تخمین بار آلودگی سیستم حمل‌ونقل شهری تهران به‌منظور ارزیابی راه‌کارهای کاهش آلودگی هوا

احسان بنی طالبی*
کارشناس ارشد، هسته پژوهشی سوخت احتراق و آلایندگی، دانشگاه صنعتی شریف.
پست الکترونیک:
e_banitalebi@mech.sharif.edu

سعید دهقانی
کارشناس ارشد، مدیرعامل شرکت مهندسی توسعه سامانه مانا، تهران.

وحید حسینی
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف.

سواری‌های شخصی به‌عنوان مهم‌ترین عامل آلودگی هوا در مناطق شهری قلمداد می‌شوند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در آلایندگی خودروها، ترافیک شهری است که با سرعت متوسط، تعیین و دسته‌بندی می‌گردد. در این پژوهش، با استفاده از مدل تخمین آلایندگی که از داده‌های آزمون همراه ۳۰ خودرو، در مسیرهای شهری و بزرگراهی تهران تهیه شده، همچنین داده‌های آنلاین سنسورهای ترافیکی بلوتوث، جرم لحظه‌ای تولیدی هرکدام از آلاینده‌های مونواکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن در تعداد محدودی از بزرگراه‌های تهران، محاسبه شده‌است. ابزار فوق، امکان ارزیابی استراتژی‌های کنترل آلودگی هوا همچون زوج و فرد، تعیین هدفمند محدوده‌های طرح ترافیک، پیش‌بینی روزانه آلودگی هوا و مناطق بسیار آلوده به‌کمک نرم‌افزارهای **WRF** و **CAMx** و تعیین بیشینه سرعت بزرگراه‌ها را فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: مدل انتشار آلایندگی، سنسورهای ترافیکی بلوتوث، تخمین انتشار، استراتژی‌های کنترل آلودگی هوا، WRF، CAMx.

۱- مقدمه

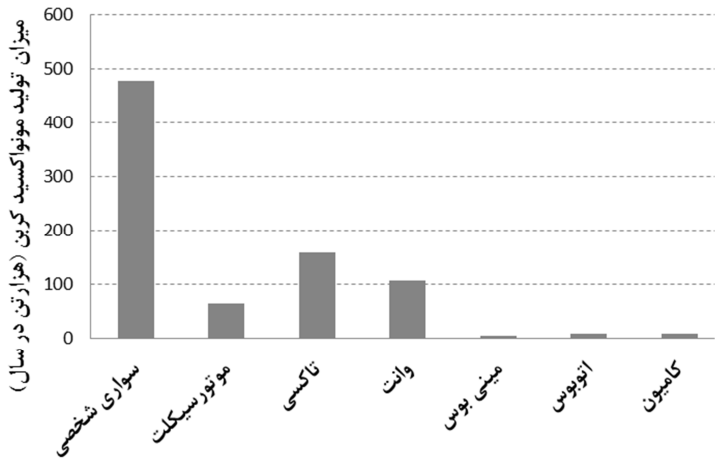
آلودگی هوا می‌تواند اثرات غیر قابل جبرانی به محیط زیست تحمیل کند. رسوب و ماندگاری آلاینده‌ها در بدن موجودات زنده، موجب انباشت این سموم در بدن شده و در درازمدت سلامت آن‌ها را با چالش جدی روبرو می‌کند. در بررسی‌های انجام شده در ایالات متحده، حدود ۶۰ درصد مونواکسید کربن ، ۵۰ درصد اکسیدهای نیتروژن و ۴۵ درصد هیدروکربن‌های ارگانیک فرار[1] موجود در اتمسفر، ناشی از خودروها و در برآوردی دیگر، بالغ بر نیمی از آلاینده‌های تولیدی در آمریکا ناشی از وسایل نقلیه‌ی موتوری گزارش شده است که حاکی از اهمیت منابع متحرک در آلودگی هواست [۱و۲].

نتایج پروژه بزرگ اندازه‌گیری ضرایب انتشار منابع آلاینده هوای تهران، که در سال ۱۹۹۷ توسط آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن انجام گردید حاکی از سهم ۵۰ درصدی خودروها در تولید آلاینده‌های مونواکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن است. همچنین بیش از تیمی از آلاینده‌های منابع متحرک نیز ناشی از سواری‌های شخصی بنزین‌سوز است.به‌عنوان نمونه، میزان آلاینده مونواکسید کربن تولید شده از هرکدام از بخش‌های سیستم حمل‌ونقل شهری تهران، در شکل ۱ نشان داده شده است [۳].

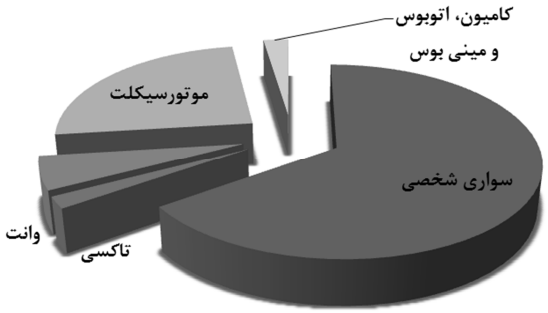
علاوه بر این، بر اساس آمار شماره‌گذاری خودروهای تهران در سال ۱۳۹۳، سهم سواری‌های شخصی در ناوگان حمل‌ونقل تهران، بسیار بالاتر از تاکسی‌ها و ... است؛ به‌گونه‌ای که بیش از ۶۵ درصد ناوگان حمل‌ونقل شهری را به خود اختصاص داده‌اند.

* نویسنده مسئول:

[1] VOC



شکل ۱- میزان مونواکسید کربن تولیدی از هرکدام از بخش‌های سیستم حمل‌ونقل شهری تهران [۱].



شکل ۲- سهم هرکدام از اجزای ناوگان سیستم حمل‌ونقل شهری تهران [۱].

بر اساس آمار ارائه شده در فوق، سواری‌های شخصی به‌عنوان مهم‌ترین عامل آلودگی در هوای تهران قلمداد شده است. از این‌جهت ارائه ابزاری مناسب در راستای تعیین میزان کمی آلایندگی سواری‌های شخصی بنزین سوز، به‌عنوان شاخص‌ترین منبع آلودگی هوای تهران، بسیار مفید واقع شده، تا امکان اتخاذ راهکارهای کنترل و کاهش آلودگی را برای تصمیم‌گیران محیط زیست، مدیران و برنامه‌ریزان شهری فراهم شود [۱].

تخمین جرم آلاینده‌های تولیدی و مصرف سوخت در یک معبر مستلزم وجود سه دسته اطلاعات است:

- ضرایب انتشار آلایندگی و نرخ مصرف سوخت خودروهای عبوری
- سرعت متوسط خودروهای عبوری
- حجم ترافیک (تعداد خودروها)

مناسب‌ترین ابزار برآورد نرخ آلایندگی، مدل ضرایب انتشار می‌باشد که نرخ آلودگی تولید شده را بصورت تابعی از پارامترهای سینماتیکی خودرو بیان می‌دارد [۶].پر استفاده‌ترین نمونه، مدل سرعت متوسط بوده که در آن، سرعت متوسط تنها عامل مؤثر بر انتشار خودرو درنظر گرفته می‌شود. علی‌رغم فرض ساده در مدل‌سازی انتشار، به‌واسطه خروجی‌های قابل قبول و کاربرد بسیار ساده، مدل سرعت متوسط، در بسیاری از کشورها توسعه داده شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای نمونه می‌توان، مدل انتشار تی-ار-ال[1]، پیارک[2] و انگلیس را نام برد [۵].

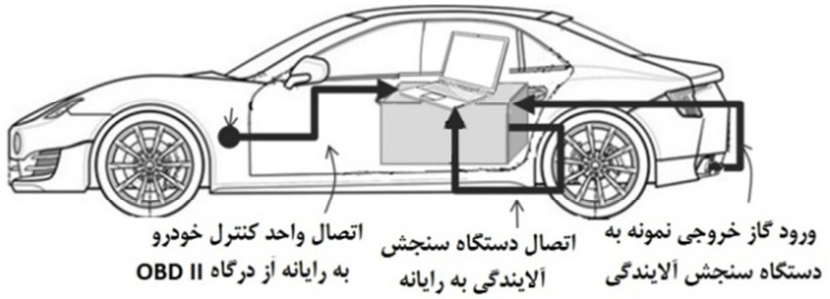
۲- تولید مدل انتشار آلایندگی تهران بر اساس سرعت متوسط

بواسطه کاربردهای گسترده مدل‌های انتشار آلایندگی در ارزیابی راهبردهای کنترل و کاهش آلودگی در تهران، هسته پژوهشی سوخت، احتراق و آلایندگی دانشگاه صنعتی شریف برای اولین بار در ایران، اقدام به اندازه‌گیری همراه آلایندگی بیش از ۳۰ خودرو سواری ساخت داخل (که مهم‌ترین عامل آلودگی هوا در تهران شناخته می‌شوند) نموده است. توزیع نوع و میزان پیمایش خودروهای مورد آزمون، مشابه با ناوگان موجود در تهران انتخاب شده تا مقدار تأثیرگذاری هر خودرو در توابع

[1] TRL
[2] PIARC

انتشار، به میزان سهم آن‌ها در ناوگان موجود در شهر باشد [۷].

در آزمون آلایندگی همراه، تجهیزات اندازه‌گیری آلایندگی، داخل خودرو قرار گرفته و همزمان با حرکت خودرو در جریان واقعی ترافیک شهری، آلاینده‌های خروجی اگزوز آنالیز شده است. شکل ۳ شماتیک خودرو تجهیز شده به سنجشگر همراه را نشان می‌دهد. روش اندازه‌گیری همراه، مناسب‌ترین شیوه اندازه‌گیری آلایندگی منابع متحرک برای تولید مدل انتشار آلایندگی است که از سال ۲۰۰۲ نیز در دستور کار سازمان حفاظت محیط زیست امریکا قرار گرفته است [۴].



شکل ۳- شماتیک خودرو تجهیز شده به تجهیزات سنجش آلایندگی همراه [۳]

برای پوشش‌دهی کلیه شرایط مؤثر در ضرایب انتشار، آزمون‌های متعددی در مسیرهای شهری و بزرگراهی شیب‌دار و بدون شیب با نحوه رانندگی متفاوت و وضعیت‌های مختلف سیستم تهویه انجام شده است. به‌گونه‌ای که برای هر خودرو به‌طور میانگین ۱۲ آزمون صورت گرفته است.

با استفاده از جعبه‌ابزار cftool در نرم‌افزار متلب[1]، بر داده‌های سرعت متوسط و ضرایب انتشار محاسبه شده، چهار منحنی برازش شده، که هرکدام رابطه یکی از گازهای خروجی دی‌اکسید کربن، مونواکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن را با سرعت متوسط بیان می‌دارد. برای پیدا کردن فرم منحنی بهینه، توابع انتشار انگلیس، تی-ار-ال، کوپرت[2] و توابع مشابه دیگر بر داده‌های انتشار تهران برازش شده، برای مقایسه، ۷ پارامتر محاسبه شده که عبارت‌اند از:

- شاخص ارزیابی برازش R-square
- میانگین خطا
- انحراف معیار خطا
- ماکزیمم خطا
- سرعتی که در آن ماکزیمم خطا اتفاق می‌افتد.
- مینیمم خطا
- سرعتی که در آن مینیمم خطا اتفاق می‌افتد.

موارد فوق، تعیین‌کننده میزان پراکندگی نتایج نسبت به تابع برازش شده است؛ که با توجه به آن، از منحنی‌های مشابه توابع انتشار TRL استفاده شده است [۸].

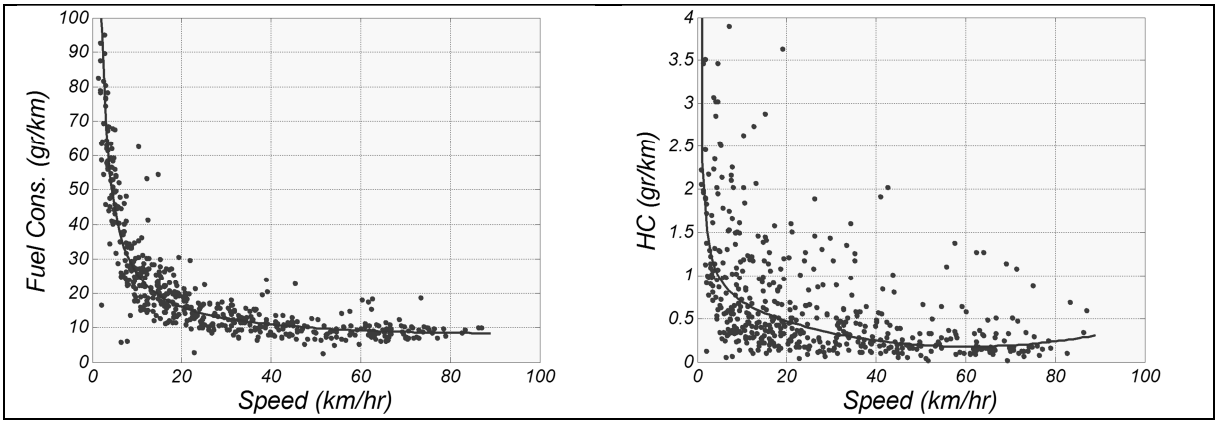
در جدول ۱ توابع ریاضی هرکدام از آلاینده‌ها و مصرف سوخت آورده شده است. برای نمونه دو تابع انتشار مونواکسید کربن و مصرف سوخت در شکل ۴ آورده شده است.

برای کاهش اثرگذاری داده‌های پرت بر شکل منحنی‌ها از روش Least Absolute Residual استفاده شده که با فرض توزیع نرمال خطا حول منحنی برازش شده، داده‌های پرت را بصورت خودکار حذف می‌کند [۱].

[1] MATLAB
[2] COPERT

جدول ۱- توابع انتشار آلایندگی و مصرف سوخت سواری‌های شخصی بنزین‌سوز تهران در کارکرد گرم خودرو

$E = \frac{a + bV + cV^2 + dV^3}{V}$				$V : Vehicle\ Speed\ (km/hr)$	
E	a	b	c	d	R-Square
CO2 (gr/km)	1992.6	353.07	-9.63	0.090	1.00
CO (gr/km)	12.2	11.69	-0.26	0.002	0.98
HC (gr/km)	1.9	0.67	-0.02	0.000	0.98
NOx (gr/km)	0.5	1.74	-0.05	0.001	0.98
FC (Lit/100km)	187.5	7.17	-0.04	0.000	1.00



شکل ۴- نمایش تابع سرعت متوسط برای مونواکسید کربن و مصرف سوخت

از جدول ۱ دیده می‌شود که مقادیر R-Square بسیار نزدیک به یک است که بیانگر بهینه بودن توابع برازش شده و قابل اطمینان بودن نتایج تخمین با توابع استخراج شده می‌باشد.

۳- سامانه اندازه‌گیری سرعت متوسط با سنسورهای ترافیکی بلوتوث

شرکت توسعه سامانه مانا با همکاری هسته پژوهشی سوخت، احتراق و آلایندگی دانشگاه صنعتی شریف، بصورت پایلوت اقدام به نصب و راه‌اندازی ۵۰ سنسور ترافیکی در تعداد محدودی از بزرگراه‌های تهران نموده که با استفاده از شناسایی آدرس مک[1] وسایل مجهز به بلوتوث (در خودرو) و بازشناسی آن در نقاط مختلف مسیر، سرعت میانگین جریان ترافیک را محاسبه می‌نماید.

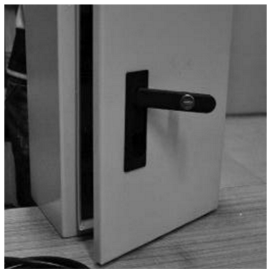
مطابق با شکل ۶، خودرو پس از عبور از سنسور اول، شناسایی شده، پس از عبور از محدوده شناسایی آن و ورود به محدوده سنسور دوم، دوباره شناخته شده، زمان سفر به‌راحتی قابل‌محاسبه است. همچنین با توجه به مشخص بودن فاصله سنسورها، تعیین سرعت خودروها، امکان‌پذیر است.

با فرض پراکندگی یکنواخت وسایل نقلیه در سطح شهر (به لحاظ نوع خودرو)، تعداد شناسایی‌های آدرس مک معیار مناسبی برای حجم ترافیک عبوری از معبر است. و برای مقایسه استراتژی‌های ترافیکی در کنترل آلودگی هوا قابل‌استفاده است؛ هرچند که مقدار مطلق آلودگی تولید شده در هر مسیر قابل‌محاسبه نمی‌باشد.

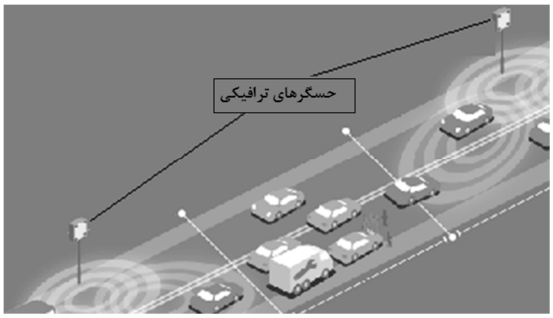
لازم به ذکر است که با شمارش خودروها از طریق دوربین‌های کنترل ترافیک، امکان کالیبره کردن مقدار مطلق حجم ترافیک عبوری (با داده‌های تعداد شناسایی

[1] MAC Address

هر سنسور) در هریک از مسیرهای مجهز به سنسورهای ترافیکی بلوتوث، امکان‌پذیر است.



شکل ۵- سنسور ترافیکی مبتنی بر بلوتوث



شکل ۶- شماتیک نحوه اندازه‌گیری زمان سفر و سرعت متوسط جریان ترافیک

افزون بر کاربرد گسترده داده‌های سنسورها در مدیریت کلان ترافیک، تخمین زمان سفر برای مردم از طریق وب و تابلوهای وی‌ام‌اس[1]، به‌عنوان ورودی بسیار مناسبی برای مدل انتشار آلایندگی و مصرف سوخت تهران می‌باشد که سرعت متوسط را در بازه‌های زمانی کوتاه برای مدل فراهم می‌کند.

علاوه بر این قابلیت تولید خروجی سرعت جریان ترافیک در بستر جی‌آی‌اس[2]، امکان بررسی عمیق‌تری در مبحث آلودگی هوا فراهم می‌آید. بدین صورت که با استفاده از مدل انتشار آلایندگی و داده‌های حجم ترافیک، جرم آلودگی تولیدی بصورت نقشه جی‌آی‌اس تولید شده و به‌عنوان ورودی مدل‌های پیش‌بینی پخش و پراکنش آلودگی هوا همچون WRF و CAMx استفاده می‌گردد. این‌گونه مدل‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی (یا پیش‌بینی‌های هواشناسی) غلظت آلاینده‌ها را در نواحی مختلف شهر به دست می‌دهند. لذا پیش‌بینی آلودگی هوا برای روز آتی امکان‌پذیر است.

۴- مطالعه موردی: بررسی بار آلودگی در مسیر بزرگراه همت در روزهای مختلف هفته

در نمودار شکل ۷ تعداد خودروهای شناسایی شده توسط سنسوزهای بلوتوثی، همچنین میانگین سرعت خودروها برای قسمتی از بزرگراه همت در ساعت ۱۱ تا ۱۲ صبح روزهای سه‌شنبه تا جمعه آورده شده است.

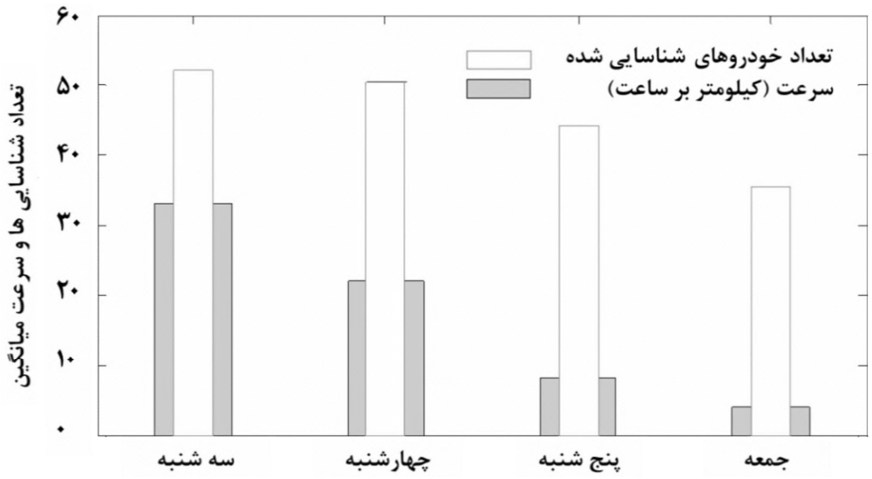
مطابق با مطالب پیشین، تعداد خودروهای شناسایی شده توسط سنسورها می‌تواند معیاری از حجم ترافیک قلمداد شود. از این جهت با استفاده از تعداد شناسایی‌های سنسورها و سرعت متوسط، مقدار جرمی انتشار آلاینده‌ها برای بازه‌های زمانی مشابه محاسبه شده و در نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر، محور عمودی بدون بعد شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار آلودگی تولید شده در روزهای هفته (در یک ساعت مشخص) بسیار متفاوت است. لذا پیش‌بینی غلظت حجمی آلاینده‌ها با استفاده از داده‌های آنلاین انتشار آلودگی اطلاعات بسیار ارزشمندی از تغییرات غلظت در مناطق مختلف شهر به دست می‌دهد. این در حالی است که در همه شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزارهای پیش‌بینی پخش و پراکنش آلودگی، از اطلاعات مشابهی برای انتشار در روزهای هفته استفاده می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

داده‌های آنلاین انتشار به‌عنوان ابزار مهمی برای پیش‌بینی روزانه آلودگی هوا تلقی می‌شود. علاوه بر این می‌تواند برای ارزیابی راهکارهای کنترل آلودگی هوا، معیار مناسبی باشد.

[1] VMS
[2] GIS



شکل ۷- نمایش تعداد خودروهای شناسایی شده با سنسورها و سرعت متوسط در ساعت ۱۱ تا ۱۲ صبح سه‌شنبه تا جمعه (قسمتی از بزرگراه همت)

شکل ۸- مقایسه مقدار مونواکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن تولید شده در ساعت ۱۱ تا ۱۲ صبح سه‌شنبه تا جمعه.

قدردانی

از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران برای در اختیار قرار دادن دستگاه پرتابل اندازه‌گیری آلایندگی، همچنین سازمان حمل‌ونقل ترافیک شهرداری و سازمان کنترل ترافیک برای حمایت‌های مالی پروژه‌ها، قدردانی می‌گردد.

مراجع

[۱] بنی‌طالبی، احسان. "تولید مدل برآورد آلودگی با استفاده از داده‌های آزمون آلایندگی خودرو"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۹۳).

[۲] بنی‌طالبی، احسان و حسینی، وحید. "نحوه محاسبه ضرایب انتشار جرمی آلایندگی خودرو از داده‌های آلایندگی غلظت حجمی به روش همراه". دومین همایش ملی آلودگی هوا و صدا (۱۳۹۲).

[۳] بنی‌طالبی، احسان، حسینی، وحید. "سیکل‌های رانندگی در مقیاس بین‌المللی و ملی"، گزارش فنی فاز ۱ پروژه اندازه‌گیری ضرایب انتشار خودروهای سواری شخصی بنزین سوز ساخت داخل، هسته پژوهشی سوخت احتراق و آلایندگی، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۹۱).

[۴] ریحانیان، مسعود، استقامت، فرزاد، بنی‌طالبی، احسان، میرشی، سمیرا، حسنی، امین، حسینی، وحید. " تجهیز خودرو نمونه به دستگاه‌های داده‌برداری"، گزارش فنی فاز ۲ پروژه اندازه‌گیری ضرایب انتشار خودروهای سواری شخصی بنزین سوز ساخت داخل، هسته پژوهشی سوخت احتراق و آلایندگی، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۹۱).

[5] M. Andre, M. Rapone, “Analysis and modeling of the pollutant emissions from European cars regarding the driving characteristics and test cycles”, Atmospheric Environment 43, 986-995 (2009).

[6] V. Franco, M. Kousoulidou, M Muntean, L. Ntziachristos, S. Hausberger, P. Dilara, “Road vehicle emission factors development: A review”, Atmospheric Environment 70, 84-97 (2013).

[7] L. Ntziachristos, Z. Samaras, “Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters”, Atmospheric Environment 34, 935-942 (2000).

[8] T.B. Manchur, M.D. Checkel, “Time resolution effects on accuracy of real-time NOx emissions measurements”, SAE transactions, Vol. 114, No 4, 259-275 (2005).

E. Banitalebi*

Master, Fuel Combustion and Emission (FCE) Research Center, Sharif University of Technology.

e-mail: e_banitalebi@mech.sharif.edu

S. Dehghani

Master, Sharif Advanced Technologies Incubator (SATI), Sharif University of Technology.

V. Hosseini

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology.

Tehran Transportation Pollution Load Estimation for the Assessment of Emissions Reduction Scenarios

Personal cars have been considered as a main air pollution sources. The amount of vehicle emissions correlates with urban traffic, which is affect average trip speed. With the use of Tehran emissions model of personal cars, and the online data of speed and travel time, instantaneous NOx, HC and CO mass production were calculated. Emission model was developed based on thirty portable emission tests and speed data were obtained by traffic sensors installed in a few highways of Tehran. The important application of this system is to assessment of transportation emissions reduction scenarios.

Keywords: *Emissions Model, Emissions Estimation, Emissions Reduction Strategies, WRF, CAMx.*

* Corresponding author