



## بررسی اثر خودروهای دیزلی در حال تردد در تهران بر آلاینده‌گی کربن سیاه

احمد طاهری<sup>۱</sup>، پوریا علی‌اصغری<sup>۲</sup>، وحید حسینی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [taheri.atp@gmail.com](mailto:taheri.atp@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [aliasghari\\_p@mech.sharif.edu](mailto:aliasghari_p@mech.sharif.edu)

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [vhosseini@sharif.edu](mailto:vhosseini@sharif.edu)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱ دی ۱۳۹۶

پذیرش: ۲ اسفند ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

کربن سیاه

آلودگی هوا

موتور دیزل

ذرات معلق

دوده

### چکیده

موتورهای احتراق داخلی دیزلی با وجود تمام مزیت‌ها جهت استفاده به عنوان خودروهای سنگین، مقدار قابل توجهی انتشار ذرات معلق و اکسیدهای نیتروژن دارند. اندازه‌گیری‌های مستقیم بر روی خروجی آگزوز این دست خودروها نشان داده است که بخش عمده از ذرات معلق تولیدی موتورهای دیزل را ذرات حاوی کربن یا دوده تشکیل می‌دهد. آلاینده‌ی کربن سیاه (Black Carbon) اثر مخرب فراوانی بر سلامت انسان و محیط زیست دارد و لازم است اقداماتی در جهت کنترل مقدار انتشار آن صورت گیرد. بنابراین باید برآوردی صحیح از غلظت آلاینده کربن سیاه در هوا و منابع اصلی انتشار آن در دست باشد. در این تحقیق، اندازه‌گیری مستقیم غلظت کربن سیاه در شهر تهران و در دو ایستگاه اندازه‌گیری کیفیت هوا انجام شده است. سایر آلاینده‌های مهم در هوای تهران، از جمله ذرات معلق کوچکتر از  $2.5/\mu m$  میکرون و اکسیدهای نیتروژن، در مدت مشابه اندازه‌گیری شده‌اند و نتایج به منظور منشأیابی و برقراری ارتباط میان تغییرات غلظت آن‌ها و کربن سیاه با هم مقایسه شده است. نتایج به دست آمده تاثیر مستقیم حضور ناوگان سنگین بر انتشار کربن سیاه و اکسید نیتروژن را به وضوح آشکار می‌سازد. به طوری که غلظت کربن سیاه با ورود گسترده کامیون‌های سنگین به سطح شهر در ساعت شامگاهی به شدت افزایش پیدا کرده و تا خروج ناوگان این افزایش ادامه پیدا می‌کند و سپس با شروع روز به مقدار بسیار کم در مقایسه با مقدار شبانه این آلاینده تقلیل می‌یابد.

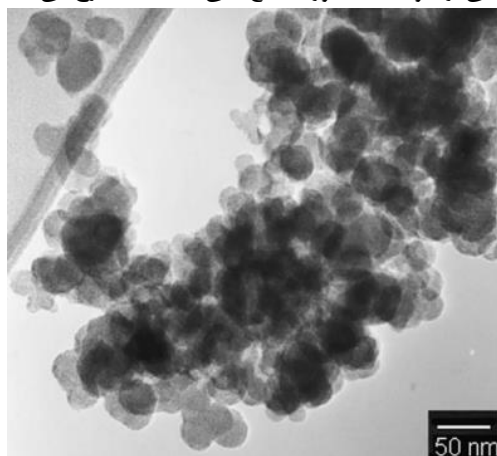
تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



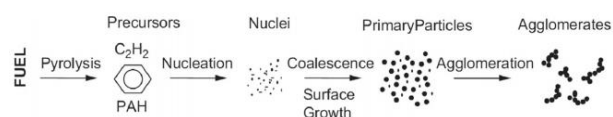
## ۱- مقدمه

ذره ثانویه اطلاق می‌شود. ذرات اولیه انتشار یافته معمولاً هر کدام دارای قطر  $50 - 15 \text{ nm}$  می‌باشند و بین  $10^6 - 10^5$  اتم کربن در خود دارند [۸]. یکی از مکانیزم‌هایی که برای تشکیل دوده پیشنهاد شده، شامل ۵ مرحله است که در شکل ۲ به طور شماتیک نشان داده شده است. طی این مراحل که استیلن ( $C_2H_2$ ) و ترکیبات PAH<sup>c</sup> در آن دخالت دارند، سوخت هیدروکربنی به رادیکال‌های کوچکی شکسته می‌شود. در مراحل بعد افزایش غلظت استیلن به تشکیل حلقه‌های بزرگ‌تر کربنی کمک می‌کند [۹].

در موتورهای احتراقی دیزلی باور بر این بوده که موتوری که درست تنظیم شده باشد، دوده قابل مشاهده‌ای منتشر نمی‌کند، با این حال امروزه می‌دانیم حتی در شرایط کارکرد صحیح موتور هم میزان انتشار دوده قابل توجه خواهد بود. این مقدار انتشار معمولاً در دوره‌های پایین ناچیز است، اما در دوره‌های بالا افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. در میزان انتشار دوده از یک پیش‌راننده دیزلی عوامل متعددی از جمله سیستم پاشش سوخت، توربولانس و فشار موثرند. اندازه‌گیری مستقیم میزان دوده تولیدی در داخل حجم سیلندر نشان داده‌است که تشکیل دوده بلافاصله پس از اشتعال در تمام طول اسپری سوخت و در نواحی که مقدار کمی از سوخت به صورت مایع باقی مانده است، رخ می‌دهد [۱۰].



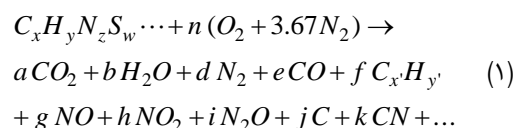
شکل ۱: ماکروگرافی دوده‌ی دیزل، یک خوشه و ذرات اولیه‌ی سازنده‌ی آن



شکل ۲: شماتیک مراحل تشکیل دوده از فاز گاز تا جامد در ۵ مرحله

دیگر آلاینده‌های قابل توجه در پیش‌راننده‌های دیزلی اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) می‌باشند که شامل اکسید نیتروژن ( $NO$ ) و مقدار بسیار

کربن سیاه<sup>۱</sup> (BC) به عنوان یک از اجزای مجموعه ذرات معلق<sup>۲</sup> کوچک‌تر از  $2.5/5$  میکرون یا  $PM_{2.5}$  تاثیر مخرب قابل توجهی بر سلامت انسان و محیط زیست دارد [۱]. منابع اصلی انتشار این آلاینده عبارت‌اند از موتورهای احتراقی به‌ویژه نوع دیزلی، سوزاندن چوب، ذغال و ضایعات کشاورزی و آتش سوزی جنگل‌ها [۲]. سایر ذرات  $PM_{2.5}$  در صورت ایجاد شدن از منابع انتشار مختلف، در میزان سمی بودن و تاثیر بر سلامتی و ترکیب شیمیایی با یکدیگر متفاوت خواهند بود [۳]. در نتیجه، هر گونه اقدام با هدف کنترل آلاینده‌های موجود در هوا مستلزم برآورد صحیح از شدت و منابع انتشار و ارتباط میان غلظت آلاینده‌هاست. ناوگان خودروهای سنگین دیزلی در تهران بر اساس برآوردها شامل  $820.8$  دستگاه اتوبوس درون‌شهری،  $4778$  دستگاه اتوبوس سرویس و  $85730$  عدد کامیون سنگین می‌باشد که به ترتیب در هر گروه  $6/2$ ،  $28/6$  و  $26/8$  درصد عمر بالاتر از ۲۰ سال دارند [۴]. واکنش صورت گرفته در موتورهای احتراقی در حالت ایده‌آل فقط باید به تولید  $CO_2$  و  $H_2O$  بیانجامد. اما با در نظر گرفتن عواملی چون ناخالصی سوخت مصرفی و احتراق ناقص، محصولات احتراقی کامل نخواهند بود و معادله‌ی احتراق چیزی شبیه به معادله (۱) خواهد شد:



پیش‌راننده‌های دیزلی علی‌رغم انتشار کمتر  $CO$  و  $HC$  نسبت به انواع بنزینی به طور قابل توجهی انتشار  $PM$  و  $NO_x$  بیشتری دارند [۵]. بسته به سیکل‌های مختلف تست و انواع موتورهای دیزلی، بین ۳۰ تا ۹۰ درصد جرم  $PM$  دیزل را کربن تشکیل می‌دهد. به طور متوسط این مقدار را می‌توان ۷۵ درصد در نظر گرفت [۶]. انتشار کربن از پیش‌راننده‌های دیزل به شکل دوده می‌باشد که تشکیل آن شامل فرایند پیچیده‌ای است که در آن تعداد زیادی از ملکول‌ها در واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی متعددی شرکت می‌کنند و جزئیات آن هنوز به طور کامل شناخته شده نیست [۷]. به طور کلی، دوده در اثر آذرکافت یا احتراق هیدروکربن‌ها در دمای بالا بوجود می‌آید که اغلب شامل مقادیری جزئی از هیدروژن و اکسیژن نیز می‌شود. از آن جایی که حدود ۱ درصد جرمی دوده را هیدروژن تشکیل می‌دهد، فرمول  $C_8H$  به طور تجربی به آن نسبت داده می‌شود. اندازه ذرات دوده در حدود  $100 \text{ nm}$  است که خود از واحدهای کوچک‌تر تقریباً کروی به شکل خوشه‌ای ساخته شده‌اند. این واحدها را ذرات اولیه دوده می‌نامند و به کل خوشه

در این مطالعه داده برداری غلظت کربن سیاه هر ۵ دقیقه یکبار در مدت ۱۴ هفته و به صورت پیوسته در دو ایستگاه مذکور انجام گرفت. داده برداری از اول فروردین ۱۳۹۵ شروع و تا ۵ تیرماه ادامه یافت. در همین بازه اطلاعات سایر آلاینده‌ها به منظور مقایسه با کربن سیاه استخراج شدند. این اطلاعات (به جز ذرات معلق  $PM_{2.5}$ ) نیز به صورت هر ۵ دقیقه ثبت گردیدند. غلظت  $PM_{2.5}$  نیز با توجه به ساختار و عملکرد آنالایزر، هر یک ساعت به ثبت رسید. برای مقایسه، غلظت سایر آلاینده‌ها (غیر از کربن سیاه) به صورت ساعتی میانگین‌گیری شدند و بعد مورد استفاده قرار گرفتند. تمام داده‌ها به دقت از نظر وجود خطای اندازه‌گیری، بررسی و موارد مشکوک به خطا حذف گردیدند. دو هفته ابتدایی داده‌برداری مصادف با تعطیلات نوروز، در راستای مقایسه با ۱۲ هفته‌ی دیگر، کنار گذاشته شدند؛ چراکه در ایام نوروز تردد خودروها در تهران به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و داده اندازه‌گیری شده در این مدت می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین تاثیر حضور خودروها بر کیفیت هوای تهران باشد. روزهای ۱۲ هفته مورد بحث به دو بخش روزهای کاری و جمعه‌ها تقسیم شدند، به طوری که از شنبه تا چهارشنبه به عنوان روزهای کاری در نظر گرفته شده‌است. پنج‌شنبه‌ها به علت مشخص نبودن وضعیت دقیق تعطیلی فعالیت‌های شهری مورد مطالعه قرار نگرفتند و جمعه‌ها به عنوان روزهای تعطیل در نظر گرفته شدند.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی

در این پروژه غلظت آلاینده کربن سیاه با استفاده از دستگاهی به نام اتلومتر<sup>۱</sup> که مبنای عملکرد آن روشی اپتیکی است اندازه‌گیری شده است [۱۶]. در ایستگاه دانشگاه شریف دستگاه  $Aethalometer^{\circ}$  Model AE33 ساخت شرکت Scientific Magee مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری همزمان بر روی ۷ طول موج را دارد که غلظت کربن سیاه بر روی طول موج 880 nm محاسبه می‌گردد. اندازه‌گیری در طول موج‌های مختلف امکان منشایابی این ذرات را فراهم می‌کند. در ایستگاه ستاد بحران مدل دیگری از دستگاه معرفی شده به نام  $Aethalometer^{\circ}$  Model AE31 از همان شرکت سازنده با مشخصاتی مشابه نصب گردیده است. برای تعیین غلظت ذرات معلق، از دستگاه‌های موجود از قبل در ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران استفاده گردید. این دستگاه‌ها به ترتیب عبارتند از BAM-1020 ساخت شرکت Met One Instruments و MP101M ساخت شرکت Environnement SA که از روش Beta Attenuation به منظور پایش غلظت ذرات معلق استفاده می‌کنند. دستگاه BAM از یک ورودی انتخابی بر حسب اندازه، فیلتر، منبع تابش بتا و سنسور تشخیص تابش بتا بهره می‌گیرد. ذرات کوچک‌تر از اندازه مشخصی وارد دستگاه شده و روی فیلتر جمع می‌شوند. تفاوت بین اشعه بتای عبوری از فیلتر قبل و بعد از تجمع ذرات برای یافتن

محدودی دی‌اکسید نیتروژن ( $NO_2$ ) می‌شوند. بر اساس الگوی زدلیویچ معادلات زیر بر شکل‌گیری NO حاکم هستند [۱۱]:



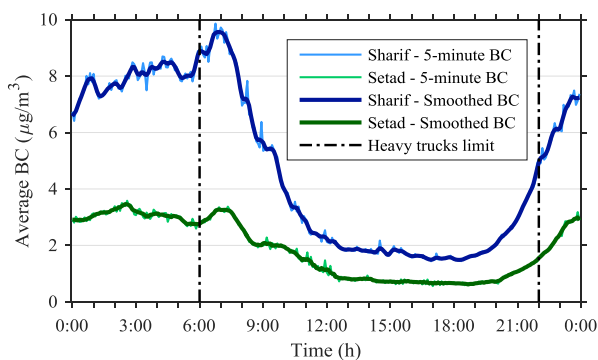
برای پی بردن به شدت این آلاینده‌ها، اندازه‌گیری غلظت‌ها در هوای محیط می‌تواند یک راهکار باشد. از مطالعات مشابه قبلی می‌توان به اندازه‌گیری  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$  و آنالیز شیمیایی اجزای آن‌ها که در دو ناحیه‌ی شهری و روستایی در وین اتریش انجام گرفته است و مقادیر به دست آمده به منظور منشایابی با هم مقایسه شده‌اند، اشاره کرد. مقادیر کربن سیاه موجود در  $PM_{2.5}$  در ناحیه شهری در اثر منابع احتراقی نظیر ترافیک اتومبیل‌ها و سوختن نفت و ذغال سنگ بوده‌اند [۱۲]. مشابه این مطالعه در سال ۲۰۰۴ با نمونه برداری از یون‌های اسیدی موجود در هوا و کربن سیاه در دو شهر مرکزی اروپا، لیوبلیانا و وین نیز انجام شده است. بیشتر بودن نسبت جرمی کربن سیاه به کل ذرات کربنی موجود در هوا در شهر وین نسبت به لیوبلیانا تحت تاثیر حضور پررنگ ناوگان دیزلی در این شهر بوده است، چرا که ۷۱٪ از خودروهای سواری جدید و تمامی کامیون‌های سنگین در این شهر دیزلی‌اند [۱۳]. از اسفند ماه ۱۳۹۲ و به مدت یک سال ذرات  $PM_{2.5}$  هوای تهران در ایستگاه دانشگاه شریف، آنالیز شیمیایی شدند. نتایج حاصله نشان داد ۹٪ از جرم کل این ذرات را به طور متوسط کربن سیاه تشکیل داده‌است [۱۴].

### ۲- روش تحقیق

اندازه‌گیری‌ها در این مطالعه با استفاده از ظرفیت شبکه ایستگاه‌های ثابت پایش کیفیت هوای تهران متشکل از ۲۱ ایستگاه (۱۲ ایستگاه ترافیکی و ۹ ایستگاه شهری) انجام شده است. دستگاه‌هایی برای پایش غلظت آلاینده‌های غالب در هوای شهر تهران شامل گازهای  $CO$ ،  $SO_2$ ،  $NO_x$  و  $O_3$  و ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$  به طور کلی در این ایستگاه‌ها وجود دارند.

دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران منطقه ۷ به عنوان محل داده‌برداری این مطالعه انتخاب شدند و دستگاه ویژه اندازه‌گیری غلظت کربن سیاه در آن‌ها کار گذاشته شد. ایستگاه دانشگاه شریف در ناحیه‌ای با بافت عمدتاً مسکونی واقع گردیده است و در اطراف آن ۳ بزرگراه با تردد بیش از ۶۰۰۰ خودرو در ساعت اوج ترافیک [۱۵] و یک ترینال مسافری قرار دارد. ایستگاه ستاد بحران، در محوطه ستاد مدیریت بحران منطقه ۷ شهرداری تهران، در منطقه‌ای با کاربری عمدتاً اداری است و فقط بزرگراه شهید مدرس در نزدیکی آن است. در ضمن این ایستگاه در ناحیه‌ی طرح کاهش نیز قرار گرفته است.

در دستگاه اندازه‌گیری کربن سیاه آهنگ تضعیف پرتوی نوری که به فیلتر تابیده می‌شود، در حین اینکه هوا از فیلتر در حال عبور بوده و ذرات کربن سیاه بر روی آن جمع می‌گردند، مبنای محاسبه‌ی غلظت است. نکته قابل توجه این است که پس از گذشت زمان از حضور ذرات کربن سیاه در هوا، آلاینده‌های دیگر به شکل یک پوشش دور این ذرات را احاطه می‌کنند و باعث می‌شوند ذرات کربن سیاه بر حسب عمر آن‌ها در مقابل طول موج‌های مختلف نور، رفتار متفاوتی داشته باشند [۱۶]. بر همین اساس ضریب اصلاحی  $k$  در هر طول موج دستگاه تعریف و توسط دستگاه با روابطی که در مرجع [۱۸] آمده است، محاسبه می‌شود. به ازای  $7\ \mu\text{m}$  طول موج اندازه‌گیری، هر چه این ضرایب به هم نزدیک‌تر باشند کربن سیاه اندازه‌گیری شده دارای پوشش کمتری بوده و ذره‌ای "جوان" خواهد بود. برعکس، فاصله گرفتن این ضرایب از هم بیانگر ذرات با عمر بیشتر است.



شکل ۴: مقایسه‌ی غلظت کربن سیاه میانگین روزهای کاری دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران

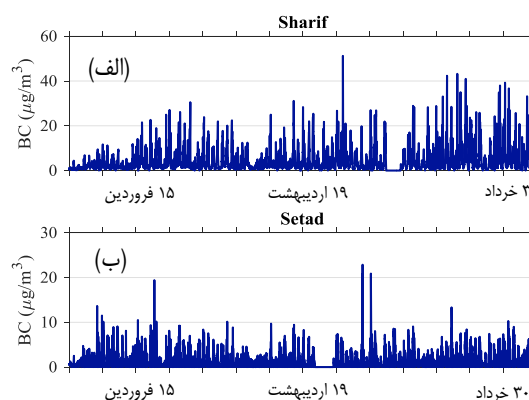
شکل ۵ - (الف) میانگین روزانه این ضرایب به ازای  $7\ \mu\text{m}$  طول موج مختلف را برای ایستگاه دانشگاه شریف نشان می‌دهد. شیب خط عبوری از نمودار نقاط  $k$  بر حسب طول موج در هر لحظه می‌تواند بیانگر عمر ذرات باشد. این نمودار در شکل ۵ - (ب) ترسیم شده است. نمودار بدست آمده تایید کننده نقش ناوگان شبانه در تولید و انتشار ذرات کربن سیاه می‌باشد. بدین صورت که در زمان شب، کربن سیاه جمع شده در فیلتر دارای عمر کمی بوده و به صورت محلی تولید گردیده است. در نقطه‌ی مقابل، ذرات در زمان روز دارای عمر بیشتری نسبت به ذرات شبانه بوده‌اند، چراکه منشا تولید آن‌ها کامیون‌های سنگینی بوده است که در شب قبل تردد داشتند. از آن جایی که کربن سیاه در زیرمجموعه ذرات معلق با قطر کوچکتر از  $2.5/5\ \mu\text{m}$  میکرون جای می‌گیرد، بررسی میزان و روند تغییرات غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در هوا برای اطلاع دقیق‌تر از منشا ذرات کربن سیاه، مفید به نظر می‌رسد. از بین  $2352$  داده ساعتی قابل ثبت در مدت ۱۴ هفته،  $2251$  داده در ایستگاه دانشگاه شریف و  $2351$  نقطه در ایستگاه ستاد بحران به ثبت رسیده که نشان دهنده ثبت  $95/7\%$  و  $99/9\%$  داده‌های ممکن می‌باشد. در شکل ۶ میزان غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در بازه ۱۴ هفته مورد مطالعه قابل مشاهده می‌باشد.

جرم آن‌ها استفاده می‌گردد. این فرایند به کمک مکانیزمی به صورت اتوماتیک اجرا می‌گردد [۱۷].

همچنین دستگاه‌های سری Serinus شرکت Ecotech در ایستگاه دانشگاه شریف و دستگاه‌های ساخت شرکت Environnement SA در ایستگاه ستاد بحران نصب می‌باشند که اطلاعات غلظت سایر گاز-های آلاینده مورد استفاده در این تحقیق از آن‌ها بدست آمده است.

#### ۴- نتایج و بحث

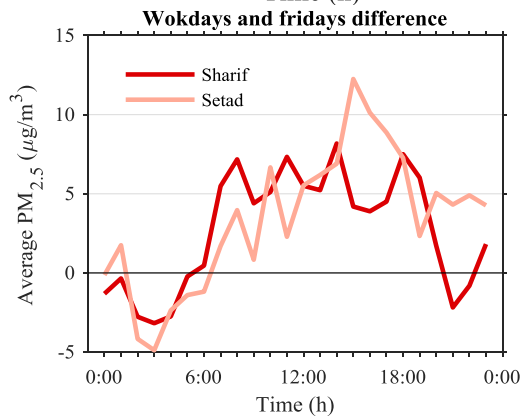
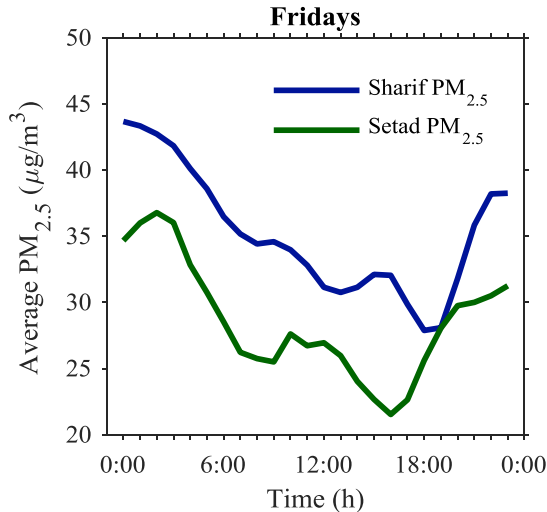
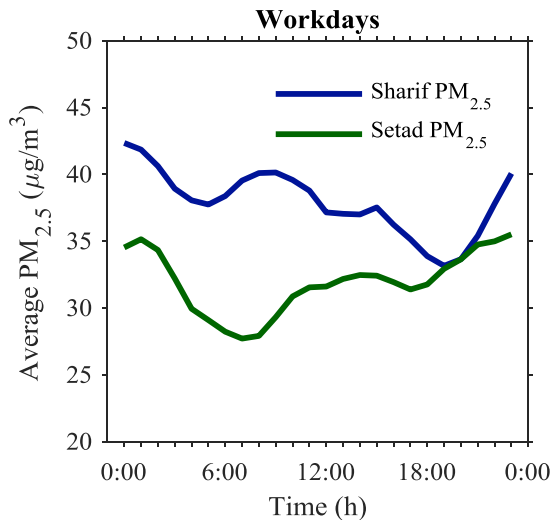
تمامی غلظت‌های آلاینده کربن سیاه در دو ایستگاه اندازه‌گیری در طول ۱۴ هفته در نمودارهای شکل ۳ رسم شده است. از تمامی  $28224$  مقدار قابل اندازه‌گیری در طول این مدت در بازه‌های ۵ دقیقه‌ای،  $27225$  داده در ایستگاه دانشگاه شریف و  $25469$  داده در ایستگاه ستاد بحران ثبت شدند. با این حال در دو ایستگاه، به ترتیب  $96/5$  و  $90/2$  درصد داده معتبر و صحیح ثبت گردیده است.



شکل ۳: داده‌های غلظت کربن سیاه در ایستگاه‌های (الف) دانشگاه شریف (ب) ستاد بحران

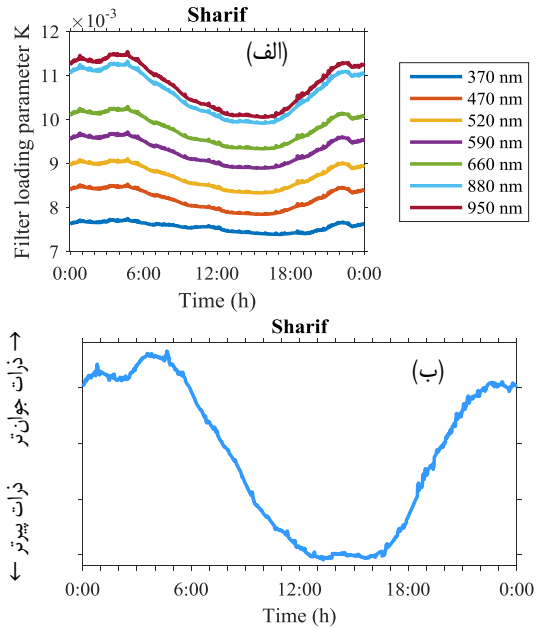
میانگین غلظت‌های آلاینده کربن سیاه در روزهای کاری در شکل ۴ نشان داده شده است که روندی افزایشی را بعد از ساعت ۷ شب با شروع تردد ناوگان کامیون‌های سنگین در سطح شهر نشان می‌دهد. این افزایش تا ساعت ۷ صبح ادامه پیدا کرده و بلافاصله با خروج کامیون‌های سنگین غلظت کربن سیاه با کاهشی شدید مواجه می‌شود و در طول روز تقریباً بدون تغییر می‌ماند. این تغییرات شدید در غلظت کربن سیاه تحت تاثیر مستقیم ورود کامیون‌های سنگین به سطح شهر و نشان‌دهنده تاثیر حضور این ناوگان بر کیفیت هوای شهر تهران است. باید توجه داشت که مطابق قانون، تردد این دست وسایل نقلیه از ساعت ۱۰ شب تا ۶ صبح روز بعد مجاز است، اما شروع روند افزایشی و کاهشی متأثر از این حضور ساعات دیگری را نشان می‌دهد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که این ناوگان به طور کامل محدودیت تردد را رعایت نمی‌کند. بر اساس این نمودار و حضور و عدم حضور ناوگان شبانه، بازه‌ی ۷ صبح تا ۷ شب را زمان روز و ۷ شب تا ۷ صبح روز بعد را زمان شب می‌نامیم.

33.08  $\mu\text{g m}^{-3}$  می‌باشد. بالاتر بودن میزان قله‌های شبانه ناشی از تاثیر بیشتر ناوگان شب و کاهش ارتفاع لایه مرزی است.

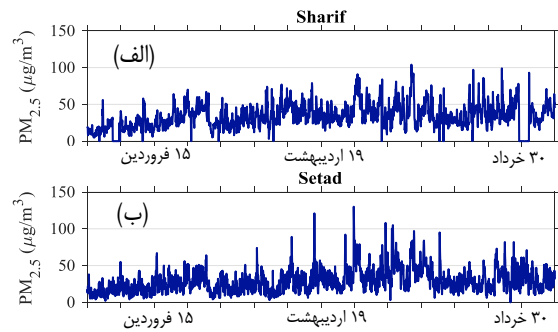


شکل ۷: مقایسه‌ی میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  دو ایستگاه در الف) روزهای کاری ب) جمعه‌ها ج) تفاوت غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  میانگین روزهای کاری و جمعه‌ها

نگاه دقیق‌تر به این روند نتایج زیر را به‌دست می‌دهد:



شکل ۵: میانگین روزانه الف) ضرایب K ب) عمر ذرات کربن سیاه



شکل ۶: داده‌های غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

میزان متوسط غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  نیز برای روزهای کاری و جمعه‌ها محاسبه شده است. شکل ۷ - الف) غلظت این آلاینده را در روزهای کاری برای این دو ایستگاه با هم مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشخص است در تمامی ساعات، میزان غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در ایستگاه دانشگاه شریف از مقدار متناظر آن در ایستگاه ستاد بحران بیشتر است، به طوری که میانگین غلظت این آلاینده در ایستگاه دانشگاه شریف  $37.91 \mu\text{g m}^{-3}$  و در ایستگاه ستاد بحران  $31.97 \mu\text{g m}^{-3}$  برای روزهای کاری اندازه‌گیری شده است.

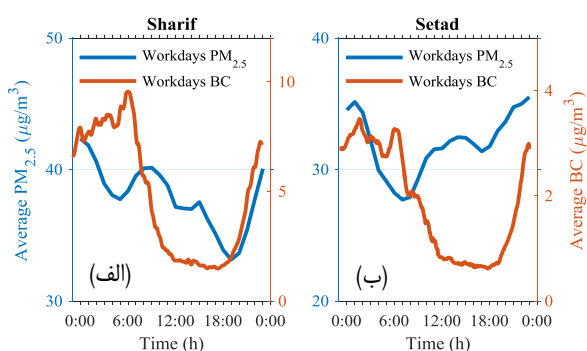
همان‌طور که از روند تغییرات غلظت  $\text{PM}_{2.5}$  در شکل ۷ - الف) قابل مشاهده است، در هر دو ایستگاه دو قله مشاهده می‌شود. یک قله شبانه و یک قله روزانه. قله شبانه به ترتیب در ایستگاه‌های دانشگاه شریف و ستاد بحران  $43.15 \mu\text{g m}^{-3}$  و  $36.17 \mu\text{g m}^{-3}$  ثبت گردیده و قله روزانه‌ی این دو ایستگاه به ترتیب  $40.92 \mu\text{g m}^{-3}$

۱. افزایش غلظت  $PM_{2.5}$  برای رسیدن به حداکثر مقدار روزانه در ایستگاه دانشگاه شریف در ساعت ۵ صبح و در ایستگاه ستاد بحران در ساعت ۷ صبح آغاز می‌شود. این تاخیر به این موضوع برمی‌گردد که در آغاز روزهای کاری، ترافیک خودروهای سبک از ناحیه‌ی مسکونی غرب (محل ایستگاه دانشگاه شریف) و همچنین حومه شهر و شهر کرج حرکت خود را آغاز کرده و بعد از مدتی طی طریق، به سمت نواحی مرکزی و اداری (محل ایستگاه ستاد بحران) سرازیر می‌شود. ۲ ساعت تاخیر زمانی به خوبی این جابجایی از غرب به مرکز را نشان می‌دهد. همچنین حرکت ترافیک در پایان ساعت کاری به سمت نواحی مسکونی غربی، معکوس اتفاقی که در قله روزانه افتاد، نیز قابل مشاهده است.

۲. داده اندازه‌گیری شده در ایستگاه دانشگاه شریف بیشتر بودن فعالیت‌های ترافیکی اطراف آن را نشان می‌دهد. در ضمن وجود شهرهای کوچک متعدد در غرب تهران و کرج که سکونت‌گاه تعداد زیادی از شاغلین تهران است و جریان دائمی ترافیک خودروها از این شهرها به داخل تهران و بالعکس، از سمت غرب، به بالا بودن غلظت این آلاینده در ایستگاه دانشگاه شریف نسبت به ایستگاه ستاد بحران کمک می‌کند. ۳. در زمان شب حداکثر مقدار در ایستگاه دانشگاه شریف از ایستگاه ستاد بحران عدد بزرگ‌تری می‌باشد. علت می‌تواند فعالیت‌های ساختمانی بیشتر به علت نوسازی و توسعه بافت شهری در مناطق مسکونی و تردد بیشتر کامیون‌های ترانزیتی از غرب تهران باشد. در شکل ۷- (ب) نمودار مشابه برای میانگین روزهای جمعه آمده است. مقادیر قله شبانه در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران به ترتیب اعداد  $43.67 \mu g m^{-3}$  و  $38.92 \mu g m^{-3}$  را نشان می‌دهند که با روزهای کاری تفاوت معنا داری ندارد. این بدان معناست که فعالیت‌های ساختمانی و ترانزیتی مرتبط با کامیون‌های سنگین در روزهای جمعه نیز به قوت خود باقیست. اما در طول روز قله‌ها به ترتیب در دو ایستگاه مورد بررسی  $35 \mu g m^{-3}$  و  $29.33 \mu g m^{-3}$  ثبت شده که نسبت به روزهای کاری به علت کاهش در فعالیت‌های روزانه‌ی شهری، کاهش نشان می‌دهد. باید توجه داشت که در زمان روز به غیر از قله‌ها که حاصل از ترافیک خودروهای سبک در طول روز می‌باشند، مقایسه روزهای جمعه و روزهای کاری تفاوت چندانی را در غلظت  $PM_{2.5}$  نشان نمی‌دهد. دلیل این مورد را می‌توان به حضور این ذرات آلاینده از منابعی علاوه بر منابع محلی (مانند ترافیک موضعی) و منابع غیر محلی با ابعاد تاثیر گسترده‌تر نیز دانست که با وجود کاهش ترافیک تاثیر آن‌ها باقی‌مانده است.

از بررسی اختلاف عددی در میزان غلظت  $PM_{2.5}$  بین روزهای جمعه و روزهای کاری می‌توان تاثیر حضور پرتعداد خودروها را در روزهای کاری دید. شکل ۷- (ج) این اختلاف را نشان می‌دهد. در طول زمان روز میانگین اختلاف غلظت کربن سیاه بین جمعه‌ها و روزهای کاری در ایستگاه دانشگاه شریف  $5.73 \mu g m^{-3}$  و در ایستگاه ستاد بحران

۳. شکل ۸ تفاوت در تغییرات دو پارامتر غلظت  $PM_{2.5}$  و غلظت BC را در ایستگاه‌های دانشگاه شریف و ستاد بحران نشان می‌دهد. در طول روز، ضریب همبستگی بین  $PM_{2.5}$  و BC برابر  $0.69$  در ایستگاه دانشگاه شریف و  $0.85$  در ایستگاه ستاد بحران بوده است. تفاوت در علامت این دو ضریب ناشی از تفاوت روند کلی صعودی یا نزولی بودن  $PM_{2.5}$  در این دو ایستگاه است، چرا که مقدار غلظت BC همان‌طور که بررسی شد در زمان روز نزولی است. علت این است که در ایستگاه دانشگاه شریف مقدار حداکثر شبانه به قدری بالاست که با شروع صبح و کنار رفتن کامیون‌های سنگین، کاهش در انتشار  $PM_{2.5}$  به قدری زیاد است که با حضور پرتعداد خودروهای سبک این افت جبران نمی‌شود و روند کلی تبدیل به روندی نزولی می‌گردد. در سمت مقابل، در ایستگاه ستاد بحران حضور پر تعداد ناوگان روزانه، افت ناشی از عدم حضور کامیون‌های سنگین را جبران نموده و روندی صعودی را ایجاد می‌کند. با این حال، با شروع شب، درصد جرمی BC موجود در  $PM_{2.5}$  اندازه‌گیری شده روندی صعودی را به خود می‌گیرد. در ایستگاه شریف در ساعت ۶ صبح به طور میانگین  $1/24$  درصد از  $PM_{2.5}$  مربوط به BC است. این عدد در ایستگاه ستاد بحران در حدود  $6/11$  درصد می‌باشد که نشان دهنده اهمیت منابع غیر محلی در تولید  $PM_{2.5}$  این ایستگاه است.



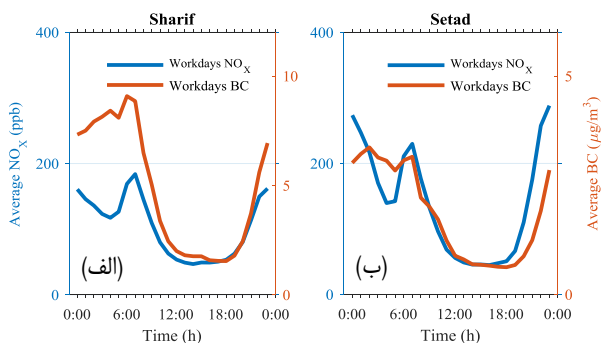
شکل ۸: مقایسه‌ی میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت  $PM_{2.5}$  و BC در ایستگاه‌های (الف) دانشگاه شریف (ب) ستاد بحران

شکل ۹ درصد سهم جرمی BC از مقدار اندازه‌گیری شده  $PM_{2.5}$  را نشان می‌دهد. به طور میانگین در ایستگاه دانشگاه شریف در زمان روز و شب به ترتیب  $6/8$  و  $18$  درصد از جرم  $PM_{2.5}$  مربوط به BC است. این مقادیر در ایستگاه ستاد بحران به ترتیب  $3/5$  و  $8/3$  درصدند. در

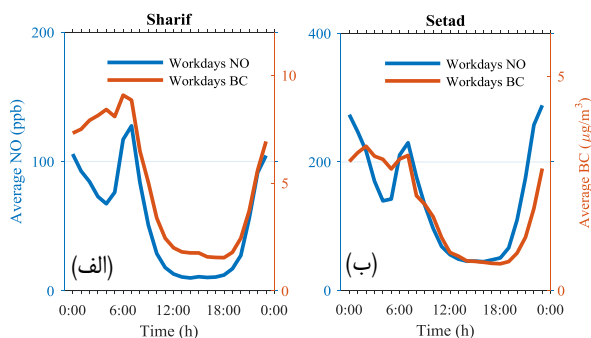
دیگر، سهم ناوگان شبانه از انتشار این دو گاز نسبتاً زیاد است. برای گاز NO<sub>2</sub> در زمان روز ضریب همبستگی با BC معادل ۰/۸۸ در ایستگاه دانشگاه شریف و ۰/۸۷ در ایستگاه ستاد بحران است.

جدول ۱: ضرایب همبستگی میان متوسط غلظت آلاینده‌های رایج و BC در روزهای کاری

آلاینده‌ها	زمان شب		زمان روز		CO - BC
	ستاد بحران	دانشگاه شریف	ستاد بحران	دانشگاه شریف	
CO - BC	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۹۷	۰/۹۸	
NO - BC	۰/۶۲	۰/۸۱	۰/۹۴	۰/۹۹	
NO <sub>2</sub> - BC	-۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۸۷	۰/۸۸	
NO <sub>x</sub> - BC	۰/۵۷	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۹۹	
O <sub>3</sub> - BC	-۰/۷۴	-۰/۷۴	-۰/۹۵	-۰/۹۴	
SO <sub>2</sub> - BC	۰/۱۲	۰/۶۳	۰/۴۶	۰/۹۸	
PM <sub>10</sub> - BC	۰/۵۷	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۶۹	



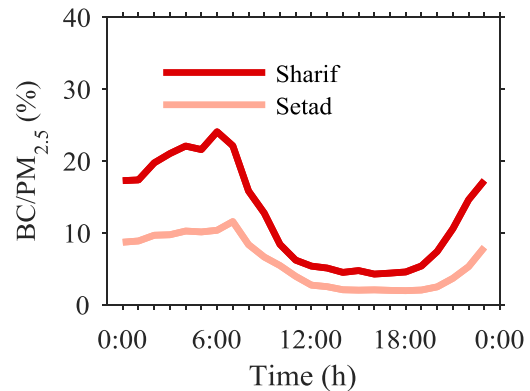
شکل ۱۰: مقایسه‌ی میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت BC و NO<sub>x</sub> در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران



شکل ۱۱: مقایسه‌ی میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت BC و NO در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

البته لازم به ذکر است که یکی از عواملی که بر غلظت آلاینده NO<sub>2</sub> در روز بسیار موثر است، شرکت کردن آن در واکنش‌های شیمیایی و تبدیل به آلاینده ازن در زمان روز و در حضور اشعه UV می‌باشد.

زمان شب ضریب همبستگی بین BC و PM<sub>2.5</sub> در دو ایستگاه به ترتیب ۰/۷۴ و -۰/۱۷ است که نسبت به زمان روز مقدار بیشتری است.



شکل ۹: درصد جرمی BC موجود در PM<sub>2.5</sub> اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه

نکته دیگری که از شکل ۸ برداشت می‌شود، مربوط به سرعت تغییرات در روند غلظت BC و PM<sub>2.5</sub> است که در مورد آلاینده کربن سیاه این تغییرات نسبت به ذرات معلق، سریع‌تر رخ می‌دهد. به عنوان مثال، در ایستگاه دانشگاه شریف غلظت کربن سیاه در میانگین روزهای کاری از ۹.۸۶ µg m<sup>-3</sup> در ۶ و ۴۵ دقیقه صبح با کاهش ۳/۲ برابری به میزان ۳.۰۸ µg m<sup>-3</sup> در ۱۰ و ۴۵ دقیقه صبح (۴ ساعت بعد) می‌رسد. این نتیجه تأیید کننده این واقعیت است که منبع انتشار کربن سیاه محلی بوده و به محض خروج ناوگان منتشر کننده (کامیون-های سنگین) غلظت آلاینده در هوا سریعاً افت می‌کند.

سایر آلاینده‌هایی که غلظت آن‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه ثبت گردیده است، شامل NO<sub>2</sub>، NO<sub>x</sub>، O<sub>3</sub>، SO<sub>2</sub> و PM<sub>10</sub> می‌باشند. همانند روند طی شده برای کربن سیاه و ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون، برای این داده‌ها نیز میانگین روزهای کاری محاسبه گردیده است. به منظور یافتن ارتباط میان این آلاینده‌ها و BC در دو زمان تعریف شده روز و شب، ضریب همبستگی میان دو دسته از ۱۲ داده ساعتی محاسبه گردیده که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

همانطور که در جدول ۱ مشخص است، برای آلاینده‌های NO<sub>x</sub> و NO بیشترین ارتباط معنی‌دار با آلاینده کربن سیاه وجود دارد. شکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مقایسه غلظت آن‌ها با کربن سیاه در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران و برای میانگین روزهای کاری را نشان می‌دهد. در زمان روز ضریب همبستگی میان NO<sub>x</sub> و BC به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۸ در ایستگاه‌های دانشگاه شریف و ستاد بحران می‌باشد. همچنین این ضرایب برای NO و BC در زمان روز به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۴ برای ایستگاه‌های دانشگاه شریف و ستاد بحران بدست آمده‌است. این نشان می‌دهد که انتشار NO و NO<sub>x</sub> در زمان روز، مشابه BC با افت شدیدی مواجه می‌شود، چرا که این سه آلاینده به طور عمده توسط خودروهای سنگین و احتراق دیزل تولید می‌گردند. به عبارت

### قردانی

از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران به جهت سرمایه‌گذاری در این مبحث و تامین تجهیزات پایش کربن سیاه و در اختیار قرار دادن نتایج اندازه‌گیری‌ها قردانی می‌شود.

### مراجع

[1] Anenberg, S. C., Schwartz, J., Shindell, D., Amann, M., Faluvegi, G., Klimont, Z., ... & Emberson, L. (2012). Global air quality and health co-benefits of mitigating near-term climate change through methane and black carbon emission controls. *Environmental Health Perspectives*, 120(6), 831.

[2] World Health Organization (WHO). (2012). Health effects of black carbon. WHO.

[3] Delfino, R. J., Staimer, N., Tjoa, T., Polidori, A., Arhami, M., Gillen, D. L., ... & Sioutas, C. (2008). Circulating biomarkers of inflammation, antioxidant activity, and platelet activation are associated with primary combustion aerosols in subjects with coronary artery disease. *Environmental health perspectives*, 116(7), 898.

[4] حسین شهبازی، مهدی بابایی، حسین افشین، وحید حسینی، "سیاهه انتشار آلاینده‌ی شهر تهران برای سال مبنای ۱۳۹۲ - جلد دوم: منابع متحرک"، گزارش تهیه شده در شرکت کنترل کیفیت هوا شهرداری تهران، شماره گزارش - QM/94/04/03(U)/02 - سال ۱۳۹۴.

[5] Khair MK. A review of diesel particulate filter technologies. SAE paper 2003-01-2303, 2003.

[6] Gilman, P. (2002). Health assessment document for diesel engine exhaust. US Environmental Protection Agency.

[7] Omidvarborna, H., Kumar, A., & Kim, D. S. (2015). Recent studies on soot modeling for diesel combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 635-647.

[8] Xi, J., & Zhong, B. J. (2006). Soot in diesel combustion systems. *Chemical engineering & technology*, 29(6), 665-673.

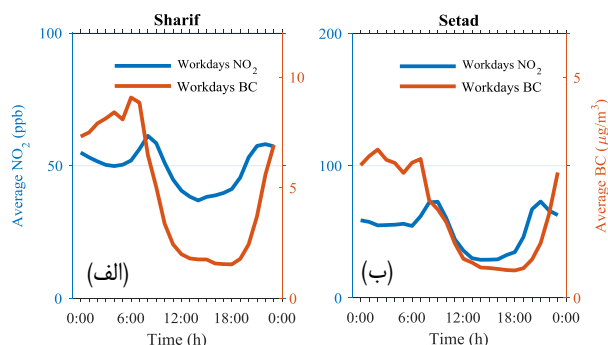
[9] Tree, D. R., & Svensson, K. I. (2007). Soot processes in compression ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 272-309.

[10] Wagner, H. G. (1979, January). Soot formation in combustion. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 17, No. 1, pp. 3-19). Elsevier.

[11] پورفلاح، محسن؛ علی اکبر رنجبر؛ قاسم جوادی راد و بهرام جعفری، ۱۳۸۸، تاثیر پیکربندی پاشش سوخت بر کاهش آلاینده‌ها در یک موتور دیزل سنگین، سومین کنفرانس احتراق ایران، تهران، انجمن احتراق ایران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

[12] Puxbaum, H., Gomiseck, B., Kalina, M., Bauer, H., Salam, A., Stopper, S., ... & Hauck, H. (2004). A dual site study of PM 2.5 and PM 10 aerosol chemistry in the larger region of Vienna, Austria. *Atmospheric Environment*, 38(24), 3949-3958.

زمان شب، ضریب همبستگی بین NO و BC به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۶۲ و همچنین بین NOx و BC برابر با ۰/۷۶ و ۰/۵۷ در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران است. اما بین NO2 و BC در این زمان ضریب همبستگی ۰/۰۲ و -۰/۳- در دو ایستگاه نامبرده شده به ترتیب برقرار است. این نشان می‌دهد که تولید NO2 ناوگان شب و احتراق دیزل همان‌طور که انتظار می‌رفت نسبت به NO و NOx قابل توجه نیست و باعث گردیده ارتباط کمی بین غلظت NO2 و BC دیده‌شود.



شکل ۱۲: مقایسه‌ی میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت NO<sub>2</sub> و BC (ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف (ب) ستاد بحران

### نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ی کربن سیاه، ذرات معلق و سایر گازهای آلاینده در دو ایستگاه تاثیر حضور ناوگان دیزلی را مشخص نمود. بدین صورت که غلظت کربن سیاه تحت تاثیر مستقیم ورود کامیون‌های دیزلی سنگین به سطح شهر به هنگام شب با افزایش شدیدی روبه‌رو می‌شد. بررسی ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون نیز قله‌هایی را در غلظت این ذرات نشان داد که میزان و ساعت رخ‌دادن آن‌ها تحت تاثیر پیک ترافیکی بود. مقایسه‌ی روند تغییرات غلظت کربن سیاه و ذرات معلق این نکته را نشان داد که کربن سیاه به جهت تغییرات شدید و یکدفعه‌ای، تحت تاثیر ناوگان در حال تردد، آلاینده‌ای با انتشار محلی و ناشی از احتراق دیزل بوده است. درصد جرمی که از کل PM<sub>2.5</sub> به کربن سیاه مربوط بود، در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران به طور میانگین ۱۲/۴ و ۵/۹ درصد بود که در نهایت به حداکثر مقادیر حدود ۲۴ و ۱۲ درصد در انتهای زمان شب می‌رسید. مقایسه‌ی روند تغییرات سایر آلاینده‌ها با کربن سیاه نشان داد که تغییرات در غلظت NOx و NO پس از خروج ناوگان سنگین دیزل از سطح شهر همبستگی حدود ۹۹ درصدی با غلظت BC دارد. این بدین معناست که NO و NOx هم در کنار BC داری منبع انتشار دیزل هستند، پس انتشار و حضور آن‌ها در زمان شب کاملاً تحت تاثیر احتراق دیزل است. بنابراین با اقدام در جهت کاهش آلاینده‌ی این ناوگان می‌تواند از غلظت آلاینده‌های ذکر شده در هوای تهران کاست.

The aethalometer—an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Science of the Total Environment*, 36, 191

[17] Chung, A., Chang, D. P., Kleeman, M. J., Perry, K. D., Cahill, T. A., Dutcher, D., ... & Stroud, K. (2001). Comparison of real-time instruments used to monitor airborne particulate matter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(1), 109-120.

[18] Virkkula, A., Chi, X., Ding, A., Shen, Y., Nie, W., Qi, X., & Petäjä, T. (2015). On the interpretation of the loading correction of the aethalometer. *Atmospheric Measurement Techniques*.

[13] Hitzenberger, R., Ctyroky, P., Berner, A., Turšič, J., Podkrajšek, B., & Grgić, I. (2006). Size distribution of black (BC) and total carbon (TC) in Vienna and Ljubljana. *Chemosphere*, 65(11), 2106-2113.

[14] Arhami, M., Hosseini, V., Shahne, M. Z., Bigdeli, M., Lai, A., & Schauer, J. J. (2017). Seasonal trends, chemical speciation and source apportionment of fine PM in Tehran. *Atmospheric Environment*, 153, 70-82.

[15] Shahbazi, H., Reyhanian, M., Hosseini, V., & Afshin, H. (2016). The relative contributions of mobile sources to air pollutant emissions in Tehran, Iran: an emission inventory approach. *Emission Control Science and Technology*, 2(1), 44-56.

[16] Hansen, A. D. A., Rosen, H., & Novakov, T. (1984).



## Effect of Crossing Diesel Fleet in Tehran on Black Carbon Air Pollution

A. Taheri<sup>1</sup>, P. Aliasghari<sup>2</sup>, V. Hosseini<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [taheri.atp@gmail.com](mailto:taheri.atp@gmail.com)

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [aliasghari\\_p@mech.sharif.edu](mailto:aliasghari_p@mech.sharif.edu)

<sup>3</sup>Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [vhosseini@sharif.edu](mailto:vhosseini@sharif.edu)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 22 December 2017

Accepted: 21 February 2018

#### Keywords:

Black carbon

Air pollution

Diesel engine

Particulate matter

Soot

### ABSTRACT

Diesel-fueled engines, despite all their benefits for heavy-duty vehicles, emit a large amount of particulate matter and Nitrogen oxides. Direct measurements of these vehicles' exhaust have shown that the major part of emitted particulate matter consists of carbon or soot. The pollutant Black Carbon (BC) has a destructive effect on human's health and environment and it is necessary to control its emission. For this purpose, BC concentration and its sources should be clearly estimated. In this study, direct measurement of BC concentration was conducted at two air quality monitoring stations in Tehran. This measurement, with a special instrument, illustrates the intensity of presence of BC in Tehran's air. Other prevailing pollutants, including particulate matters with a diameter of 2.5 micrometers or less (PM<sub>2.5</sub>) and Nitrogen oxides, were monitored in the same period of time and the results were compared with BC in order to source apportionment and find correlations between pollutants concentrations. The results showed that heavy-duty fleet are the main source of BC and Nitrogen oxide pollution in Tehran's air. BC concentration increased as soon as heavy trucks were admitted into the streets and remained high during their night activity. After sunrise, when heavy trucks were prohibited, BC concentration decreased to a low level and remained steady until night.

