

“Research article”

Evaluation, comparison, and analysis of the exhaust pollutant emissions from Peugeot TU5 and XU7 internal combustion engines

**Mohammad Amin Argiv^{1,2}, Seyed Mohammad Reza Nazemosadat^{1,2,*}, Ahmad Afsari^{1,2},
Mohammad Mohammadi^{1,2}**

¹ Department of Mechanical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

² Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

*Corresponding Author: smr.nazemosadat@iau.ac.ir; reza_nazemosadat@yahoo.com

(Received: 11 May 2025, Accepted: 17 July 2025)

Abstract

Air pollution is one of the most critical environmental crises facing humanity today, with motor vehicles playing a major role. Therefore, assessing the emission levels of air pollutants from vehicles is more important than ever. This study aimed to evaluate the emissions of air pollutants from vehicles equipped with TU5 and XU7 engines through direct sampling of pollutant gases and modeling using the IVE software. Data related to the emission of CO, CO₂, NO_x, VOC, and HC gases were collected from 720 vehicles with these two engine types over a four-month period at the Shiraz vehicle inspection center, using a five-gas analyzer. Additionally, the amount of PM₁₀ particulate matter was estimated through modeling in the IVE software, based on fleet data, environmental conditions, and vehicle performance characteristics. Sampling was conducted under two conditions: when the vehicle was idling and when it was moving at an average speed of 10 km/h. The measured values were recorded, and all data were entered into the environment and fleet input files of the IVE software to extract emission factors of pollutants. The results from the vehicle inspection center showed that the TU5 engine, due to its more advanced design, performed better in reducing gaseous pollutants compared to the XU7 engine. Under idling conditions, emissions of CO and HC gases for both engine types were higher than under driving conditions. Moreover, the XU7 engine exhibited higher emissions of CO and NO_x compared to the TU5 engine. Modeling the emission factors using the IVE model revealed that the software overestimated CO and CO₂ emissions from gasoline vehicles compared to actual data, while for PM₁₀ and VOC pollutants, the measured values were higher than model predictions. TU5 vehicles performed better in reducing pollutants under driving conditions, but their emissions significantly increased under idling conditions. This study emphasizes the need to optimize and localize the IVE model to improve its predictive accuracy. The findings of this research can contribute to improved engine design, the adoption of advanced technologies, and the implementation of effective environmental policies to reduce air pollution and enhance urban life quality.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Evaluation, Emissions, Internal combustion engine, IVE model, Peugeot TU5 and XU7 engine



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۲، شماره ۱، پیاپی ۵
بهار ۱۴۰۴، صفحات ۷۹-۱۰۳

«مقاله پژوهشی»

سنجش، مقایسه و تحلیل میزان انتشار آلاینده‌های خروجی اگزوز موتورهای احتراق داخلی پژو TU5 و XU7

محمدامین آرگیو^۱، سیدمحمد رضا ناظم‌السادات^{۲*}، احمد افسری^۲، محمد محمدی^۲

^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

^۲ دانشکده مهندسی ساخت و فناوری‌های صنعتی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: smr.nazemosadat@iau.ac.ir; reza_nazemosadat@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶)

چکیده

در دنیای امروز، آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین بحران‌های زیست‌محیطی است که بشریت با آن مواجه است و وسایل نقلیه موتوری نقش عمده‌ای در آن دارند. بنابراین، نیاز به بررسی میزان انتشار آلاینده‌های هوا از وسایل نقلیه بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود. این مطالعه با هدف ارزیابی انتشار آلاینده‌های هوا از وسایل نقلیه مجهز به موتورهای XU7 و TU5 از طریق نمونه‌برداری مستقیم از گازهای آلاینده و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار IVE انجام شد. برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به انتشار گازهای CO، CO₂، NO_x، VOC و HC از ۷۲۰ وسیله نقلیه با این دو نوع موتور طی چهار ماه در مرکز معاینه فنی خودرو شیراز، با استفاده از دستگاه آنالیزور پنج‌گاز نمونه‌برداری شد. همچنین، میزان ذرات معلق PM10 از طریق مدل‌سازی در نرم‌افزار IVE و بر اساس داده‌های ناوگان، شرایط محیطی و ویژگی‌های عملکردی وسایل نقلیه برآورد گردید. نمونه‌برداری در دو حالت انجام شد: زمانی که وسیله نقلیه در حالت درجا و زمانی که با سرعت متوسط ۱۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کرد. مقادیر اندازه‌گیری‌شده، ثبت شدند و سپس تمام داده‌ها در دو فایل محیطی و ناوگان در نرم‌افزار IVE وارد شدند تا فاکتورهای انتشار آلاینده‌ها استخراج شوند. نتایج مرکز معاینه فنی خودرو نشان داد که موتور TU5 به دلیل طراحی پیشرفته‌تر، در کاهش آلاینده‌های گازی عملکرد بهتری نسبت به موتور XU7 دارد. در شرایط درجا، میزان انتشار گازهای CO و HC برای هر دو نوع موتور در مقایسه با شرایط حرکت بیش‌تر بود. همچنین، مشخص شد که موتور XU7 میزان انتشار گازهای CO و NO_x بیشتری نسبت به موتور TU5 دارد. مدل‌سازی عوامل انتشار با استفاده از مدل IVE نشان داد که این مدل میزان انتشار CO و CO₂ از خودروهای بنزینی را در مقایسه با داده‌های واقعی بیش از حد تخمین زده است، در حالی که برای آلاینده‌های PM10 و VOC مقادیر واقعی بالاتر از برآوردهای مدل بودند. خودروهای TU5 در شرایط حرکتی عملکرد بهتری در کاهش آلاینده‌ها داشتند، اما در شرایط درجا میزان انتشار آن‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. این مطالعه بر لزوم بهینه‌سازی و تطبیق مدل IVE با شرایط محلی برای افزایش دقت پیش‌بینی آن تأکید می‌کند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به بهبود طراحی موتور، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی مؤثر در جهت کاهش آلودگی هوا و ارتقای کیفیت زندگی شهری کمک کند.

واژه‌های کلیدی: سنجش، آلودگی، موتور احتراق داخلی، مدل IVE، موتور پژو TU5 و XU7

مقدمه

آلودگی هوا به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است که سلامت انسان‌ها، حیوانات، و کل اکوسیستم را تهدید می‌کند. این مشکل به‌ویژه در کلان‌شهرهایی مانند تهران، که تراکم جمعیت و ترافیک بالاست، اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، بیش از ۳۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی از وسایل نقلیه موتوری منتشر می‌شود، که این رقم در ایران به بیش از ۸۵ درصد در مناطق شهری می‌رسد. گزارش‌ها نشان می‌دهند که سهم منابع متحرک در ایجاد آلودگی هوای شهرهای مختلف ایران به ترتیب بین ۸۵ تا ۹۰ درصد است (۱). آلاینده‌های ناشی از وسایل نقلیه شامل گازهای خطرناکی مانند مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن (CO₂)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، و ذرات معلق می‌شود. این آلاینده‌ها اثرات مخربی بر سیستم تنفسی، قلبی-عروقی، و حتی سیستم عصبی انسان‌ها دارند. همچنین، این گازها نقش مستقیمی در تغییرات اقلیمی و افزایش گرمایش جهانی ایفا می‌کنند (۲). در کنار مشکلات بهداشتی، آلودگی هوا اثرات اقتصادی جبران‌ناپذیری نیز به همراه دارد. افزایش هزینه‌های درمانی، کاهش بهره‌وری نیروی کار، و آسیب به زیرساخت‌های شهری از جمله پیامدهای این معضل هستند. این امر لزوم استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌تر در صنعت خودروسازی و تغییر سیاست‌های مرتبط با مدیریت حمل و نقل را آشکار می‌سازد.

آلودگی هوا نه‌تنها به سلامت انسان‌ها آسیب می‌رساند بلکه تأثیرات اقتصادی شدیدی نیز به همراه دارد. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۲۱ هزینه‌های درمانی

مرتبط با بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا در ایران به بیش از ۸ میلیارد دلار رسید. همچنین، کاهش بهره‌وری نیروی کار و آسیب به زیرساخت‌های شهری از دیگر پیامدهای اقتصادی آلودگی هواست. از نظر سلامتی، آلاینده‌هایی نظیر NO_x و ذرات معلق (PM 2.5) اثرات مستقیمی بر سیستم تنفسی و قلبی-عروقی دارند. تحقیقات نشان داده است که افزایش هر ۱۰ میکروگرم در مترمکعب از غلظت PM 2.5 می‌تواند خطر مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های قلبی را تا ۶ درصد افزایش دهد (۳).

در زمینه تکنولوژی موتور خودرو سواری، خودروهای مجهز به موتورهای TU5 و XU7 بیش‌ترین سهم را در خودروهای داخلی ایران دارند. موتور TU5 به دلیل طراحی پیشرفته‌تر و سیستم سوخت‌رسانی بهینه، توانسته است انتشار گازهای آلاینده را تا ۳۰ درصد کم‌تر از موتور XU7 کاهش دهد. برای مثال، موتور TU5 در شرایط استاندارد، حدود ۰/۱۸ گرم NO_x در هر کیلومتر تولید می‌کند، در حالی که این مقدار در موتور XU7 به ۰/۳۰ گرم می‌رسد. همچنین، مصرف سوخت موتور TU5 به‌طور میانگین ۶/۵ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر است که در مقایسه با مصرف ۸/۵ لیتری موتور XU7، بهره‌وری بیش‌تری نشان می‌دهد. با این حال، به دلیل گستردگی استفاده از موتور XU7، این موتور همچنان سهم قابل‌توجهی در تولید آلاینده‌های شهری دارد (۴).

در همین راستا، توجه به طراحی سازه‌ای خودرو و عوامل آیرودینامیکی نیز نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌ها دارد. در یک مطالعه مکمل، محمدی و همکاران در سال ۲۰۲۵، با بهره‌گیری از روش‌های عددی تحلیل المان محدود و

دینامیک سیالات محاسباتی، به ارزیابی جامع عملکرد سازه‌ای و آیرودینامیکی بدنه یک خودروی برقی پرداختند که نتایج آن می‌تواند مکمل تحلیل‌های آلاینده‌گی و مصرف سوخت باشد. یافته‌های آن پژوهش ضمن شناسایی نقاط بحرانی بدنه خودرو در برابر ارتعاشات و مقاومت هوا، راهکارهایی برای طراحی سبک‌وزن‌تر و پربازده‌تر ارائه داده است که از منظر زیست‌محیطی نیز می‌تواند در کاهش مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها مؤثر واقع شود (۵).

برای تحلیل دقیق میزان آلاینده‌های تولیدشده، استفاده از ابزارهای مدل‌سازی ضروری است. نرم‌افزار IVE^۱ یکی از پیشرفته‌ترین ابزارها در این زمینه است که امکان شبیه‌سازی آلاینده‌ها در شرایط مختلف عملکردی خودرو را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، نتایج یک مطالعه در تهران نشان داد که استفاده از سوخت یورو ۴ و بهینه‌سازی سیستم سوخت‌رسانی می‌تواند تا ۴۰ درصد از تولید NOx بکاهد. علاوه بر این، داده‌های مدل‌سازی نشان داده‌اند که رانندگی پرشتاب و ناگهانی می‌تواند تا ۳ برابر میزان تولید CO₂ را افزایش دهد (۳).

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی به بررسی دقت و قابلیت‌های مدل IVE پرداخته‌اند. صابریان ثانی و همکاران^۲ در سال ۲۰۲۵ به مقایسه تحلیلی مدل‌های COPERT و IVE پرداختند و نشان دادند که مدل IVE در شرایط محدود داده‌ای، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، عملکرد بهتری دارد (۶). هافشا و همکاران^۳ نیز در سال ۲۰۲۵ با استفاده از مدل IVE در شهر باندا آچه، فاکتورهای انتشاری CO₂ را برای

وسایل نقلیه موتورسیکلت و سواری تخمین زدند و کاربرد موفق مدل در محیط‌های واقعی را تأیید کردند (۷). همچنین، یانگ و همکاران^۴ در سال ۲۰۲۵ با بررسی کامل فرآیند انتشار VOC در خودروها، اهمیت در نظر گرفتن انتشار تبخیری را در کنار انتشار اگزوزی نشان دادند و تأکید کردند که این عوامل باید در چارچوب مدل‌هایی نظیر IVE لحاظ شوند (۸).

هوی و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۷، مدل بین‌المللی انتشار آلاینده‌های خودرو (IVE) را در چین ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل IVE انتشار CO را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما انتشار NO_x را تا ۱/۵ تا ۳/۵ برابر بیش از حد برآورد می‌کند. این یافته‌ها ضرورت اعمال اصلاحات در مدل IVE را برای پیش‌بینی دقیق‌تر آلاینده‌ها نشان داد (۹).

میرمحمودی و همکاران در سال ۲۰۱۶، به بررسی تأثیر تزریق همزمان گاز طبیعی و بنزین بر عملکرد و آلاینده‌گی موتورهای دوگانه‌سوز پرداختند. نتایج نشان داد که این ترکیب منجر به کاهش کلی آلاینده‌های NO_x، HC و CO₂ شده، اما تولید CO افزایش یافته است. این پژوهش نشان داد که مدل شبیه‌سازی‌شده به‌خوبی با داده‌های تجربی مطابقت دارد و تزریق همزمان قدرت و گشتاور موتور را کاهش می‌دهد (۱۰).

آدواگبا و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۳، در این تحقیق، مقادیر آلاینده‌گی یک خودروی فولکس‌واگن مدل ۱۹۹۶ را در حالت‌های مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که خودروهای فرسوده به دلیل عملکرد ضعیف موتور و سیستم احتراقی ناقص، آلاینده‌های

^۴ Yang et al.^۵ Huiet al.^۶ Aduagba et al.^۱ International Vehicle Emissions^۲ Saberiyanisani et al.^۳ Hafsha et al.

CO، HC و NO را در سطوح بالاتری نسبت به استانداردهای یورو ۲ تولید می‌کنند. این مطالعه بر لزوم ارتقای استانداردهای آلاینده‌گی تأکید داشت (۱۱).

توماس و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۳، در این پژوهش به بررسی امکان ادغام آزمایش‌های انتشار NO_x در فرآیندهای بازرسی فنی دوره‌ای (PTI) در اتحادیه اروپا پرداختند. نتایج نشان داد که روش‌های تست دور آرام و دور آرام بالا پتانسیل بالایی در شناسایی آلاینده‌ها دارند، اما برای کاهش انتشار واقعی، آزمایش‌های پیشرفته‌تر ضروری است (۱۲).

یوسفی و همکاران در سال ۲۰۱۶، در این مطالعه به بررسی آلاینده‌های خروجی از خودروهای پژو ۲۰۶، سمند معمولی، و سمند تاکسی در مشهد پرداختند. نتایج نشان داد که سمند معمولی و تاکسی میزان بیش‌تری آلاینده‌های HC و CO تولید می‌کنند، در حالی که پژو ۲۰۶ میزان بیش‌تری CO₂ تولید می‌کند. این تفاوت‌ها به مکانیسم احتراق سوخت در این خودروها مرتبط است (۱).

اشرفی و همکاران در سال ۲۰۱۸، با استفاده از مدل IVE، این مطالعه تأثیر گسترش خطوط اتوبوس‌های تندرو (BRT) بر آلودگی هوا را در تهران بررسی کردند. نتایج نشان داد که گسترش این خطوط موجب کاهش قابل‌توجه آلاینده‌هایی نظیر CO₂ و ترکیبات آلی فرار شد، اما برخی آلاینده‌ها مانند اکسیدهای نیتروژن کمی افزایش یافتند (۱۳).

دهقان و همکاران در سال ۲۰۱۹، در این پژوهش، میزان آلاینده‌گی خروجی اگزوز خودروهای سبک در شیراز را بررسی کردند. نتایج نشان داد که خودروهای قدیمی‌تر مانند پژو GLX و پژو پارس، میزان بیش‌تری

CO و HC تولید می‌کنند، اما تولید CO₂ با افزایش سال ساخت خودرو افزایش می‌یابد. این مطالعه اهمیت معاینه فنی منظم و ارتقای فناوری‌های موتور خودروها را برجسته کرد (۱۴).

صابریان ثانی و همکاران در سال ۲۰۲۴ با مقایسه انتشار واقعی آلاینده‌ها با مدل IVE نشان دادند که این مدل در برآورد برخی آلاینده‌ها مانند NO_x تا حدودی دقیق است، اما برای آلاینده‌های دیگر، به اعمال ضرایب تصحیح نیاز دارند (۱۵).

مادزیل و همکاران^۲ در سال ۲۰۲۱، در این پژوهش، با جایگزینی ۲۵ درصدی وسایل نقلیه موتوری با وسایل نقلیه الکتریکی در لهستان، منجر به کاهش ۳۰ درصدی غلظت PM₁₀ در طول جاده‌ها شد. این مطالعه مزایای ناوگان‌های الکتریکی در کاهش آلاینده‌ها را برجسته کرد (۱۶).

طاهرسارایی و همکاران در سال ۲۰۱۱، در پژوهشی به بررسی فاکتورهای انتشار آلاینده‌ها در خودروهای پژو ۴۰۵ در شهر ایلام پرداختند. این مطالعه نشان داد که حدود ۵۶/۷ درصد از کل بنزین مصرفی شهر ایلام توسط خودروهای پژو ۴۰۵ مصرف می‌شود و این میزان به تولید سالانه مقادیر قابل‌توجهی از آلاینده‌ها منجر شده است؛ به‌طوری‌که HC برابر با ۱/۹۸ تن، CO حدود ۱۶/۶۵ تن، CO₂ حدود ۱۷۲۶ تن و NO حدود ۷/۴۹ تن در سال تولید می‌شود. همچنین، محاسبات نشان داد که از مجموع ۳۱۵۲۲/۸۵۳ تن آلاینده‌های تولیدی توسط خودروهای فعال در این شهر، سهم پژو ۴۰۵ برابر با ۵/۷ درصد است. این پژوهش نشان داد که کاهش سن خودرو ارتباط مستقیمی با کاهش آلاینده‌ها دارد و عدم

² Mądział et al.
۸۳

¹ Thomas et al.

انجام معاینه فنی طی یک سال منجر به افزایش حدود ۱۰ درصدی انتشار برخی آلاینده‌ها مانند HC شده است. مقایسه این آلاینده‌ها با استانداردهای آمریکایی نیز نشان داد که مقادیر آلاینده‌هایی مانند CO و NO حدود سه برابر بیش‌تر از حد استانداردهای تعریف‌شده پس از سال ۲۰۰۰ است (۱۷).

مجنونی و همکاران در سال ۲۰۲۳، در مطالعه‌ای به مقایسه آلاینده‌های ناشی از سوخت بنزین و گاز طبیعی در یک موتور دوگانه‌سوز پرداختند. این پژوهش نتایج تست‌های معاینه فنی روی موتور TU5 را ارائه می‌دهد که نشان داد درصد حجمی کربن مونوکسید خروجی از اگزوز در حالت بنزین ۷۰ درصد بیش‌تر از حالت گاز است و کربن دی‌اکسید نیز ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. با این حال، عدد لامبدا در حالت گاز برابر با ۱/۰۲ و در حالت بنزین ۱/۰۱۳ است که مقدار بنزین به عدد ایده‌آل نزدیک‌تر است. پژوهشگران پیشنهاد کردند که برای بهبود احتراق در حالت گاز، از تجهیزات خشک‌کن گاز طبیعی در جایگاه‌های عرضه سوخت استفاده شود تا رطوبت اضافی به مخزن خودرو وارد نشود (۱۸).

رضازاده در سال ۲۰۰۸، وضعیت انتشار گازهای آلاینده از خودروهای بنزینی در شهر قزوین را مطالعه و بررسی کرد. در این پژوهش، خروجی اگزوز ۶۳ خودرو از مدل‌های مختلف با پارامترهایی همچون HC، CO₂، CO، O₂ و NO اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که از نظر انتشار HC، خودروی شورلت بیش‌ترین میزان و تاکسی‌های پیکان کم‌ترین میزان را داشتند، درحالی‌که پژو ۲۰۶ از نظر هر دو شاخص HC و CO بهترین وضعیت را داشت. به‌طورکلی، ۷۷ درصد از خودروهای بررسی‌شده خروجی آلاینده‌های بالاتر از

حد استاندارد داشتند. تنظیم به‌موقع موتور به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها پیشنهاد شد (۱۹).

شریعتی و همکاران در سال ۲۰۲۲، با استفاده از نرم‌افزار IVE، میزان تولید سالانه آلاینده‌های خودرویی در شهر کرمانشاه را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که مونوکسید کربن ۶۹ درصد از کل آلاینده‌های تولیدشده از منابع متحرک را تشکیل می‌دهد و اکسیدهای نیتروژن با ۲۱ درصد سهم در رتبه دوم قرار دارند. درحالی‌که اکسیدهای گوگرد با ۰/۰۱۶ درصد کم‌ترین سهم را داشتند. میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن در فصول مختلف ثابت بوده و تنها در فصل تابستان به ۲۰۰ تن افزایش یافت. سهم خودروهای سواری ۳۷ درصد و کامیون‌ها ۳۶ درصد از آلاینده‌های نیتروژن را تشکیل می‌دادند، که نشان‌دهنده نقش بالای کامیون‌ها در آلودگی هوا است (۲۰).

خازینی و همکاران در سال ۲۰۱۹، میزان انتشار پراکندگی آلاینده‌های خودروهای سواری، تاکسی و اتوبوس در شهر تبریز را با استفاده از مدل‌های IVE و AERMOD مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که خودروهای سواری با ۹۴/۳ درصد بیش‌ترین سهم را در انتشار آلاینده‌ها داشتند. آلاینده‌های اصلی شامل CO، CH₄، NO_x و VOCs بودند که به ترتیب ۸۲/۸ درصد، ۱۱/۲۷ درصد، ۴/۱۸ درصد و ۱/۵۲ درصد از کل آلاینده‌ها را تشکیل دادند. در مجموع، مدل AERMOD تفاوت‌هایی در پیش‌بینی و اندازه‌گیری مقادیر آلاینده‌ها نشان داد، اما به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تحلیل پراکندگی آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفت (۲۱).

بررسی‌های انجام شده در زمینه آلودگی هوای ناشی از وسایل نقلیه، چه در سطح داخلی و چه در سطح بین‌المللی، نشان می‌دهد که عوامل متعددی از جمله نوع سوخت، فناوری موتور، کیفیت معاینه فنی، و الگوهای رانندگی تأثیر مستقیمی بر میزان تولید آلاینده‌ها دارند. تحقیقات بین‌المللی بر اهمیت استفاده از مدل‌های پیشرفته مانند IVE و به‌کارگیری فناوری‌های نوین برای کاهش آلاینده‌ها تأکید کرده‌اند، درحالی‌که مطالعات داخلی عمدتاً بر تحلیل آلاینده‌های تولیدی توسط خودروهای پرکاربرد داخلی و راهکارهای بهبود عملکرد آن‌ها متمرکز بوده است. با وجود تلاش‌های گسترده در این حوزه، همچنان شکاف‌های تحقیقاتی مهمی به چشم می‌خورد. از جمله این شکاف‌ها می‌توان به عدم تحلیل جامع تفاوت‌های عملکردی موتورهای پرکاربرد داخلی در شرایط واقعی و نبود داده‌های به‌روز در زمینه تأثیر فناوری‌های نوین بر کاهش آلاینده‌ها اشاره کرد. همچنین، نتایج متناقض در مقایسه مدل‌سازی‌ها با داده‌های واقعی، نیاز به تنظیم و اصلاح ضرایب مدل‌های موجود را برجسته می‌کند.

پژوهش حاضر درصدد است تا با استفاده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی نرم‌افزاری دقیق، به درک عمیق‌تری از تأثیر نوع موتور، کیفیت سوخت، و شرایط عملکردی بر تولید آلاینده‌ها دست یابد. هدف این مطالعه ارائه راهکارهایی علمی و عملی برای کاهش آلاینده‌های خودرویی و بهبود کیفیت هوا است که بتواند به سیاست‌گذاران، مدیران شهری، و صنعت خودروسازی در اتخاذ تصمیمات مؤثر کمک کند.

با توجه به مشکلات گسترده ناشی از آلودگی هوا، نیاز به مطالعات جامع‌تر و دقیق‌تر درباره تأثیر نوع

موتور، کیفیت احتراق و شرایط عملکردی بر میزان انتشار آلاینده‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. این پژوهش با هدف تحلیل دقیق و مدل‌سازی میزان آلاینده‌های تولید شده توسط دو موتور TU5 و XU7 انجام شده است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به سیاست‌گذاران، صنعت خودرو و متخصصان محیط زیست کمک کند تا راه‌حل‌های عملی و علمی برای کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی ارائه دهند. در این پژوهش، از نرم‌افزار IVE برای مدل‌سازی دقیق میزان آلاینده‌های تولید شده توسط این موتورها استفاده شده است. این نرم‌افزار، که به‌طور گسترده در تحلیل‌های زیست‌محیطی و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف عملکردی خودروها به کار می‌رود، امکان ارزیابی دقیق شرایط مختلف رانندگی، نوع سوخت مصرفی و وضعیت نگهداری خودروها را فراهم می‌کند. به کمک این ابزار، می‌توان تأثیر عوامل مختلف را بر میزان انتشار آلاینده‌ها بررسی کرد و به نتایج علمی قابل‌اتکا دست یافت. این مطالعه نه تنها درک عمیق‌تری از وضعیت کنونی کیفیت هوا ارائه می‌دهد، بلکه در ارائه راهکارهای عملی برای کاهش آلودگی، بهبود سلامت عمومی و افزایش بهره‌وری اقتصادی نیز مؤثر خواهد بود. در نهایت، مدل‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار IVE می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران شهری کمک کند تا تصمیمات بهتری در جهت کاهش آلودگی هوا و ارتقای کیفیت زندگی اتخاذ کنند.

مواد و روش‌ها

این تحقیق با هدف بررسی میزان انتشار آلاینده‌های CO، CO₂، HC، SO₂، NO_x، VOC و ذرات معلق PM₁₀ از خروجی اگزوز خودروهای پژو مجهز به دو نوع موتور TU5 و XU7 انجام شد. این

پژوهش برای اولین بار در شهر شیراز با رویکردی میدانی و با نمونه‌برداری مستقیم از خروجی آلاینده‌ها در شرایط مختلف رانندگی، شامل حالت درجا و متحرک دور موتور، و همچنین با مدل‌سازی این آلاینده‌ها توسط نرم‌افزار IVE صورت پذیرفت. در این تحقیق، سیستم سوخت‌رسانی بنزین‌سوز به خودروهایی اشاره دارد که موتور آن‌ها به‌طور اختصاصی برای سوخت بنزین طراحی شده است. از سوی دیگر، خودروهایی که قابلیت استفاده از گاز طبیعی در کنار بنزین را دارند، به عنوان خودروهای پایه‌گازسوز شناخته می‌شوند. در این پژوهش، خودروهای پایه‌گازسوز به دو دسته تقسیم شدند: خودروهایی که بنزین سوخت غالب مصرفی آن‌ها است و خودروهایی که گاز طبیعی به عنوان سوخت غالب استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های بین دو نوع موتور TU5 و XU7 و تحلیل میزان آلاینده‌های خروجی این دو نوع موتور، با تمرکز بر مشخصه‌های زیست‌محیطی و عملکردی آن‌ها است.

- مدل IVE

مدل IVE که در سال ۲۰۰۷ با حمایت سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا^۱ طراحی شد، با هدف اصلی ارائه یک ابزار ملی مناسب جهت تخمین مقادیر انتشار آلاینده‌ها مطابق با شرایط و وضعیت کشورهای مختلف توسعه یافته است. این برنامه، یک نرم‌افزار رایانه‌ای است که توسط گروه تحقیقاتی دانشگاه کالیفرنیا و مرکز تحقیقات فناوری‌های محیط زیست^۲ و با همکاری مرکز تحقیقات سیستم پایدار جهانی^۳

طراحی شده است (۲۲). هدف اصلی این نرم‌افزار، تحلیل مقادیر انتشار آلاینده‌ها در شرایط مختلف و ارائه مدلی قابل انطباق برای مقایسه انتشارات در وسایل نقلیه با مشخصات گوناگون است. این نرم‌افزار توانایی اعمال ضرایب انتشار و انطباق آن‌ها بر اساس شرایط کشورهای مختلف را دارد و تاکنون در مطالعات متعدد به‌عنوان مرجع برای تخمین میزان آلودگی استفاده شده است. مدل‌های مشابه نظیر EMFAC، MOBILE، COPERT IV در کنار این نرم‌افزار، برای بررسی و پیش‌بینی انتشار آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۲). در مطالعه‌ای دیگر، پیش‌بینی انتشار آلاینده‌ها از وسایل نقلیه متحرک در شهر تهران با استفاده از مدل IVE مورد بررسی قرار گرفت. هدف این تحقیق، تحلیل تأثیر فناوری‌های به کار رفته در خودروها، الگوهای رانندگی و شرایط هواشناسی بر انتشار آلاینده‌ها بود. این مدل توانست ارتباط معناداری بین پارامترهای ذکر شده و انتشار آلاینده‌ها ارائه دهد. بر اساس نتایج، متوسط انتشار روزانه آلاینده‌ها از وسایل نقلیه متحرک حدود ۱۵ تن تخمین زده شد، که سهم CO حدود ۸۴/۵ درصد و سهم NO_x حدود ۷/۷۵ درصد بود. علاوه بر این، آلاینده‌های VOC، SO_x و سایر آلاینده‌ها در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این نتایج نشان دهنده نقش مهم فناوری خودروها و تأثیر مستقیم پارامترهای شهری بر میزان انتشار آلاینده‌ها است (۲۳).

- موقعیت مکانی انجام تحقیق

این تحقیق در مرکز معاینه فنی خودرو واقع در استان فارس، شهر شیراز، جاده بوشهر انجام شده

³ Global Sustainable Systems Research (GSSR)

¹ EPA (Environmental Protection Agency)

² College of Engineering - Center for Environmental Research and Technology (CE-CERT)

است. این مرکز به دلیل موقعیت استراتژیک خود در یکی از شلوغ‌ترین نقاط شهر و در مسیر ورود و خروج خودروها به شهر شیراز از سمت جنوب انتخاب گردید. در این مرکز، روزانه ۵ نفر نیرو از ساعت ۷:۳۰ لغایت ۱۶:۳۰ به ارائه خدمات معاینه فنی مشغول هستند و به‌طور میانگین روزانه ۹۰ خودرو تحت بررسی قرار می‌گیرند. شایان ذکر است شهر شیراز، به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران، با رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی، شاهد افزایش تعداد خودروها و به تبع آن افزایش آلودگی هوا است. جاده بوشهر به‌عنوان یکی از پرترددترین مناطق شهری، حجم بالای عبور و مرور خودروها را به خود اختصاص داده و این ویژگی، بررسی وضعیت آلاینده‌گی خودروها در این منطقه را بیش از پیش ضروری کرده است. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر این تردها بر کیفیت هوای منطقه انجام شد تا نقش حمل و نقل و آلودگی‌های ناشی از خودروها بر محیط زیست شهری شیراز مورد ارزیابی قرار گیرد.

- بررسی میزان انتشار آلاینده‌های هوا ناشی از خودرو
 پژو TU5 و XU7 در مرکز معاینه فنی خودرو
 - دستگاه آنالیزور دود بیزپارت مدل پنج‌گاز

اولین آزمونی که پس از پذیرش خودرو در مرکز معاینه فنی انجام می‌شود، مربوط به اندازه‌گیری میزان آلاینده‌های تولیدی هوا شامل CO، CO₂ و HC است. این تست توسط دستگاه آنالیزور دود بیزپارت مدل پنج‌گاز ساخت کشور آلمان انجام می‌شود. در صورتی که نتایج آزمون با استانداردهای تعیین شده (مطابق جدول (۱)) مطابقت داشته باشد، خودرو مجاز به دریافت کارت معاینه فنی خواهد بود؛ در غیر این

صورت، فرصت اصلاح و مراجعه مجدد طی ۱۵ روز به مالک داده می‌شود.

این دستگاه با بهره‌گیری از حسگرهای شیمیایی پیشرفته، توانایی اندازه‌گیری مستقیم و دقیق پنج‌گاز اصلی را دارد که شامل: مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن (CO₂)، هیدروکربن‌های نسوخته (HC)، اکسیژن (O₂) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) می‌باشد. در این دستگاه، غلظت گاز CO₂ نیز همانند سایر گازها به‌صورت مستقیم و بدون نیاز به محاسبه، اندازه‌گیری می‌شود. این ترکیب تحت عنوان پنج‌گاز در استانداردهای جهانی معاینه فنی شناخته می‌شود. دستگاه فوق‌الذکر داده‌های حاصل از سنجش را به‌صورت آنی نمایش داده و امکان ثبت و تحلیل آن‌ها را از طریق نرم‌افزار اختصاصی بیزپارت فراهم می‌سازد.

لازم به ذکر است که دستگاه مورد استفاده در فواصل زمانی منظم، طبق برنامه رسمی شرکت سازنده، توسط کارشناسان مجاز کالیبره می‌گردد تا صحت عملکرد حسگرها حفظ شده و داده‌های خروجی از اعتبار لازم برخوردار باشند. اندازه‌گیری سایر گازها نظیر N₂O، NH₃، VOCs و همچنین ذرات معلق (PM₁₀) از طریق تلفیق داده‌های تجربی و استفاده از مدل بین‌المللی IVE انجام شده است. مدل IVE با بهره‌گیری از فاکتورهای انتشار معتبر و پارامترهای عملکردی وسایل نقلیه، تخمین دقیقی از مقادیر این آلاینده‌ها در شرایط واقعی ترافیک فراهم می‌کند. تصاویر و جزئیات مربوط به عملکرد این دستگاه در شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) نشان داده شده است.

جدول (۱): حدود مجاز آزمون‌های معاینه فنی و استاندارد (۲۳)

نوع آزمون	نوع گاز	حد استاندارد	واحد مورد اندازه‌گیری
گازهای منتشره از خودروهای کاربراتوری	O ₂	≤ ۳	%Vol
	HC	≤ ۴۰۰	ppm
	CO	≤ ۴	%Vol
گازهای منتشره از خودروهای انژکتوری	O ₂	≤ ۳	%Vol
	HC	≤ ۲۵۰	ppm
	CO	≤ ۰/۷	%Vol
شتاب ترمزگیری	-	> ۵۰	%
علم توازن بین محورها	-	> ۴۰	%
شتاب ترمز دستی	-	> ۱۲	%
کارایی کمک فتر	-	> ۴۰	%
اختلاف بین دو کمک	-	> ۵۰	%



(ب)



(الف)

شکل (۱): الف- نمای کلی دستگاه آنالیزور دود مدل پنج‌گاز، ب- صفحه نمایش دستگاه آنالیزور دود مدل پنج‌گاز

محدوده مناسب از الزامات است. در حین انجام تست، دور موتور خودرو باید در حالت دور آرام قرار داشته باشد. در نهایت نیز می‌توان برای تعیین دور موتور از گیره القایی متصل به دستگاه استفاده نمود و گیره را به شمع وصل و نتیجه را روی مانیتور مشاهده کرد.

- روش جمع‌آوری داده‌ها

برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به میزان انتشار گازهای CO، CO₂ و HC از خودروهای مورد بررسی، ابتدا شرایط لازم برای کار با دستگاه آنالیزور دود (پنج گاز) فراهم شد. سپس، پروب انعطاف‌پذیر دستگاه مطابق شکل (۲) داخل اگزوز خودرو قرار گرفت. این فرآیند در شرایطی انجام شد که خودرو در وضعیت

- شرایط مورد نیاز برای استفاده از دستگاه آنالیزور دود بی‌ظارت مدل پنج‌گاز

برای انجام دقیق آزمایش‌ها با دستگاه، ضروری است که دمای محیط در بازه ۵+ تا ۴۰+ سانتی‌گراد قرار داشته و دستگاه بر روی سطحی کاملاً صاف و پایدار مستقر شود. همچنین، اگزوز خودرو باید به‌طور کامل محکم و بدون نشتی باشد تا در هنگام اندازه‌گیری مشکلی ایجاد نشود. در زمان استفاده از دستگاه، نباید از ساسات دستی یا اتوماتیک استفاده کرد. درجه حرارت موتور باید بیش از ۱۱۰ سانتی‌گراد باشد تا نتایج اندازه‌گیری قابل اطمینان باشند. علاوه بر این، تنظیم دمای روغن موتور و قرار گرفتن آن در

درجا فعالیت می‌کرد. مقادیر اندازه‌گیری شده به صورت دستی در جدولی که از پیش آماده شده بود ثبت گردید. همچنین، سنجش آلاینده‌گی برای خودروهای بنزین سوز و خودروهای پایه گازسوز با سوخت بنزین و گاز به صورت جداگانه انجام شد. در ادامه، میزان انتشار گازهای CO، CO₂ و HC از خودروی پژو XU7 در سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف (بنزینی و پایه گازسوز با سوخت بنزین و گاز) در شرایط متحرک (سرعت متوسط ۱۰ کیلومتر در ساعت) با استفاده از جک سوسماری مطابق با مراحل فوق بررسی شد. لازم به ذکر است که در تمامی مراحل تغییر سوخت از بنزین به گاز در خودروهای پایه گازسوز و گازسوز، حداقل یک دقیقه زمان برای رسیدن سوخت به موتور خودرو در نظر گرفته شد. در نهایت، فرآیند جمع‌آوری داده‌ها مطابق با اهداف پژوهشی از مجموع ۷۲۰ خودرو انجام گرفت؛ شامل ۳۶۰ خودرو در وضعیت درجا و ۳۶۰ خودرو در وضعیت متحرک. این داده‌ها طی مدت چهار ماه از تاریخ ۱۴۰۲/۲/۱۰ تا ۱۴۰۲/۶/۱۰، به صورت روزانه و از ساعت ۷:۳۰ صبح لغایت ۱۶:۳۰ بعد از ظهر با مراجعه به مرکز معاینه فنی گردآوری شدند. همچنین، مقادیر NOx، VOC و ذرات معلق PM10 به صورت مستقیم اندازه‌گیری نشدند و به کمک مدل‌سازی در نرم‌افزار IVE و بر اساس اطلاعات ناوگان، شرایط محیطی و عملکردی وسایل نقلیه برآورد گردیدند.

در این پژوهش، فرآیند اندازه‌گیری یا برآورد آلاینده‌های خروجی وسایل نقلیه به دو روش مکمل انجام شده است. آلاینده‌های اصلی شامل مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن (CO₂)، هیدروکربن‌های نسوخته (HC)، اکسیژن (O₂) و اکسیدهای نیتروژن

(NOx) با استفاده از دستگاه آنالیزور دود بیزپارت مدل پنج‌گاز ساخت کشور آلمان به صورت مستقیم و لحظه‌ای اندازه‌گیری گردیده‌اند. این دستگاه با برخورداری از حسگرهای الکتروشیمیایی دقیق و سامانه‌های کنترل کیفیت داخلی، امکان پایش هم‌زمان گازهای مذکور را فراهم نموده و به صورت دوره‌ای توسط کارشناسان فنی کالیبره می‌شود تا صحت عملکرد آن حفظ شود. در مقابل، آلاینده‌هایی نظیر دی‌نیتروژن اکسید (N₂O)، آمونیاک (NH₃)، ترکیبات آلی فرار (VOC)، بوتادین، فرمالدئید، استالدئید و ذرات معلق (PM10) به صورت مستقیم در مراکز معاینه فنی قابل سنجش نبوده‌اند. لذا، برآورد این آلاینده‌ها از طریق مدل‌سازی در نرم‌افزار IVE انجام شده است. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های واقعی ناوگان، اطلاعات عملکردی خودرو (نظیر بار موتور، نوع سوخت، سرعت متوسط، دور موتور و...) و ضرایب انتشار استخراج شده از پایگاه‌های بین‌المللی مانند EMFAC و MOVES تخمین دقیقی از مقادیر آلاینده‌ها در شرایط واقعی رانندگی ارائه می‌دهد. برای مثال، مقادیر N₂O بر اساس ضرایب تبدیلی بین NOx و N₂O که در پایگاه داده مدل IVE تعریف شده‌اند محاسبه شده است. همچنین آلاینده‌هایی مانند بوتادین، فرمالدئید و استالدئید با استفاده از ضرایب پیش‌فرض انتشار وابسته به نوع موتور، ترکیب سوخت، دمای احتراق و بار وارده بر پشیرانه، مدل‌سازی شده‌اند. مدل IVE به دلیل اعتبار علمی و استفاده گسترده در مطالعات انتشار در بیش از ۳۰ کشور، ابزار قابل اعتمادی برای برآورد آلاینده‌هایی است که امکان سنجش میدانی آن‌ها وجود ندارد. در این تحقیق، ترکیب روش‌های تجربی و مدل‌سازی،

امکان تحلیل جامع‌تری از عملکرد زیست‌محیطی خودروهای مورد بررسی فراهم کرده است.



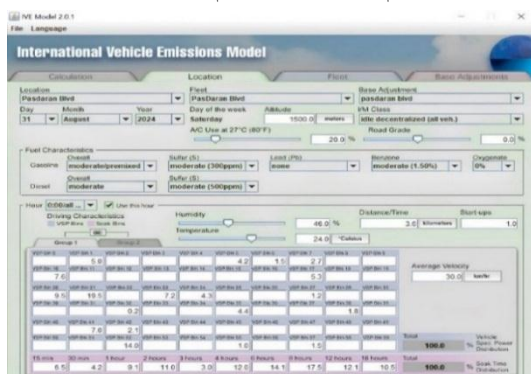
شکل (۲): نحوه قرارگیری پروب دستگاه آنالیزور دود (پنج‌گاز) در اگزوز خودرو در حالت درجا

- بررسی میزان انتشار آلاینده‌های هوای ناشی از خودرو
پژو توسط مدل IVE

در این مطالعه، از مدل IVE برای کمی‌سازی مقادیر آلاینده‌های تولیدی از خودروهای مجهز به موتور XU7 و TU5 استفاده شد. داده‌های مورد نیاز این مدل در قالب دو فایل با عناوین فایل محیطی^۱ و فایل ناوگان^۲ وارد شدند. اطلاعات مورد نیاز فایل محیطی شامل شرایط اقلیمی، کیفیت سوخت و الگوی رانندگی منطقه بوده و فایل ناوگان به جزئیات مشخصات فنی خودروها، تعداد و نوع سوخت مصرفی آنها اختصاص داشت. شکل (۳) نمایی از صفحه ورودی اطلاعات فایل محیطی و داده‌های مورد نیاز مدل IVE را نمایش می‌دهد. این مدل امکان پیش‌بینی میزان انتشار گازهای آلاینده مختلف از خودروها در شرایط مختلف رانندگی و محیطی را فراهم می‌کند.

فایل محیطی حاوی اطلاعات جامع و دقیقی درباره شرایط جغرافیایی، اقلیمی و ویژگی‌های سوخت منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این داده‌ها شامل موقعیت جغرافیایی (مانند شیب و طول منطقه، ارتفاع

از سطح دریا)، داده‌های هواشناسی (نظیر رطوبت نسبی و دما)، نوع و ترکیب سوخت مصرفی (همچون مقدار بنزن و ترکیبات اکسیژن‌دار، درصد ترکیبات گوگردار)، درصد استفاده از کولر، تعداد دفعات روشن شدن خودرو، الگوهای سیکل رانندگی، سرعت متوسط و مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه است (شکل (۳)). در این پژوهش، رطوبت نسبی منطقه برابر با ۴۶ درصد، متوسط دما ۲۴ سانتی‌گراد، میزان بنزن موجود در بنزین ۱/۵ درصد حجمی و میزان گوگرد موجود در بنزین مصرفی ۳۰۰ ppm در نظر گرفته شد. ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۵۰۰ متر ثبت شده و شیب جاده صفر درصد تعیین شد. همچنین سرعت متوسط خودروها برابر با ۳۰ کیلومتر بر ساعت تنظیم شد. سایر مشخصات محیطی و سوختی مطابق با داده‌های نمایش داده شده در نرم‌افزار IVE تنظیم گردید.



شکل (۳): نمایی از بخش ورود اطلاعات مربوط به فایل محیطی و داده‌های لازم برای اجرای مدل

به‌طور کلی، نرخ انتشار آلودگی‌های تولید شده از وسایل نقلیه با استفاده از داده‌های مربوط به منطقه خاصی در این مدل قابل محاسبه است. همان‌طور که در رابطه (۱) نشان داده شده است، پیش‌بینی میزان انتشار آلودگی در مدل IVE بر مبنای نرخ انتشار اولیه برای هر فناوری (B) و تعدادی ضرایب اصلاح (K)

² File-Fleet

¹ File Location

انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در این رابطه، Q_t بیانگر نرخ انتشار آلودگی خودرو بر اساس واحد جرم در واحد زمان یا مسافت است (۲۴). ضرایب تصحیح مورد استفاده در نرم افزار IVE در جدول (۲) لیست شده است.

$$Q_t = B_t \times K_{1-t} \times K_{2-t} \times \dots \times K_{x-t} \quad (۱)$$

در مدل IVE دو نوع نرخ انتشار پایه تعریف شده است: یکی مربوط به انتشار آلودگی در حین رانندگی و دیگری مربوط به انتشار هنگام استارت خودرو. رابطه (۲) نرخ انتشار پایه را با اضافه کردن جزئیات مربوط به حرکت و نوع الگوی رانندگی برای هر فناوری، وزن‌دهی می‌کند (۲۴).

$$Q_{\text{running}} = \frac{\sum f(t) \times \sum_d (Q(t) \times U_{\text{ftp}} \times f(dt) \times k(dt))}{U_c} \quad (۲)$$

$$Q_{\text{start}} = \sum f(t) \times Q(t) \times \sum_d (f(dt) \times K(dt)) \quad (۳)$$

در این معادله، داریم:

B_t : نرخ انتشار پایه برای هر نوع فناوری (در حالت استارت یا حرکت، بر حسب گرم بر کیلومتر).
 $Q(t)$: مقدار انتشار پیش‌بینی شده برای هر نوع فناوری (در حالت استارت یا حرکت، بر حسب گرم بر کیلومتر).

$f(t)$: نسبت تعداد سفرها برای فناوری مشخص.

$f(dt)$: نسبت زمان در هر نوع از سبک رانندگی یا

نسبت زمان سرد شدن موتور برای فناوری خاص.

U_{ftp} : سرعت متوسط در سیکل رانندگی استاندارد (بر

حسب کیلومتر بر ساعت).

U_c : سرعت متوسط در سیکل رانندگی خاص (این

مقدار به عنوان ورودی توسط کاربر در فایل محیطی

وارد می‌شود و بر حسب کیلومتر بر ساعت است).

ضریب مربوط به نوع رانندگی یکی از مهم‌ترین ورودی‌ها در نرم‌افزار IVE محسوب می‌شود. این ضریب از تابعی که وابسته به سرعت لحظه‌ای خودرو، تغییر ارتفاع، قدرت مشخصه خودرو^۱ (VSP)، تنش موتور^۲ و چگالی هوا است، به دست می‌آید. این پارامترها از داده‌های مرتبط با سیکل رانندگی استخراج می‌شوند. در مدل IVE، رابطه‌ای برای محاسبه VSP استفاده می‌شود که بر اساس وزن خودرو، ضریب درگ (کشیدگی) و دیگر عوامل طراحی شده و با دقت خوبی برای خودروهای سبک و متوسط اعتبار دارد. رابطه‌ای که برای محاسبه VSP استفاده می‌شود به صورت زیر است (۲۴):

$$VSP = v \times [1.1 a + 9.81 \times (\tan^{-1}(\sin(\text{grade}))) + 0.132] + (0.000302)v^3 \quad (۴)$$

که در معادله (۴)، داریم:

$$\text{grade} = \frac{h_{t=0} - h_{t=-1}}{V_{(t=-1 \text{ to } 0 \text{ seconds})}} \quad (۵)$$

سرعت (v) بر حسب متر بر ثانیه.

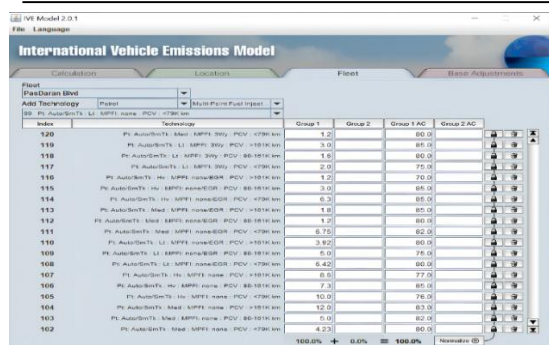
شتاب (a) بر حسب متر بر مجذور ثانیه.

ارتفاع (h) بر حسب متر.

فایل ناوگان شامل اطلاعات جامعی درباره ناوگان حمل و نقل شهری است. این اطلاعات شامل نوع وسایل نقلیه (مانند خودروهای سواری شخصی، تاکسی‌ها، اتوبوس‌ها، کامیون‌ها و موتورسیکلت‌ها)؛ نوع سوخت مانند گازوئیل، بنزین، پروپان، اتانول، LPG، CNG و سوخت‌های ویژه دیگر؛ سیستم‌های سوخت‌رسانی (مانند کاربراتوری، پاشش تک‌نقطه‌ای، پاشش چندنقطه‌ای، پیش‌تزیق، پاشش مستقیم و موتورهای دو زمانه یا چهار زمانه)؛ ویژگی‌های وسیله

² Engine- Stress

¹ Vehicle Specific Power



شکل (۴): نمایی از صفحه ورودی اطلاعات فایل ناوگان

و داده‌های مورد نیاز مدل

الزامی است ذکر شود که جدول (۲) اطلاعات پایه و اولیه مورد نیاز جهت مدل‌سازی ضرایب انتشار آلاینده‌های هوای ناشی از آگروز خودروی پژو با استفاده از نرم‌افزار IVE را نمایش می‌دهد.

جدول (۲): اطلاعات ورودی به مدل IVE برای سنجش کمی میزان آلاینده‌های منتشر شده از خودروی پژو

اطلاعات ورودی مدل	اجزاء مدل	
۱۵۰۰ متر	ارتفاع از سطح دریا	فایل محیطی (Location file)
صفر درصد	شیب جاده	
۲۴ سانتی‌گراد	دما	
۴۶ درصد	رطوبت نسبی	
بنزین و گاز	نوع سوخت مصرفی	
۱/۵ درصد حجمی	مقدار بنزن	فایل ناوگان (Fleet file)
۳۰۰ ppm	میزان گوگرد	
براساس پرسش‌نامه اولیه	درصد استفاده شده از کولر	
براساس پرسش‌نامه اولیه	تعداد روشن شدن خودرو	
براساس پیش‌فرض مدل (برای کشور چین)	دوره رانندگی	
۳۰ کیلومتر بر ساعت	سرعت متوسط	فایل ناوگان (Fleet file)
براساس پرسش‌نامه اولیه	کل مسافت طی شده خودرو	
سواری شخصی	نوع خودرو	
بنزین و CNG	نوع سوخت مصرفی	
انژکتوری و بنزین‌سوز و پایه گازسوز با سوخت گاز	سیستم سوخت‌رسانی	
براساس پرسش‌نامه اولیه	مقدار سن خودرو	فایل ناوگان (Fleet file)
یورو ۴	استاندارد محیط زیست	

نتایج و بحث

- بررسی میزان انتشار آلاینده‌های هوای ناشی از خودرو
پژو در مرکز معاینه فنی خودرو

- بررسی میزان گازهای خروجی از خودروی پژو مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف در وضعیت سکون (درجا) در این بخش، نتایج حاصل از برآورد آلاینده‌ها با استفاده از مدل بین‌المللی IVE ارائه شده است. کلیه نمودارهای شکل‌های (۶) تا (۱۰) بر اساس خروجی‌های نرم‌افزار IVE و مبتنی بر اطلاعات ناوگان، پارامترهای محیطی، کیفیت سوخت و رفتار رانندگی استخراج شده‌اند. این نمودارها نمایانگر تخمین مدل‌سازی شده هستند و نه مقادیر تجربی حاصل از اندازه‌گیری مستقیم در مراکز معاینه فنی. شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) میزان انتشار گازهای CO، NO_x، ذرات معلق PM10 و آلاینده‌های VOC، سرب (Lead)، بنزن (Benzene) و آمونیاک (NH₃) از آگروز خودروهای پژو با موتورهای TU5 و XU7 را نشان می‌دهند. این خودروها مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف (بنزین سوز و پایه گازسوز با سوخت بنزین یا گاز) بوده و در شرایط کارکرد متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده از ۷۲۰ خودروی پژو با این دو نوع موتور و سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف است.

بررسی‌ها نشان داد که از نظر میزان گازهای CO و ذرات معلق (PM10) خروجی از آگروز، هیچ تفاوت معناداری بین سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف وجود ندارد (شکل (۶)). با این حال، در مورد سایر گازهای خروجی از آگروز، مانند دی‌اکسید کربن (CO₂) و ترکیبات آلی فرار (VOC)،

در نهایت، با ورود تمام داده‌های لازم، مدل IVE به تحلیل اطلاعات پرداخته و میزان انتشار آلاینده‌های هوا را تخمین می‌زند. در این فرآیند، مقادیر مربوط به انتشار آلاینده‌های CO و CO₂ استخراج می‌شوند. در بخش محاسبات (Calculation) مدل IVE (شکل (۵))، پس از وارد کردن و تنظیم مشخصات مربوط به ناوگان مورد مطالعه در مراحل قبل، محاسبات مربوط به ناوگان برای بازه‌های زمانی یک ساعته و یک روزه و با واحد اندازه‌گیری مورد نظر انجام می‌شود. ساعت مورد استفاده نیز براساس زمان انجام آزمون و سنجش وارد می‌گردد.

میزان انتشار آلاینده‌ها در این مدل شامل سه حالت است: حالت استارت خودرو، حالت رانندگی و حالت جمع‌بندی این دو. در پایان این تحقیق، میزان انتشار آلاینده‌های مذکور برای خودروهای پژو مجهز به موتورهای XU7 و TU5 با سیستم‌های سوخت‌رسانی بنزین سوز و گازسوز (با سوخت گاز)، در شرایط عملی واقعی و داده‌های حاصل از مدل IVE، با یکدیگر مقایسه خواهد شد. این مقایسه به منظور دستیابی به برآورد دقیق‌تری از میزان انتشار آلاینده‌ها انجام می‌شود.

	CO	VOC	VOC exp	NO _x	SO _x	PM
Start-up Hour	37.39	2.98	0.91	3.8	0.01	0.05
Running Hour	187.74	14.6	0.98	13.56	0.1	0.07
Total Hour	225.13	17.58	1.88	17.36	0.11	0.13
Start-up Day	37.39	2.98	0.91	3.8	0.01	0.05
Running Day	187.74	14.6	0.98	13.56	0.1	0.07
Total Day	225.13	17.58	1.88	17.36	0.11	0.13

شکل (۵): نمایی از صفحه محاسبات (File Calculation) در

مدل IVE

تفاوت‌های معناداری مشاهده شد. بیش‌ترین میزان خروجی CO_2 مربوط به خودروهای مجهز به سیستم سوخت‌رسانی پایه گازسوز با سوخت بنزین است، در حالی که بیش‌ترین میزان VOC در خودروهای مجهز به سیستم پایه گازسوز با سوخت گاز ثبت شده است (شکل (۷)). در شرایط استارت و موتور سرد، آلاینده‌های تولیدی به‌طور قابل‌توجهی بیش‌تر از شرایط عادی رانندگی بودند. مطابق نمودارهای مربوط به VOC و VOC Evap (شکل (۷))، در زمان استارت موتور، میزان VOC تبخیری به‌شدت افزایش یافت و این موضوع نقش مهمی در افزایش انتشار آلاینده‌ها در ساعات اولیه کارکرد موتور دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که سیستم احتراق در این شرایط حساسیت بالایی دارد. شکل (۸) میزان آلاینده‌های Lead، Benzene و NH_3 را در شرایط راه‌اندازی و کارکرد مقایسه می‌کند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان Benzene و NH_3 در شرایط کارکرد مشاهده می‌شود، در حالی که Lead مقدار بسیار کمی دارد و در هر دو حالت تقریباً برابر است. این نتایج تأکید می‌کنند که آلاینده‌های Benzene و NH_3 به‌شدت تحت تأثیر فرآیندهای احتراق و سوخت‌رسانی قرار می‌گیرند. بر اساس گفته سرحدی و همکاران در سال ۲۰۱۷، عواملی مانند میزان مناسب اکسیژن، درجه حرارت مناسب، وجود زمان کافی برای احتراق و اختلاط کامل سوخت با هوا در محفظه احتراق، نقش مهمی در انجام احتراق کامل سوخت ایفا می‌کنند. این فرآیند به تولید دی‌اکسید کربن (CO_2) منجر می‌شود. از سوی دیگر، احتراق ناقص زمانی رخ می‌دهد که شرایط فوق به‌صورت معکوس اتفاق بیفتد، یعنی میزان

اکسیژن کافی نباشد، درجه حرارت مناسب فراهم نشود، زمان احتراق کوتاه باشد یا اختلاط سوخت با هوا به‌طور کامل صورت نگیرد. این شرایط موجب افزایش تولید هیدروکربن‌های نسوخته (HC) و مونوکسید کربن (CO) می‌شود (۲۳).

در یک تحقیق که توسط فتاحی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ انجام شد، به بررسی مزایای استفاده از خودروهای دوگانه‌سوز (بنزین و گاز طبیعی) در کاهش آلاینده‌های هوا پرداخته شد. در این مطالعه مشخص شد که عواملی مانند دمای داخل سیلندر، مصرف سوخت ویژه ترمزی، نسبت هوا به سوخت و ترکیبات شیمیایی سوخت، بر میزان تولید گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) تأثیرگذار هستند. همچنین نشان داده شد که سوخت‌هایی با نسبت کربن به هیدروژن کم‌تر، مقدار کم‌تری از این آلاینده تولید می‌کنند. بنابراین، گاز طبیعی که این ویژگی را دارد، در مقایسه با بنزین، آلودگی کم‌تری از نوع دی‌اکسید کربن ایجاد می‌کند (۲۵).

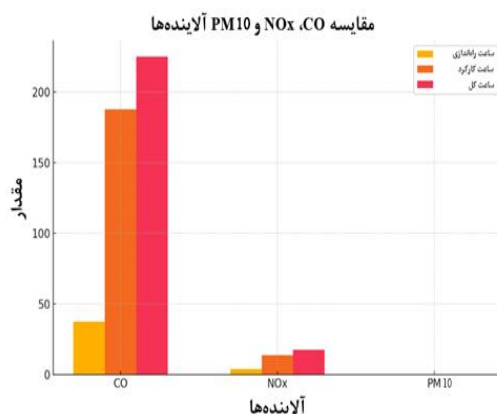
نتایج حاصل از مقایسه میزان میانگین گازهای خروجی از اگزوز دو نوع خودرو، پژو ۲۰۶ با موتور TU5 و پژو ۴۰۵ با موتور XU7، که به سیستم‌های سوخت‌رسانی بنزین‌سوز و پایه گازسوز (با هر دو سوخت بنزین و گاز) مجهز بودند، در حالت سکون (درجا) و بر اساس استاندارد شماره ۹۱۸۱ مورد بررسی قرار گرفت. این استاندارد، حد مجاز آلاینده‌های خروجی از اگزوز خودروها را تعیین کرده است و توسط ستاد معاینه فنی وزارت کشور، سازمان ترافیک و مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی در سال ۱۳۸۹ تصویب و در سال ۱۳۹۰ بازنگری شده است. بررسی‌ها نشان داد که

میزان میانگین آلاینده‌گی تمام خودروهای مورد مطالعه، به‌طور کلی کمتر از حد استانداردهای تعیین شده در مراکز معاینه فنی خودروها بوده است. این نتایج در جدول (۳) ارائه شده‌اند. به عبارت دیگر، عملکرد این خودروها از نظر آلاینده‌گی، در شرایط آزمایش شده، از استانداردهای ملی پیروی می‌کند و حتی در برخی موارد بهبود قابل توجهی نسبت به حد مجاز نشان می‌دهد.

با این حال، با توجه به شکل‌های (۶) تا (۸)، مشخص شد که عملکرد موتور در خودروهای پژو با سیستم پایه گازسوز، نسبت به حالت بنزینی آن، از نظر میزان انتشار آلاینده‌های مذکور نامطلوب‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که خودروهای پژو در وضعیت سکون (درجا)، گزینه مناسبی برای دوگانه‌سوز شدن (استفاده از هر دو سوخت بنزین و گاز) نیستند و استفاده از سوخت گاز در این شرایط می‌تواند منجر به افزایش آلاینده‌گی شود.

جدول (۳): مقایسه میزان میانگین آلاینده‌های منتشر شده از آگروز خودروهای پژو مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف (بنزین‌سوز و پایه گازسوز) در وضعیت سکون (درجا)

نوع خودرو	HC (ppm)	CO (%Vol)
پژو مجهز به سیستم سوخت‌رسانی بنزینی	۱۴۷	۱
پژو مجهز به سیستم سوخت‌رسانی پایه گازسوز با سوخت بنزین	۲۱۰	۰/۹۸
پژو مجهز به سیستم سوخت‌رسانی پایه گازسوز با سوخت گاز	۲۱۱	۱/۰۴
استاندارد ۹۱۸۱ (براساس تجدید نظر سال ۹۰)	< ۲۵۰	< ۲/۵



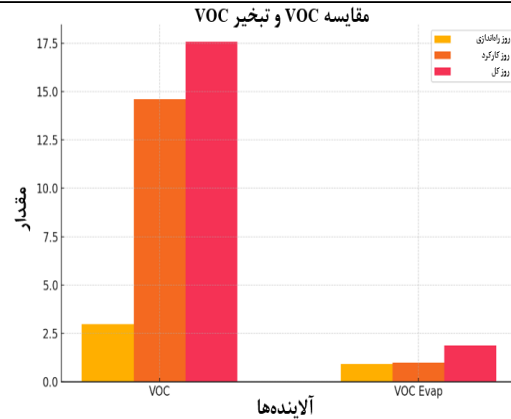
شکل (۶): خروجی مدل IVE جهت مقایسه میزان انتشار آلاینده‌های CO, NOx و ذرات معلق PM10 در شرایط استارت اولیه، زمان رانندگی و مجموع ساعات کارکرد خودروهای پژو ۲۰۶ و پژو ۴۰۵ مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف

نتایج حاصل از مقایسه میزان میانگین آلاینده‌های خروجی از آگروز خودروهای پژو ۴۰۵ مجهز به موتور XU7 و پژو ۲۰۶ مجهز به موتور TU5، با سیستم‌های سوخت‌رسانی بنزینی و پایه گازسوز (با سوخت بنزین و گاز)، در وضعیت سکون (درجا) نشان داد که خودروهای پایه گازسوز در این شرایط آلاینده‌گی بیش‌تری نسبت به خودروهای بنزین‌سوز تولید می‌کنند. بر اساس نمودارها، میزان میانگین آلاینده‌گی CO و HC در خودروهای پایه گازسوز به‌طور قابل توجهی بالاتر از خودروهای بنزین‌سوز است. این موضوع بیانگر آن است که عملکرد سیستم سوخت‌رسانی پایه گازسوز در این خودروها از نظر زیست‌محیطی بهینه نبوده و مطلوب نیست.

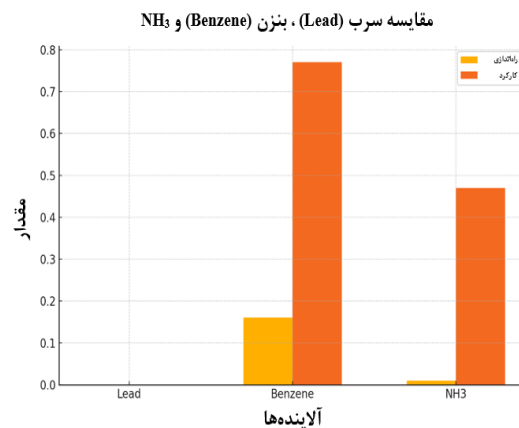
منجر به ائتلاف انرژی و افزایش آلودگی هوا می‌شود. علاوه بر این، حذف مبدل کاتالیستی توسط برخی رانندگان خودروهای پایه گازسوز به منظور افزایش توان موتور، سبب افزایش چشمگیر آلاینده‌ها می‌شود (۲۶).

مبدل کاتالیستی، قطعه‌ای است که در سیستم خروجی موتور نصب شده و سه آلاینده مضر شامل CO، NO_x و HC را به ترکیبات بی‌ضرر تبدیل می‌کند. حذف این قطعه، تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر افزایش آلاینده‌ها دارد و مانع از کاهش آلاینده‌های خودرو می‌شود. از جمله عوامل کاهش کارایی مبدل کاتالیستی می‌توان به حرارت بالا، سمی شدن توسط مواد خروجی از موتور و ضربه‌های مکانیکی اشاره کرد.

یکی از مشکلات عمده خودروهای دوگانه‌سوز در ایران، عدم وجود سیستم مناسب برای سوزاندن بنزین باقی‌مانده در مسیر موتور هنگام تغییر سوخت از بنزین به گاز است. این موضوع منجر به احتراق ناقص و تولید آلاینده CO می‌شود. این مشکل نه تنها باعث افزایش آلاینده‌ها می‌شود، بلکه کارایی موتور را نیز کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه موتورهای پژو برای کار با سوخت گاز طراحی نشده‌اند، این خودروها هنگام استفاده از گاز، بازده کم-تری دارند (۲۶). استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت جایگزین برای خودروهای شهری به دلیل کاهش سایر آلاینده‌ها و ذرات معلق توصیه می‌شود. اما باید توجه داشت که بهبود طراحی موتورهای گازسوز، رفع مشکلات مربوط به تجهیزات دوگانه‌سوز و ارتقاء تکنولوژی تولید خودرو از جمله پیش‌نیازهای اصلی در این حوزه است.



شکل (۷): خروجی مدل IVE جهت مقایسه میزان انتشار ترکیبات آلی فرار (VOC) و تبخیر ترکیبات آلی فرار (VOC Evap) در شرایط استارت، رانندگی و مجموع ساعات روزانه خودروهای پژو ۲۰۶ و پژو ۴۰۵ مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف



شکل (۸): خروجی مدل IVE جهت مقایسه میزان انتشار آلاینده‌های سرب (Lead)، بنزن (Benzene) و آمونیاک (NH₃) در شرایط استارت و رانندگی برای خودروهای پژو ۲۰۶ و پژو ۴۰۵ مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف

بر اساس استانداردهای جهانی، هر مترمکعب گاز طبیعی باید معادل ۱/۳ لیتر بنزین انرژی تولید کند. با این حال، در ایران به دلیل عدم تطابق کیت‌های مورد استفاده (مجموعه تجهیزات مربوط به سیستم سوخت‌رسانی گاز طبیعی) با نوع خودرو، این مقدار به کمتر از ۰/۹ کاهش یافته است. این ناسازگاری

- بررسی میزان انتشار آلاینده‌های هوا از خودرو پژو

توسط مدل IVE

- بررسی میزان انتشار آلاینده‌های CO و CO₂ از خودرو پژو
مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف در وضعیت درجا

(سکون) با مدل IVE

شکل (۹) میزان آلاینده‌های ۳،۱-بوتادین^۱، استالدهید^۲ و فرمالدهید^۳ را در دو حالت راه‌اندازی و کارکرد موتور مقایسه می‌کند که توسط مدل IVE محاسبه شده است. نتایج نشان داد که در تمامی آلاینده‌ها، مقدار انتشار در حالت کارکرد بیش‌تر از حالت راه‌اندازی است. فرمالدهید بیش‌ترین مقدار انتشار را در هر دو حالت دارد، که نشان دهنده نقش مهم آن در انتشار گازهای مضر است. آلاینده ۳،۱-بوتادین کم‌ترین میزان انتشار را نشان می‌دهد، اما همچنان در حالت کارکرد موتور، مقدار آن افزایش قابل توجهی دارد. این داده‌ها نشان دهنده اهمیت توجه به آلاینده‌های فرمالدهید و استالدهید در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های احتراق و سوخت‌رسانی خودروها هستند. شکل (۱۰) میزان انتشار سه آلاینده اصلی، یعنی دی‌اکسیدکربن (CO₂)، دی‌نیتروژن مونوکسید (N₂O) و متان (CH₄)، را در دو حالت راه‌اندازی و کارکرد موتور مقایسه می‌کند که توسط مدل IVE محاسبه شده است. نتایج نشان داد که انتشار گاز CO₂ به طور قابل توجهی در حالت کارکرد موتور بیش‌تر از راه‌اندازی است و سهم عمده‌ای در گازهای خروجی دارد. مقادیر N₂O و CH₄ بسیار پایین‌تر از CO₂ هستند، با این حال مقدار آن‌ها در حالت کارکرد بیش‌تر از راه‌اندازی است. این تفاوت در انتشار CO₂ نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی سیستم سوخت‌رسانی و

کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی است. این داده‌ها تأکید می‌کنند که گاز CO₂ بخش اصلی گازهای خروجی را تشکیل می‌دهد و نیازمند اقدامات مؤثر برای کاهش انتشار آن است. این در حالی است که بر اساس داده‌های استخراج شده از مرکز معاینه فنی، بیش‌ترین میزان انتشار گاز CO از خودروهای پایه گازسوز با سوخت گاز مشاهده شده است. این تفاوت نشان دهنده تأثیر عواملی نظیر فناوری موتور، کیفیت سوخت و نحوه مدل‌سازی است که در مدل IVE با استفاده از ضرایب انتشار و پارامترهای محیطی و رفتاری در نظر گرفته می‌شوند. این موضوع می‌تواند ناشی از احتراق کامل‌تر سوخت بنزین نسبت به گاز طبیعی در موتورهای مورد بررسی باشد. به‌علاوه، مدل‌سازی انجام‌شده توسط شفیع‌پور و عبدالحی در سال ۲۰۱۶ نیز تأیید می‌کند که مدل IVE با استفاده از پارامترهایی مانند فناوری خودرو، رفتار رانندگی، وضعیت سردشدگی موتور و کیفیت سوخت، می‌تواند میزان انتشار آلاینده‌ها را با دقت پیش‌بینی کند. در مجموع، داده‌های شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که در وضعیت کارکرد موتور در حالت درجا، خودروهای بنزین‌سوز میزان بیش‌تری از گازهای CO و CO₂ را نسبت به خودروهای پایه گازسوز تولید می‌کنند. این یافته با مطالعه‌های پیشین که نشان‌دهنده مزایای استفاده از گاز طبیعی در کاهش آلاینده‌های خروجی است، مطابقت دارد (۲۷).

³ Formaldehyde

¹ Butadiene

² Acetaldehyde

- مقایسه میزان آلاینده‌های خروجی از اگزوز خودرو پژو مجهز به انواع سیستم‌های سوخت‌رسانی در دور هایموتور مختلف در مرکز معاینه فنی خودرو و مدل IVE

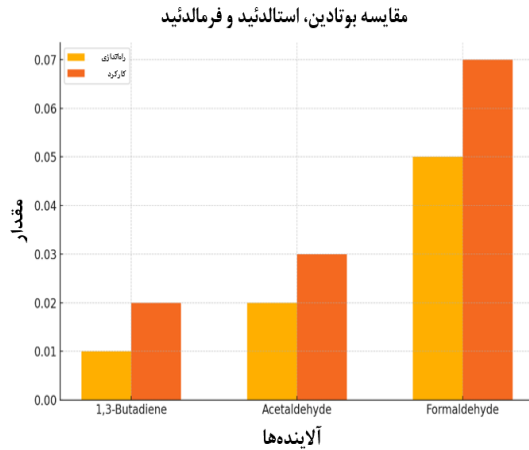
جدول (۳) و شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان‌دهنده میزان گازهای خروجی شامل CO و CO₂ از اگزوز خودرو پژو مجهز به سیستم‌های سوخت‌رسانی بنزین‌سوز و پایه گازسوز با سوخت گاز در حالت‌های مختلف دور موتور هستند. داده‌های جدول و نمودارها مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری واقعی در مراکز معاینه فنی و برآوردهای مدل IVE ارائه می‌دهند. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از مدل IVE و مقایسه آن با نتایج حاصل از مراکز معاینه فنی، مشخص شد که میزان انتشار گاز CO برای خودروی بنزین‌سوز، طبق مدل IVE (شکل (۹))، بیش‌ترین مقدار را نشان می‌دهد. این در حالی است که در آزمایش‌های مراکز معاینه فنی، خودروی پایه گازسوز با سوخت گاز بیش‌ترین میزان انتشار CO را داشته است. این تناقض می‌تواند به عواملی همچون تنظیمات پیش‌فرض مدل IVE و شرایط خاص آزمایش در مراکز معاینه فنی مرتبط باشد. همچنین، در خصوص گاز CO₂، نتایج مدل IVE (شکل (۱۰)) نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان انتشار این گاز نیز از خودروی بنزین‌سوز حاصل شده است. این یافته‌ها با داده‌های واقعی مراکز معاینه فنی در حالت درجا (شکل‌های (۱) الی (۴)) تطابق دارد و نشان‌دهنده احتراق کامل‌تر سوخت بنزین نسبت به گاز طبیعی است.

مطالعات مشابه نیز چنین نتایجی را تأیید می‌کنند. به‌عنوان مثال، مطالعه Hui و همکاران (۹) نشان داده است که مقادیر انتشار CO در اندازه‌گیری‌های واقعی کمی بالاتر از مقادیر برآورد شده توسط مدل IVE است. این اختلاف می‌تواند ناشی از استفاده از داده‌های

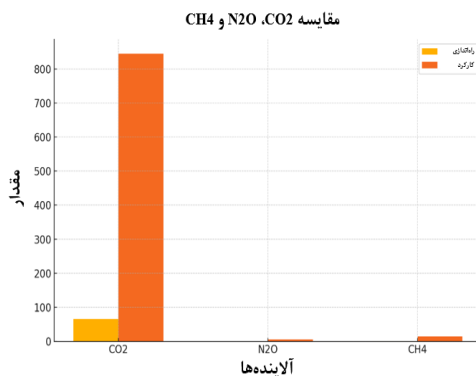
پیش‌فرض مرتبط با شرایط شهر شانگهای در مدل IVE باشد، چرا که اطلاعات کامل محلی برای تنظیم دقیق مدل در دسترس نبوده است. علاوه بر این، تفاوت‌هایی در شرایط محیطی نظیر دما، رطوبت، ارتفاع از سطح دریا و کیفیت سوخت مصرفی میان ایران و چین نیز می‌توانند از عوامل مؤثر بر اختلاف نتایج باشند. همچنین، شبیه‌سازی الگوی رانندگی واقعی توسط مدل IVE به دلیل شرایط آزمایش خودرو بر روی دستگاه جک سوسماری در مراکز معاینه فنی ممکن نیست و این مسئله منجر به ارائه نتایج متفاوت می‌شود. برای بهبود دقت مدل و دستیابی به نتایج بهتر، پیشنهاد می‌شود که عوامل انتشار پایه مدل IVE با استفاده از داده‌های مطالعات محلی تنظیم شوند تا برآوردهای مدل دقیق‌تر و به شرایط واقعی نزدیک‌تر شوند. Hui و همکاران (۹) استفاده از داده‌های واقعی مربوط به الگوی رانندگی، شرایط جاده و سرعت خودرو نیز می‌توانند به بهبود پیش‌بینی مدل کمک کنند. علاوه بر این، بهبود طراحی موتور خودروهای پایه گازسوز برای سازگاری بهتر با سوخت گاز طبیعی می‌تواند منجر به کاهش انتشار گازهای CO و CO₂ شود.

در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل IVE در تخمین میزان انتشار گازهای CO و CO₂ برای خودروهای بنزین‌سوز، مقادیر بیش‌تری را نسبت به مقادیر واقعی ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، در خودروهای پایه گازسوز، میزان انتشار واقعی بیش‌تر از تخمین مدل است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، اصلاح و بهینه‌سازی تنظیمات مدل IVE و استفاده از داده‌های واقعی ضروری است.

نسبت به XU7 به‌ویژه در شرایط عملکرد واقعی و سکون خودرو به شمار می‌رود.



شکل (۹): خروجی مدل IVE جهت مقایسه میزان انتشار آلاینده‌های ۱، ۳-بوتادین، استالدهید و فرمالدهید در دو حالت راه‌اندازی و کارکرد موتور



شکل (۱۰): خروجی مدل IVE جهت مقایسه میزان انتشار آلاینده‌های CO₂، N₂O و CH₄ در دو حالت راه‌اندازی و کارکرد موتور

برای ارزیابی دقیق‌تر تفاوت عملکرد دو نوع موتور TU5 و XU7 از نظر میزان تولید آلاینده‌ها، یک مقایسه آماری از میانگین مقادیر خروجی گازها و ذرات آلاینده تنظیم شده است. این تحلیل ترکیبی از داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از مراکز معاینه فنی و نتایج حاصل از مدل‌سازی نرم‌افزار بین‌المللی IVE است. بر اساس اطلاعات جدول (۴)، موتور TU5 در بیش‌تر شاخص‌های آلاینده‌گی، عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان داده است. به‌طور مشخص، در آلاینده‌های CO، HC، NO_x و VOC و ذرات معلق PM₁₀ مقادیر خروجی موتور TU5 به‌مراتب کم‌تر از XU7 گزارش شده است. این امر به طراحی بهینه‌تر، سیستم انژکتوری دقیق‌تر و فرآیند احتراق کامل‌تر در موتور TU5 نسبت داده می‌شود. در مقابل، مقدار گاز CO₂ در موتور TU5 اندکی بالاتر از XU7 است که این موضوع به عنوان نشانه‌ای از احتراق کامل‌تر سوخت تلقی می‌گردد؛ چرا که در یک احتراق کامل، بخش اعظم کربن موجود در سوخت به دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود. از سوی دیگر، آلاینده‌هایی نظیر NH₃، بنزن و سرب در هر دو نوع موتور مقادیر نسبتاً مشابهی داشته و تفاوت معناداری در آن‌ها مشاهده نشده است. در مجموع، یافته‌های این تحلیل نشان می‌دهند که موتور TU5 از منظر زیست‌محیطی و تولید آلاینده‌ها، گزینه بهینه‌تری

جدول (۴): مقایسه آماری میانگین آلاینده‌های خروجی از موتورهای TU5 و XU7 بر اساس داده‌های تجربی و نتایج مدل IVE

آلاینده	XU7	TU5	تفسیر
CO	بیش‌تر	کم‌تر	TU5 طراحی بهینه‌تری دارد، احتراق کامل‌تر
HC	۲۱۱-۲۱۰ ppm	۱۴۷ ppm	نشان‌دهنده احتراق ناقص در XU7
NOx	۰/۳۰ g/km	۰/۱۸ g/km	TU5 حدود ۴۰ درصد کم‌تر آلاینده نیتروژن
CO ₂	کم‌تر	بیش‌تر	احتراق کامل‌تر در TU5، تولید CO ₂ بیش‌تر
VOC	بیش‌تر	کم‌تر	XU7 در حالت گازسوز VOC بیش‌تری دارد
PM10	بیش‌تر	کم‌تر	XU7 در حالت گازسوز ذرات بیش‌تری تولید می‌کند
NH ₃	تفاوت جزئی	تفاوت جزئی	تفاوت زیادی گزارش نشده
Benzene	تفاوت جزئی	تفاوت جزئی	مشابه در شرایط کارکرد
Lead	کم و تقریباً ثابت	کم و تقریباً ثابت	تأثیر خاصی ندارد

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

یکی از چالش‌های مهم در کشور، مشکل آلودگی هوای کلان‌شهرها است که بخش عمده‌ای از آن ناشی از انتشار آلاینده‌ها توسط وسایل نقلیه متحرک می‌باشد. گزارش بانک جهانی در سال ۲۰۱۶ بیان می‌کند که خسارات اقتصادی ناشی از آلودگی هوا در ایران به حدود ۳۰ میلیارد دلار می‌رسد، که این مقدار معادل ۲/۴۸ درصد از تولید ناخالص داخلی کشور است. این آمار برجسته، ضرورت جدی برای بررسی دقیق‌تر میزان انتشار آلاینده‌های هوای ناشی از منابع مختلف، به‌ویژه خودروها را آشکار می‌سازد.

در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه میزان انتشار آلاینده‌های خودروهای سواری پژو مجهز به موتورهای XU7 و TU5، که به سیستم‌های سوخت‌رسانی مختلف مجهز هستند، در دوره‌های مختلف موتور انجام شده است. این ارزیابی شامل جمع‌آوری داده‌های عملی از مرکز معاینه فنی خودرو و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدل‌سازی توسط نرم‌افزار IVE می‌باشد. این تحقیق به دنبال ارائه دیدگاهی دقیق‌تر درباره رفتار

آلاینده‌های خودروها در شرایط مختلف کارکردی است و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و کاهش آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی‌های انجام‌شده در مرکز معاینه فنی نشان داد که بیش‌ترین میزان آلودگی در حالت درجا مربوط به خودروی پایه گازسوز با سوخت گاز می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که دوگانه‌سوز کردن پژو XU7 برای کاهش آلاینده‌های درجا، گزینه مناسبی نیست. همچنین، بررسی گازهای خروجی از اگزوز نشان داد که انتشار گازهای CO و HC در وضعیت درجا بیش‌تر از حالت متحرک بوده است، در حالی که میزان گاز CO₂ در حالت متحرک افزایش یافته است. مدل‌سازی نرم‌افزار IVE نشان داد که میزان انتشار آلاینده‌های CO و CO₂ در خودروی بنزین‌سوز به‌طور کلی بیش‌تر از خودروی پایه گازسوز است. این یافته‌ها با نتایج مراکز معاینه فنی در تضاد است؛ چرا که در حالت درجا، مراکز معاینه فنی کم‌ترین میزان انتشار CO را در خودروی بنزین‌سوز گزارش داده‌اند. از سوی دیگر، مدل IVE نشان داد که میزان آلاینده‌های

خودروها در حالت درجا نسبت به حالت متحرک بیش‌تر است که نیاز به بررسی دقیق‌تر این نتایج را نشان می‌دهد. مقایسه میان نتایج مدل IVE و مراکز معاینه فنی نشان داد که مدل IVE برای خودروی بنزین‌سوز مقادیر بیش‌تری از آلاینده‌های CO₂ و CO را تخمین می‌زند، در حالی که در مورد خودروی گازسوز، مقادیر واقعی مراکز معاینه فنی بیش‌تر از مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بود. این تفاوت می‌تواند ناشی از استفاده از داده‌های پیش‌فرض مدل برای کشور چین، اختلافات محیطی (دما، رطوبت، ارتفاع از سطح دریا) و همچنین شرایط آزمایش در مراکز معاینه فنی باشد.

به‌طور کلی، گازسوز کردن خودروی پژو XU7 می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کاهش میانگین آلاینده‌های در وضعیت متحرک باشد، به‌ویژه در مورد گازهای CO و HC. با این حال، نتایج مدل IVE نشان داد که میزان انتشار آلاینده‌های VOC و PM₁₀ در خودروهای گازسوز نیز می‌تواند در شرایط خاصی از برآوردهای اولیه بیش‌تر باشد. بنابراین، استفاده طولانی‌مدت از این خودروها در حالت درجا، به‌ویژه در شرایط تراکم بالا، ممکن است منجر به افزایش چشمگیر آلاینده‌هایی چون HC و ذرات معلق PM₁₀ شود. این یافته‌ها نیاز به تدوین قوانین بازدارنده، طراحی بهتر سیستم‌های سوخت‌رسانی و همچنین بررسی دقیق‌تر وضعیت VOC و ذرات معلق را نشان می‌دهد.

برای بهبود دقت پیش‌بینی‌های مدل IVE، ضروری است که این مدل با شرایط محلی ایران تطبیق یابد. این تطبیق شامل استفاده از داده‌های مربوط به ناوگان خودرویی کشور، نرخ انتشار پایه خودروها،

الگوهای رانندگی منطقه‌ای و شرایط محیطی خاص ایران است. چنین رویکردی می‌تواند به میزان چشمگیری بر دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط این مدل تأثیرگذار باشد. همچنین، اندازه‌گیری میزان آلاینده‌های خودروها باید در شرایط واقعی انجام شود؛ به این معنا که آزمایش‌ها باید در جاده‌های واقعی با در نظر گرفتن عواملی مانند شیب جاده، تغییرات شتاب خودرو و شرایط محیطی مانند دما و رطوبت صورت گیرد. این اقدام می‌تواند اختلاف میان نتایج واقعی و پیش‌بینی‌های مدل را کاهش دهد.

مطالعات بیش‌تری در زمینه مدت‌زمان مناسب استفاده از خودروهای گازسوز در حالت درجا نیز ضروری به نظر می‌رسد. استفاده طولانی‌مدت از این خودروها در حالت درجا ممکن است منجر به افزایش آلاینده‌های شود، از این‌رو، بررسی دقیق‌تر این مسئله می‌تواند به تدوین راهکارهای مؤثری منجر شود. در این راستا، مدل‌های آماری دیگری نظیر AERMOD و SMOKE نیز می‌توانند برای ارزیابی دقیق‌تر میزان آلاینده‌های خودروها و ارائه تخمین‌های بهتر در مطالعات آینده مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، طراحی موتورهای خودروها باید به گونه‌ای بهبود یابد که با سوخت گاز طبیعی سازگاری بیشتری داشته باشد. چنین طراحی‌هایی می‌تواند علاوه بر کاهش میزان آلاینده‌های، بازده موتور را نیز افزایش دهند. همچنین، بهبود کیفیت سوخت‌های مصرفی و ارتقای فناوری تولید خودروها در کشور از دیگر عوامل مؤثر در کاهش آلودگی هوا محسوب می‌شود. این اقدامات می‌توانند تأثیر مثبتی بر کاهش آلاینده‌های خودروهای پژو XU7 و TU5 داشته و دقت پیش‌بینی‌های مدل‌های نرم‌افزاری را نیز افزایش دهند. همچنین، استفاده از

- [7] Hafsha, H.Y.S., Saleh, S.M., 2025, Estimation of CO₂ emission factors for motorcycle and passenger car use: The international vehicle emissions model in Banda Aceh. *Jurnal Serambi Engineering*, 10, 11590.
- [8] Yang, X., Yao, D., Xu, R., Pian, Y., Liu, S., Liu, Y., 2025, Assessment of full-process VOCs emissions of on-road vehicles considering individual parking behaviors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 142, 104678.
- [9] Hui, G., Qingyu, Z., Yao, S., Dahui, W., 2007, Evaluation of the international vehicle emission (IVE) model with on-road remote sensing measurements. *Journal of Environmental Sciences*, 19, 818.
- [10] Mirmohamadi, A., Alyari Shoreh Deli, S., Kalhor, A., 2016, Studying simultaneous injection of natural gas and gasoline effect on dual fuel engine performance and emissions. *International Journal of Automotive Engineering*, 6, 2110.
- [11] Aduagba, O.N., Amine, J.D., Oseni, M.I., 2013, Investigating emission values of a passenger vehicle in the idle mode and comparison with regulated values. *American Journal of Engineering Research*, 2(3), 13.
- [12] Thomas, D., Sandhu, G.S., Nilsson, T., Bjurkvist, S., 2023, Investigating the incorporation of idle, high idle, and driving acceleration NO_x emissions tests into the periodic technical inspection procedures. *Atmosphere*, 14(3), 536.
- [13] Ashrafi, K., Fatehi, S.M., Pootehrigi, M., 2018, Evaluating the effects of BRT system on traffic and air pollution by using IVE model and EMME/2 (Case study: Line 10 Azad University Return to Azadi Square). *Journal of Research in Environmental Health*, 4(3), 165. (in Persian)
- [14] Dehghan, R., Abdolahi, S., Rahimi, M., Nejad Koorki, F., Amini, M., 2019, Investigation of exhaust pollutant emissions in light vehicles compared to technical examination standard and Euro 2: Case study in Shiraz city. *Iranian Journal of Health and Environment*, 12(3), 437. (in Persian)
- [15] SaberiYansani, M., Rashidi, Y., Hashemi S.H., 2024, Comparison of the real emissions of domestic passenger cars with the IVE model. *Environmental Sciences*, 22(1), 39. (in Persian)
- [16] Mądziel, M., Campisi, T., Jaworski, A., Tesoriere, G., 2021, The development of

مدل‌های مکمل برای شبیه‌سازی دقیق‌تر آلاینده‌هایی نظیر VOC و PM₁₀، می‌تواند در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد تا برآورد آلاینده‌گی جامع‌تری فراهم شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منفعی برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Yousefi Golboteh, R., Ramezani Moghadam, F., Mohammadi, M., Houshmand, S., Mohammadi, M., 2016, Measuring vehicle exhaust emissions from Peugeot 206, Samand and EL Samand in Mashhad. *Journal of Environmental Science and Technology*, 18(2), 63. (in Persian)
- [2] Hosseini, S.S., 2023, Evaluation of the effects of air pollution on human health and the environment. 10th National Conference on Modern Studies and Research in the Field of Biology and Natural Sciences of Iran, Al Taha Institute of Higher Education, 10 September, Tehran, Iran. (in Persian)
- [3] Dargahi, A., Golestanifar, H., Alavi, S., 2012, Study of the amount of pollutants emitted from the exhaust of cars in Kermanshah City and its impact on human health. 2nd National Conference on Health, Safety and Environment, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, 14 November, Mahshahr, Iran. (in Persian)
- [4] Montazeri, M., Naderpour, A., 2009, Simulation of fuel consumption and exhaust emissions in dual fuel Samand vehicle and verification with NEDC modal test results. *The Journal of Engine Research*, 15, 11. (in Persian)
- [5] Mohammadi, M., Nazemosadat, S.M.R., Fazel, D., Lari, Y.B., 2025, An integrated approach for structural modeling, modal analysis, and aerodynamic evaluation of an electric vehicle body shell using finite element method and computational fluid dynamics. *Materials Today Communications*, 45, 112331.
- [6] SaberiYansani, M., Rashidi, Y., Hashemi, S.H., 2025, Comparative analysis of COPERT and IVE models in road transport emission assessment. *Sustainable Earth Trends*, 5(3), 25.

- Pride and Samand vehicles. Iranian Journal of Health, Safety and Environment, 4(3), 767.
- [24] Shafie-Pour, M., Tavakoli, A., 2013, On-road vehicle emissions forecast using IVE simulation model. International Journal of Environmental Research, 7(2), 367.
- [25] Fattahi, Y., Ahmadi, M., 2010, Dual-fueling of gasoline vehicles and its role in reducing air pollutants: A case study of the Pride vehicle. 3rd National Conference on Safety Engineering and HSE Management, Sharif University of Technology, 8 March, Tehran, Iran. (in Persian)
- [26] Fartookzadeh, H.R., Eshraghi, H., 2015, Dynamic modeling of the effect of dual-fuel vehicle policy on pollution production and energy consumption. Journal of Environmental Science and Technology, 17(1), 1. (in Persian)
- [27] Shafipour, M., Abdollahi, S., 2017, Modeling the estimation of the emission of pollutants from mobile sources in one of the busiest streets in District 1 of Tehran. 5th National Conference on Air and Noise Pollution Management, Iran Clean Air Association, 29 January, Tehran, Iran. (in Persian)
- strategies to reduce exhaust emissions from passenger cars in Rzeszow city—Poland. A preliminary assessment of the results produced by the increase of e-fleet. Energies, 14(4), 1046.
- [17] Taher Sarai, A., Mansouri, N., Jafari, Q., Seydi, F., 2011, Determination emission factors in Peugeot 405 car. 5th National Conference and Exhibition on Environmental Engineering, Tehran University, 20 November, Tehran, Iran. (in Persian)
- [18] Majnoui, O., Shakibaei, M., Sheikhzadeh, Q., 2023, Experimental investigation and comparison of gasoline and natural gas emissions in an internal combustion engine. 20th Fluid Dynamics Conference, Semnan University, 7 November, Semnan, Iran. (in Persian)
- [19] Rezazadeh, S., 2008, Investigating the status of air pollutant emissions in gasoline vehicles in Qazvin. 2nd Conference of Environmental Engineering, Tehran University, 19 May, Tehran, Iran. (in Persian)
- [20] Shariati, S., Ramezani, N., Fanaei, S.A., 2022, Investigating the annual production of large-scale automotive pollutants in Kermanshah city using IVE software. 9th Conference on Air and Noise Pollution Management, Tehran University, 19 February, Tehran, Iran. (in Persian)
- [21] Khazini, L., Jamshidi Kalajahi, M., Blond, N., 2019, Investigation of emissions and dispersion of pollutants from cars in Tabriz City. Journal of Civil and Environmental Engineering, 49(3), 23. (in Persian)
- [22] Mirshi, S., Enayati Ahangar, F., Hosseini, V., 2013, Studying the effect of driving patterns on the amount of pollution produced by vehicles in Tehran. 12th International Conference on Traffic and Transportation Engineering, Tehran Transportation and Traffic Organization. March, 18 February, Tehran, Iran. (in Persian)
- [23] Sarhadi, A., Mohammadi, M., Mohammadi, M., 2017, Effects of fuel type and fuel delivery system on pollutant emissions of