۵	۴۵	۴۵
نتیجه	میزان مصرف سوخت (گازوئیل)		۱۱۱۷	۱۰۵۹	۱۰۴۹
افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها	زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵
	زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۳۵	۳۵	۳۵
	سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۴۵	۴۵	۴۵
نتیجه	میزان مصرف سوخت (گازوئیل)		۵۹۱	۵۶۸	۵۶۱
کاهش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها	زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۷۰	۷۰	۷۰
	زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۳۵	۳۵	۳۵
	سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۴۵	۴۵	۴۵
نتیجه	میزان مصرف سوخت (گازوئیل)		۱۵۵۲	۱۸۶۰	۱۸۴۹

از طرفی علاوه بر مسائل اقتصادی مرتبط با بخش انرژی، مصرف سوخت های فسیلی دارای آثار مخربی بر محیط زیست می-باشد. مهمترین آثار مخرب ناشی از احتراق سوخت های فسیلی انتشار آلاینده ها و گازهای گلخانه ای است. بخش حمل و نقل نیز با توجه به مصرف بالای سوخت های فسیلی در آن سهم عمده ای در انتشار این نوع آلاینده ها در کشور دارد. لذا بر اساس میزان مصرف سوخت گازوئیل در هر یک از حالت ها (جدول ۲)، اطلاعات و میزان انتشار ۳ آلاینده زیست محیطی و گازهای گلخانه ای در بخش حمل و نقل در جدول ۳ به‌دست آمده است.

جدول ۳- میزان انتشار آلاینده ها بر اساس تغییرات در پارامترهای موثر در سناریوهای مختلف

Table 3. Emission rate of pollutants based on changes in effective parameters in different scenarios

تغییرات پارامترها	آلاینده ها	فاکتور انتشار برای سوخت گازوئیل (kg per litre)	میزان انتشار آلاینده ها (kg)		
			سناریو وضعیت موجود	سناریو چراغ هوشمند	سناریو پل
تحت پارامترهای فعلی	CO_2	۲/۶	۲۹۳۲/۸	۲۸۰۵/۴	۲۷۸۲
	CH_4	۰/۰۰۲	۲/۲۵۶	۲/۱۵۸	۲/۱۴

	N_2O	۰/۰۲۱	۲۳/۶۸۸	۲۲/۵۹	۲۲/۴۷
افزایش پارامتر سرعت	CO_2	۲/۶	۳۰۶۸	۲۹۳۲/۸	۲۹۰۴/۲
	CH_4	۰/۰۰۲	۲/۳۶	۲/۲۵۶	۲/۲۳۴
	N_2O	۰/۰۲۱	۲۴/۷۸	۲۳/۶۸۸	۲۳/۴۵۷
کاهش پارامتر سرعت	CO_2	۲/۶	۲۸۷۵/۶	۲۷۶۹	۲۷۴۵/۶
	CH_4	۰/۰۰۲	۲/۲۱۲	۲/۱۳	۲/۱۱۲
	N_2O	۰/۰۲۱	۲۳/۲۲۶	۲۲/۳۶۵	۲۲/۱۷۶
افزایش پارامتر زمان توقف در ایستگاه ها	CO_2	۲/۶	۲۹۴۰/۶	۲۹۰۱/۶	۲۸۷۵/۶
	CH_4	۰/۰۰۲	۲/۲۶۲	۲/۲۳۲	۲/۲۱۲
	N_2O	۰/۰۲۱	۲۳/۷۵۱	۲۳/۴۳۶	۲۳/۲۲۶
کاهش پارامتر زمان توقف در ایستگاه ها	CO_2	۲/۶	۲۹۰۴/۲	۲۷۵۳/۴	۲۷۲۷/۴
	CH_4	۰/۰۰۲	۲/۲۳۴	۲/۱۱۸	۲/۰۹۸
	N_2O	۰/۰۲۱	۲۳/۴۵۷	۲۲/۲۳۹	۲۲/۰۲۹
افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها	CO_2	۲/۶	۱۵۳۶/۶	۱۴۷۶/۸	۱۴۵۸/۶
	CH_4	۰/۰۰۲	۱/۱۸۲	۱/۱۳۶	۱/۱۲۲
	N_2O	۰/۰۲۱	۱۲/۴۱۱	۱۱/۹۲۸	۱۱/۷۸۱
کاهش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها	CO_2	۲/۶	۴۰۳۵/۲	۴۸۳۶	۴۸۰۷/۴
	CH_4	۰/۰۰۲	۳/۱۰۴	۳/۷۲	۳/۶۹۸
	N_2O	۰/۰۲۱	۳۲/۵۹۲	۳۹/۰۶	۳۸/۸۲۹

شکل ۳ نمونه ای از خروجی نرم افزار شامل نمایشگرهایی در خصوص میزان مصرف سوخت گازوئیل و همچنین میزان انتشار گازهای CO_2 و N_2O و CH_4 و همچنین نمودار رابطه مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده ها در سناریو وضعیت موجود تحت پارامترهای فعلی می باشد.

شکل ۳- رابطه مصرف سوخت گازوئیل با انتشار آلاینده های هوا در خروجی نرم افزار در سناریو وضعیت موجود(تحت پارامترهای فعلی)

Figure 3.The relationship between diesel fuel consumption and the release of air pollutants in the output of the software in the existing scenario (under current parameters)

بحث و نتیجه گیری

در این بخش نتایج به‌دست آمده از میزان مصرف سوخت و انتشار آلاینده های CO_2 و N_2O و CH_4 بر اساس تغییرات در پارامترهای موثر در سناریوهای مختلف (جداول ۲ و ۳) مورد بحث و نتیجه گیری قرار گرفته است:

وضعیت تحت پارامترهای فعلی (زمان اعزام = ۱۲۰ ثانیه، زمان توقف در ایستگاه ها = ۳۵ ثانیه و سرعت اتوبوس ها = ۴۵ ثانیه): طبق نتایج به‌دست آمده در سناریو پل نسبت به دو سناریوی دیگر کمترین مصرف سوخت و کمترین آلودگی هوا مشهود است که البته سناریو چراغ هوشمند نیز به کاهش قابل ملاحظه ای در مصرف سوخت و ایجاد آلودگی نسبت به سناریو وضعیت موجود دست یافته است که در این صورت با توجه به کاهش مصرف سوخت تاثیرات مثبتی در امر هزینه سفر خواهد داشت و در کنار آن آلاینده های هوا که فاکتور بسیار مهمی است نیز کاهش خواهد یافت.

وضعیت افزایش پارامتر سرعت (زمان اعزام = ۱۲۰ ثانیه، زمان توقف در ایستگاه ها = ۳۵ ثانیه و سرعت اتوبوس ها = ۶۰ ثانیه): بر اساس نتایج به‌دست آمده با افزایش سرعت اتوبوس نسبت به حالت اولیه (وضعیت تحت پارامترهای فعلی)، فاکتور مصرف سوخت و آلاینده های هوا تا حدودی افزایش خواهد یافت. ضمناً با افزایش سرعت اتوبوس در بررسی سناریوهای مختلف، مصرف سوخت و آلاینده های هوا در دو سناریو پل و چراغ هوشمند نسبت به سناریو وضعیت موجود به صورت محسوس کاهش خواهد یافت، که با توجه به کاهش مصرف سوخت در نتیجه هزینه سفر کاهش و آلودگی هوا نیز به مراتب کمتر خواهد شد.

وضعیت کاهش پارامتر سرعت (زمان اعزام = ۱۲۰ ثانیه، زمان توقف در ایستگاه ها = ۳۵ ثانیه و سرعت اتوبوس ها = ۴۰ ثانیه): کاهش سرعت اتوبوس، منتج به کاهش جزئی فاکتورهای مصرف سوخت و آلایندگی هوا نسبت به حالت اولیه گردیده است. همچنین با کاهش سرعت اتوبوس در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل از حیث فاکتورهای مصرف سوخت و آلاینده های هوا شرایط بهتری نسبت به دو سناریو دیگر خواهد داشت. در سناریو چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو وضعیت موجود، مصرف سوخت و آلودگی هوا کاهش خواهد یافت.

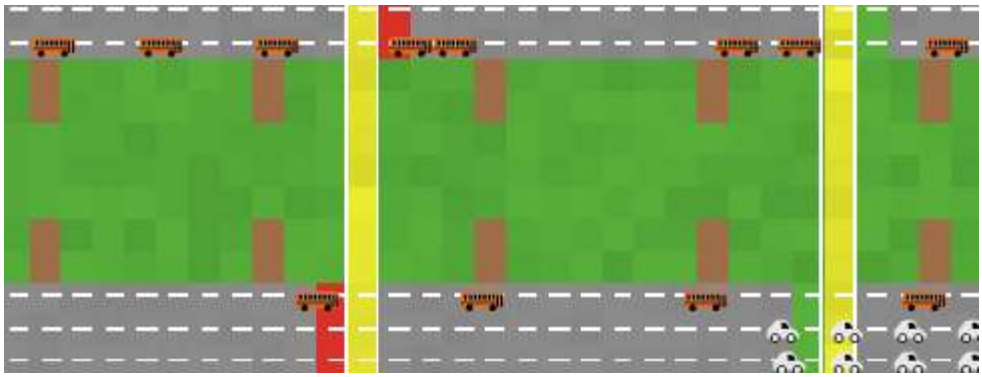
وضعیت افزایش پارامتر زمان توقف در ایستگاه ها (زمان اعزام = ۱۲۰ ثانیه، زمان توقف در ایستگاه ها = ۴۵ ثانیه و سرعت اتوبوس ها = ۴۵ ثانیه): در این وضعیت نسبت به

حالت اولیه (وضعیت تحت پارامترهای فعلی) مصرف سوخت و آلاینده های هوا افزایش یافته که نشان از عدم دستیابی به اهداف کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا خواهد بود. ضمناً با افزایش زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل و سناریو چراغ هوشمند از حیث مصرف سوخت و آلاینده های هوا شرایط بهتری نسبت به سناریو وضعیت موجود خواهند داشت. به عبارت دیگر دو سناریو مورد بحث نسبت به سناریو وضعیت موجود در دستیابی به اهداف مورد نظر یعنی مصرف سوخت و آلودگی هوا کاهش قابل ملاحظه ای خواهند داشت.

وضعیت کاهش پارامتر زمان توقف در ایستگاه ها (زمان اعزام = ۱۲۰ ثانیه، زمان توقف در ایستگاه ها = ۳۰ ثانیه و سرعت اتوبوس ها = ۴۵ ثانیه): طبق نتایج به‌دست آمده در این وضعیت مسافران بیشتری در ایستگاه ها در انتظار سوار شدن به اتوبوس خواهند بود بنابراین فاکتور مصرف سوخت نسبت به حالت اولیه (وضعیت تحت پارامترهای فعلی) کاهش یافته و شاخص آلایندگی هوا نیز در پی آن کاهش یافته است. همچنین با کاهش زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل از حیث مصرف سوخت و آلاینده های هوا شرایط بهتری نسبت به دو سناریو دیگر خواهد داشت. در سناریو چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو وضعیت موجود، مصرف سوخت و آلودگی هوا کاهش خواهد یافت.

وضعیت افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها (زمان اعزام = ۲۲۵ ثانیه، زمان توقف در ایستگاه ها = ۳۵ ثانیه و سرعت اتوبوس ها = ۴۵ ثانیه): با افزایش زمان اعزام اتوبوس ها میزان مصرف سوخت و نیز فاکتور آلودگی هوا نسبت به حالت اولیه (وضعیت تحت پارامترهای فعلی) کاهش محسوسی داشته و تقریباً نصف شده است که این حالت دقیقاً مطابق با دو هدف اصلی تحقیق می باشد. بنابراین در فصول سرد که آلودگی هوا تشدید می گردد، این وضعیت می تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با افزایش زمان اعزام اتوبوس ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل و چراغ هوشمند نسبت به سناریو وضعیت موجود درخصوص اهداف کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا شرایط تقریباً بهتری خواهند داشت.

وضعیت کاهش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها (زمان اعزام = ۷۰ ثانیه، زمان توقف در ایستگاه ها = ۳۵ ثانیه و سرعت اتوبوس ها = ۴۵ ثانیه): طبق نتایج به‌دست آمده میزان مصرف سوخت و نیز فاکتور آلودگی هوا نسبت به حالت اولیه (وضعیت تحت پارامترهای فعلی) بیش از ۱/۵ (یک و نیم) برابر شده است که این وضعیت مغایر با دو هدف اصلی تحقیق می باشد. همچنین با کاهش زمان اعزام اتوبوس ها در بررسی سناریوهای مختلف، میزان مصرف سوخت و آلاینده های هوا در سناریو وضعیت موجود (بدون تغییرات در خط ویژه) نسبت به دو سناریو پل و چراغ هوشمند کاهش یافته است. با توجه به این که در دو سناریو پل و چراغ هوشمند به دلیل وجود پل های روگذر و چراغ هوشمند در تقاطع ها مشکل وجود چراغ راهنما حل شده است و اتوبوس ها بدون توقف (سناریو پل) یا با توقف ناچیز (سناریو چراغ هوشمند) به حرکت خود ادامه می دهند و در نتیجه مسافت بیشتری را طی خواهند نمود که منتج به مصرف سوخت به ازای مسافت طی شده اتوبوس ها خواهد شد. از سوی دیگر در سناریو وضعیت موجود، به دلیل اینکه چراغ های راهنمایی عادی نصب شده است، اتوبوس ها یکی پس از دیگری و در فواصل ۷۰ ثانیه در حال اعزام بوده که منتج به ترافیک و پشت سر هم قرار گرفتن اتوبوس ها در پشت چراغ قرمز می گردد (شکل شماره ۴) و مسافت کمتری را طی خواهند نمود و ضمن حرکت اصطلاحاً لاک پشتی، مصرف سوخت کمتری را نیز در پی خواهند داشت.



شکل ۴- نمایی از ترافیک ایجاد شده برای اتوبوس ها در طول مسیر در سناریو وضعیت موجود (کاهش زمان اعزام)

Figure 4. A view of the traffic created for buses along the route in the scenario of the existing situation (decreasing dispatch time)

در مقایسه نتایج این تحقیق با پژوهش های مشابه نیز می توان گفت که در مطالعه دووان و همکاران (۲۰۲۱)، سناریوی تغییر حالت‌های حمل‌ونقل بیشترین پتانسیل را برای کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌های هوا و CO_2 در مقایسه با سناریوی تجاری معمول (BAU) دارند. همچنین در مطالعه اشرفی و همکاران (۱۳۹۷)، سناریوی وجودBRT در مقایسه با فقدان BRT ، موجب کاهش ۴۳۶۱/۱۹۷ کیلوگرم گاز گلخانه ای دی اکسیدکربن در طول ۱۲ ساعت اندازه گیری شده بود . همچنین تأثیر بکارگیری BRT موجب کاهش ۰/۳۷ کیلوگرم اکسید نیتروس و ۶/۸۶ کیلوگرم متان در طول این مدت شده بود. نتایج تحقیق متصدی زرندی و همکاران (۱۳۹۱) نیز نشان می دهد که میانگین میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه ای به ازای هر مسافر توسط سامانه تندرو در مقایسه با قبل از اجرای سامانه برابر با ۲۹۹/۸ گرم به ازای هر مسافر می باشد. همانگونه که در پژوهش حاضر نیز میزان انتشار آلاینده های CO_2 و N_2O و CH_4 در سناریوی پل و چراغ هوشمند نسبت به سناریوی وضعیت موجود BRT ، در اکثر وضعیت های مختلف کاهش قابل ملاحظه ای یافته است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در راستای این نتایج، پیشنهادهای ذیل مطرح می شود:

با کاهش زمان توقف در ایستگاه ها اهداف مصرف سوخت و آلودگی هوا بهبود می یابد. با افزایش زمان اعزام اتوبوس ها یا به عبارت دیگر با افزایش سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس ها ضمن کاهش استهلاک اتوبوس ها و هزینه های اقتصادی، میزان مصرف سوخت و نیز آلودگی هوا نیز بهبود می یابد.

پیشنهاد می گردد شرکت واحد اتوبوسرانی در وضعیت موجود و در بازه زمانی کوتاه مدت، نسبت به اتخاذ تصمیمات و انتخاب راهکار مناسب (تغییرات پارامترها) با اولویت کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا در زمان های غیرپیک (شرایط عادی مسافری) اقدام نماید. و همچنین شرکت واحد اتوبوسرانی نسبت به طراحی و ایجاد سامانه ای هوشمند در راستای کنترل برنامه زمانی اعزام اتوبوس ها اقدام نماید.

شرکت واحد اتوبوسرانی نسبت به ایجاد مرکز کنترل خط به منظور ثبت و کنترل زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه و نظارت بر سرعت اتوبوس ها در مسیر اقدام نماید.

در تقاطع هایی که دارای ترافیک بالا می باشند، پیشنهاد می گردد نسبت به ایجاد سازه های غیرهمسطح (پل یا زیرگذر) اقدام شود و یا ایجاد سامانه چراغ‌های راهنمایی هوشمند (سیستم هوشمند اولویت دهی در تقاطع ها) در دستور کار شرکت واحد اتوبوسرانی و سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران قرار گیرد.

به دلیل این که در مقاطعی از زمان به دلایل مختلف، ترافیک و پشت سر هم قرار گرفتن اتوبوس ها در مسیر خطوط تندرو مشهود است و بر اساس دستورالعمل ها و قوانین جاری در شرکت واحد اتوبوسرانی هر گونه ورود به مسیر برگشت ممنوع می باشد ، لذا پیشنهاد می شود که شرایط و فضاهایی مناسب

جهت سبقت گیری اتوبوس های تندرو در هر یک از مسیرها ایجاد گردد.

بررسی امکان استفاده از اتوبوس های گازسوز در مسیر و برطرف کردن نقص فنی اتوبوس های مورد استفاده در جهت کاهش آلودگی هوا و نیز تسریع در جایگزینی اتوبوس های فرسوده پیشنهاد می گردد.

باید توجه داشت که ارزیابی و بررسی تمامی پارامترهای دخیل در سیستم های حمل و نقلی بسیار مشکل و گاهی ناممکن است که این مقاله نیز مستثنی از این موضوع نبوده لیکن بهتر است که در مطالعات آتی توسط سایر محققان مطالعات جامع تری صورت پذیرد. لذا پیشنهاد می گردد: از سایر سناریوها شامل تأثیر به‌کارگیری اتوبوس های برقی در خطوط BRT بر آلودگی هوا و... در تحقیقات آتی استفاده نمایند. و همچنین به سایر آلاینده های هوا نظیر مونواکسید کربن (CO)، هیدروکربن نسوخته (HC)، ذرات PM، دی اکسید گوگرد (SO_2) نیز پرداخته شود و همچنین میزان آلودگی صوتی محاسبه گردد. ضمناً پیشنهاد می شود ساخت سازه غیرهمسطح یا پل در تقاطع ها با بررسی و لحاظ نمودن جمیع جهات و بر اساس اصول مهندسی و نیز مشکلات پیش رو از قبیل تغییرات در بار ترافیکی، تبعات زیست محیطی، تغییرات در زیبایی و نمای شهری، مشکلات ناشی از ساخت و ایجاد پل در مسیر پر ازدحام و ... مورد بررسی قرار گیرد.

References

1. Barca, S. Energy, property, and the industrial revolution narrative. Ecol. Econ. 2011, 70, 1309–1315. [CrossRef]
2. Manisalidis, I.; Stavropoulou, E.; Stavropoulos, A.; Bezirtzoglou, E. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. Front. Public Health 2020, 8, 14. [CrossRef] [PubMed]
3. Moya, Diego et al (2021), Agent-based scenarios comparison for assessing fuel-switching investment in long-term energy transitions of the India's industry sector, Applied Energy, 274, 1-26.
4. Asgari M. Potential to reduce pollutant emissions from personal rides In big cities with cars with new technologies Master's (thesis). Iran. Faculty of Civil Engineering Sharif University; 2011. (In Persian)
5. Ashrafi Kh., Shafipour M., Kamalan H. Estimating temporal and seasonal variation of ventilation coefficients, International Journal of Environmental Research,2009.
6. USEPA (2009). Endangerment and Cause or Contribute Findings for Greenhouse Gases under Section 202(a) of the Clean Air Act. Available at: www.epa.gov/climatechange/index.html.
7. Zegras, P.C. (2007). As if Kyoto Mattered: The Clean Development Mechanism and Transportation. Energy Policy, 35: 5136– 5150.
8. USEPA (2008). Climate Leaders, Greenhouse Gas Inventory Protocol Core Module Guidance. Direct Emissions from Mobile Combustion Sources. Available at: www.epa.gov/Climate Leaders Office of Air and Radiation.
9. Golzar Shahri, Ahmed et al. (2014), improving the performance of the bus network in Yazd city with the aim of improving service quality and reducing costs, 15th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, Tehran. (In Persian)
10. Etisam, Hadi, Rouhi, Amir (2014), investigating the causes of traffic congestion on rainy and snowy days and providing solutions to reduce it,

15th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, Tehran, Traffic Transportation Organization. (In Persian)

11. Sachs J, Meng Y, Giarola S, Hawkes A. An agent-based model for energy investment decisions in the residential sector. Energy 2019;172: 752–68
12. Motsadi Zarandi, Saeed et al. (2012), Investigation of the effect of the high-speed bus system on the emission of greenhouse gases in Tehran, Environmental Sciences, 9 (4), 1-12. (In Persian)
13. Ehsani, Mehrsa and Ahmadi, Abbas and Fadaei, Daoud, (2012), Modeling vehicle fuel consumption and carbon dioxide emissions in road transport with an emphasis on the effect of renewable energies, the third international conference on new approaches to energy conservation, Tehran. (In Persian)
14. Rezaei Aghamirlou, Mohammadreza et al. (2013), measuring the effect of the implementation of the high-speed bus system on air pollution, Traffic Management Studies, 23, 45-70. (In Persian)
15. Nasrollahi, Zahra, Poshdozbashi, Hanieh (2015), estimation of air pollution caused by public transport vehicles in the city of Yazd, Environmental Science and Technology, 22 (2), 15-29. (In Persian)
16. Ashrafi, Khosrow et al. (2017), investigating the effects of the expansion of high-speed city buses on traffic and air pollution using the EMME/2 model f) IVE case study: line number 10 of the return route of Azad University to Azadi Square), research in environmental health, 4 (3), 165-184. (In Persian)
17. Kamal Nasir, Mostofa (2014), Reduction of Fuel Consumption and Exhaust Pollutant Using Intelligent Transport Systems, Hindawi Publishing Corporation e Scientific World Journal, 1-13.
18. Mizdrak, Anja et al, (2019), Potential of active transport to improve health, reduce healthcare costs, and reduce greenhouse gas emissions: A modelling study, PLOS ONE, 1-17.
19. Wen, Hung-Ta et al (2021), Features Importance Analysis of Diesel Vehicles' NOx and CO_2 Emission Predictions in Real Road Driving Based on Gradient Boosting Regression Model, International Journal of Environmental Research and Public Health, 18, 1-28.
20. Duan, Linfeng et al (2021), Impacts of reducing air pollutants and CO_2 emissions in urban road transport through 2035 in Chongqing, China, Environmental Science and Ecotechnology, 8, 1-12.
21. Filigrana, Paola, et al (2022), Health benefits from cleaner vehicles and increased active transportation in Seattle, Washington, Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 32:538–544.
22. Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(suppl 3): 7280-7287.
23. Homayounfar, M., Bagher-Salimi, S., Nahavandi, B., Izadi Sheijani, K. (2018). Agentbased Simulation of National Oil Products Distribution Company's Supply Network in the

Framework of a Complex Adaptive System in Order to Achieve an Optimal Inventory Level. *Industrial Management Journal*, 10(4), 607-630.

24. Azar, Adel, et al (2021), Modeling Steel Supply Chain and Estimating Its Consumption through ABM Methodology, Industrial Management Perspective, 11(41), pp, 33-51.
25. Rand, W., Rust, R. T., & Kim, M. (2018). Complex systems: marketing's new frontier. AMS Review, 8(3–4), 111–127.
26. Sargent, R. G. (2007). Verification and validation of simulation models. Simulation conference, Washington, DC, USA.
27. Bezazan Fatemeh, Khosravani, Neda (2016), measuring the amount of carbon dioxide emissions by different production sectors and households due to energy consumption in Iran (environmental data-output approach), environmental economics and natural resources bi-quarterly, first year, number 1, pages 1-25. (In Persian)
28. National Climate Change Office (2010). Iran Second National Communication to UNFCC, December 2010, Department of Environment.