

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شناسنامه گزارش

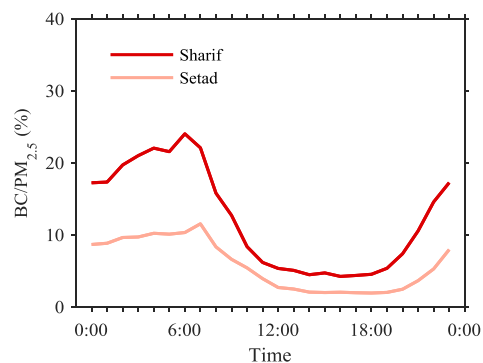
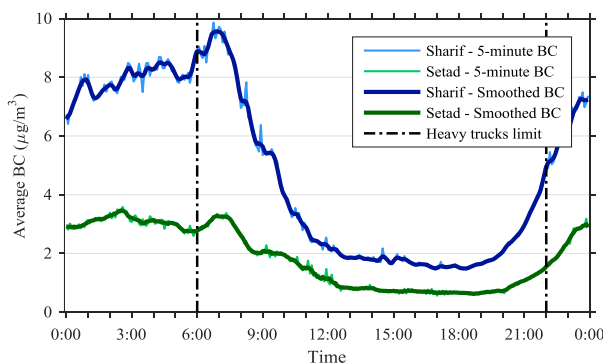
تعداد جلد	۱
کد گزارش	QP96/08/01 (U)/01
عنوان گزارش	بررسی غلظت آلاینده کربن سیاه در شهر تهران
نویسنده	احمد طاهری، پوریا علی اصغری
نظارت علمی	وحید حسینی
طرح جلد	مهسا خاکپناه
تهیه کننده	شرکت کنترل کیفیت هوا
نحوه ارجاع	ذکر مطالب گزارش حاضر بدون مجوز از شرکت کنترل کیفیت هوا و با ذکر مرجع به صورت زیر بلامانع است. احمد طاهری، پوریا علی اصغری، وحید حسینی "بررسی کربن سیاه در آلودگی هوای تهران"، گزارش فنی شرکت کنترل کیفیت هوا، شماره QP96/08/01 (U)/01 - آبان ۱۳۹۶
ویرایش	اول
نسخه الکترونیکی	فایل pdf این گزارش در وبسایت شرکت کنترل کیفیت هوا به آدرس http://air.tehran.ir قابل دسترسی می باشد.

خلاصه مدیریتی

کربن سیاه (Black Carbon) یکی از اجزاء مهم ذرات ریز معلق در هوا با قطر کمتر از $2/5$ میکرون ($PM_{2.5}$) است و از انواع فرآیندهای احتراق و بیشتر از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی (خصوصاً سوخت دیزل) و زیست‌توده ساطع می‌شود. ذرات کربن سیاه می‌توانند خطرات بیشتری بر سلامت انسان نسبت به سایر اجزاء $PM_{2.5}$ داشته باشند.

اندازه‌گیری‌های این بررسی مشخص کرده است که غلظت این آلاینده شب‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد به طوری که در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران میانگین غلظت‌ها در بازه‌ی شب به ترتیب $1/97$ و $1/86$ برابر می‌شوند. این روند نشان می‌دهد که حضور ناوگان دیزلی سنگین در سطح شهر مستقیماً بر غلظت کربن سیاه موجود در هوا موثر است و اقدامات کنترلی بر روی این ناوگان می‌تواند موجب کاهش غلظت این آلاینده در هوای تهران شود. شروع این افزایش در غلظت کربن سیاه در دو ایستگاه حدود ۷ شب است، یعنی به نظر می‌رسد کامیون‌های سنگین به تدریج در این ساعت وارد شهر می‌شوند.

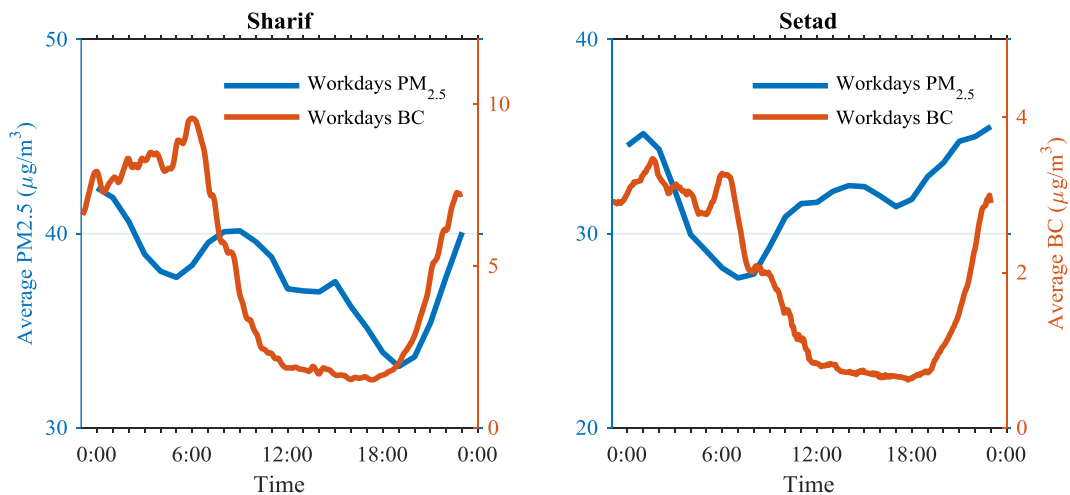
در حالی که در طول روز در دو ایستگاه اشاره شده به ترتیب به طور میانگین $6/8$ و $3/5$ درصد از جرم $PM_{2.5}$ هوا کربن سیاه است، در بازه‌ی شبانه این اعداد به $18/3$ و $8/3$ درصد افزایش می‌یابند. این یعنی انتشار کربن سیاه نسبت به $PM_{2.5}$ در ساعات شب و تحت تاثیر ناوگان دیزلی سنگین بیشتر از روز می‌باشد. مقایسه‌ی این روندها با تغییرات NO_x و NO تایید می‌کند که کربن سیاه با این آلاینده‌ها منبع انتشار مشترک دیزلی دارد.



چکیده

کربن سیاه (Black Carbon) یکی از اجزای موجود در مجموعه ذرات معلق کوچکتر از 2.5 میکرون یا $PM_{2.5}$ به شمار می‌رود. از منابع اصلی انتشار این آلاینده می‌توان به موتورهای احتراقی به‌ویژه از نوع دیزلی، سوزاندن چوب، ذغال و ضایعات کشاورزی و آتش سوزی جنگل‌ها اشاره کرد. برآورد شده است که تاثیر قرارگیری در معرض این آلاینده از غلظت مشابه $PM_{2.5}$ بر سلامتی انسان‌ها مضرت‌تر باشد. به علاوه، کربن سیاه با جذب تابش خورشید تاثیرات مخرب جوی نیز به بار می‌آورد. وضع سیاست‌هایی برای کاهش غلظت کربن سیاه و سرمایه‌گذاری در این زمینه مستلزم برآورد صحیحی از منابع انتشار و شدت حضور این آلاینده در هواست. به عنوان نمونه، نصب فیلترهای دوده بر روی ناوگان دیزلی یا اعمال محدودیت‌های ترافیکی ممکن است در این زمینه راهگشا باشد که اثرات و نتایج آن باید بررسی گردد.

اندازه‌گیری کربن سیاه و سایر آلاینده‌ها در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران منطقه ۷ هر ۵ دقیقه یکبار و طی یک بازه‌ی ۱۴ هفته‌ای از ۱ فروردین تا ۵ تیر ماه ۱۳۹۶ انجام گرفت. میانگین غلظت‌های کربن سیاه در روزهای کاری 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.





با تعریف بازه‌ی ۷ صبح تا ۷ شب به عنوان زمان روز و در ادامه به عنوان زمان شب، میانگین این غلظت در زمان روز در ایستگاه شریف $3.23 \mu g m^{-3}$ و در ایستگاه ستاد بحران $1.30 \mu g m^{-3}$ بوده است. میانگین آلاینده کربن سیاه برای زمان شب در این دو ایستگاه به ترتیب $6.37 \mu g m^{-3}$ و $2.42 \mu g m^{-3}$ ثبت شده‌اند که افزایش $1/97$ و $1/86$ برابری را نسبت به زمان روز به علت حضور ناوگان آلاینده کامیون‌های سنگین و کاهش ارتفاع لایه مرزی هوا نشان می‌دهند. میانگین غلظت آلاینده کربن سیاه روزهای جمعه در زمان روز به علت کاهش تردد ناوگان روز، کامیون‌های توزیع و اتوبوس‌های شهری، در دو ایستگاه اندازه‌گیری به ترتیب با $1.23 \mu g m^{-3}$ و $0.43 \mu g m^{-3}$ کاهش مواجهه بوده است. این درحالی است که میانگین روزهای جمعه در زمان شب، کاهش معناداری نسبت به میانگین روزهای کاری نداشت.

PM_{2.5} دیگر آلاینده‌ای بود که در دو ایستگاه بررسی و غلظت آن با غلظت BC مقایسه شد. در تغییرات غلظت PM_{2.5} روزهای کاری یک قله شبانه و یک قله روزانه مشاهده شد، به طوریکه تاخیر زمانی در ایستگاه ستاد بحران نسبت به دانشگاه شریف در شروع افزایش غلظت برای رسیدن به قله‌ی صبحگاهی، جابجایی ترافیک صبحگاهی از غرب به مرکز را نشان می‌دهد. معکوس این پدیده هنگام عصر قابل مشاهده است. افت شدید در غلظت کربن سیاه بلافاصله با آغاز صبح تایید می‌کند که BC آلاینده‌ای با منبع انتشار محلی است، در حالیکه منابع PM_{2.5} گسترده‌تر بوده و تغییرات غلظت آن ملایم‌تر است. در ضمن رفتار کاهشی آلاینده‌های NO، NO_x و BC همبستگی بسیار بالایی داشت که نشان از منبع مشترک انتشار آن‌ها در طول زمان شب است.

از بین منابع انتشار ثابت و مهم کربن سیاه تهران، صنایع با میزان تخمینی ۱۱۵ تن در سال سهم بیشتری نسبت به مجموع سه نیروگاه ری، طرشت و بعثت با انتشار ۳۵ تن و پالایشگاه تهران با انتشار ۴۰ تن کربن سیاه در سال دارند. با استخراج جهت بادها در زمان روز و مقایسه‌ی آن با میزان متناظر غلظت‌های کربن سیاه اندازه‌گیری شده مشاهده گردید که این منابع در بازه‌ی زمانی این مطالعه اثر قابل ملاحظه‌ای بر غلظت BC هوا نداشتند و کربن سیاه در هوای تهران شدیداً تحت تاثیر خودروهای سنگین دیزلیست.



فهرست مطالب

۱- معرفی کربن سیاه	۱
۱-۱- شکل گیری	۱
۱-۲- منابع و سهم انتشار	۲
۱-۳- تاثیرات سلامتی و مرگ و میر	۴
۱-۴- اثرات اقلیمی و آب و هوایی	۸
۱-۵- کنترل انتشار	۹
۲- نحوه مطالعه	۱۰
۲-۱- مرور ادبیات	۱۰
۲-۲- ایستگاه های اندازه گیری	۱۱
۲-۳- تجهیزات اندازه گیری	۱۳
۲-۴- داده برداری	۱۷
۳- نتایج و تحلیل ها	۱۸
۳-۱- اطلاعات هواشناسی	۱۸
۳-۲- لایه مرزی هوا	۱۹
۳-۳- روند تغییرات و نتایج اندازه گیری کربن سیاه	۲۱
۳-۴- روند تغییرات و نتایج اندازه گیری $PM_{2.5}$	۲۹
۳-۵- مقایسه نتایج اندازه گیری $PM_{2.5}$ و BC	۳۴
۳-۶- روند تغییرات و نتایج اندازه گیری سایر آلاینده ها	۳۶
۳-۷- مقایسه نتایج اندازه گیری سایر آلاینده ها و BC	۳۷
۳-۸- بررسی سهم فعالیت های صنعتی در غلظت BC هوا	۴۰
۴- منابع و مراجع	۴۷

فهرست اشکال

- شکل ۱- شکل گیری و ساختار کربن سیاه ۱
- شکل ۲- سهم منابع مختلف در انتشار کربن سیاه ۳
- شکل ۳- سهم آسیا، آفریقا و امریکای لاتین در انتشار کربن سیاه در مقایسه با سایر جهان ۴
- شکل ۴- موقعیت ۲۱ ایستگاه سنجش آلودگی هوا در شهر تهران. ۱۳
- شکل ۵- طرح شماتیک ساده کارکرد دستگاه اتلومتر ۱۴
- شکل ۶- اندازه گیری اپتیکی با مقایسه شدت نور عبوری از فیلتر تمیز با فیلتر حاوی ذرات BC ۱۵
- شکل ۷- دستگاه Aethalometer® Model AE33 ۱۶
- شکل ۸- اطلاعات هواشناسی: الف) دمای هوا ب) رطوبت نسبی ج) سرعت باد از ایستگاه هواشناسی مهرآباد ۱۸
- شکل ۹- گلباد: فراوانی سرعت و جهت بادهای ایستگاه هواشناسی مهرآباد ۱۹
- شکل ۱۰- نتایج مدل ارتفاع لایه مرزی هوا در سه روز. الف) حداکثر ب) حداقل ارتفاع لایه مرزی هوا ... ۲۰
- شکل ۱۱- داده های غلظت کربن سیاه در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران ۲۱
- شکل ۱۲- مقایسه غلظت کربن سیاه میانگین روزهای کاری دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران ۲۲
- شکل ۱۳- نمودار جعبه ای داده های غلظت کربن سیاه روزهای کاری در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران ۲۳
- شکل ۱۴- مقایسه غلظت کربن سیاه روزهای کاری و جمعه ها در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران ۲۴
- شکل ۱۵- تفاوت غلظت کربن سیاه میانگین روزهای کاری و جمعه ها ۲۴
- شکل ۱۶- میانگین هفتگی داده های غلظت کربن سیاه در ایستگاه الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران. ۲۵
- شکل ۱۷- مقایسه میانگین هفتگی داده های کربن سیاه بین ۲ هفته تعطیل نوروزی و ۱۲ هفته کاری ... ۲۶
- شکل ۱۸- مقایسه میانگین روزهای کاری داده های غلظت کربن سیاه در ایستگاه های دانشگاه شریف و ستاد بحران ۲۷



- شکل ۱۹- میانگین روزانه ضرایب k به ازای طول موج های مختلف اندازه گیری در ایستگاه دانشگاه شریف
۲۸.....
- شکل ۲۰- میانگین روزانه عمر ذرات کربن سیاه اندازه گیری شده در ایستگاه دانشگاه شریف ۲۹
- شکل ۲۱- داده های غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران ۳۰
- شکل ۲۲- مقایسه میانگین روزانه داده های غلظت $PM_{2.5}$ دو ایستگاه در الف) روزهای کاری ب) جمعه ها
۳۱.....
- شکل ۲۳- تفاوت غلظت $PM_{2.5}$ میانگین روزهای کاری و جمعه ها ۳۳
- شکل ۲۴- میانگین هفتگی داده های غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران ۳۴
- شکل ۲۵- مقایسه میانگین روزانه داده های غلظت $PM_{2.5}$ و BC در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب)
ستاد بحران ۳۵
- شکل ۲۶- درصد جرمی BC موجود در $PM_{2.5}$ اندازه گیری شده در دو ایستگاه ۳۶
- شکل ۲۷- مقایسه میانگین روزانه داده های غلظت BC و NO_x در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب)
ستاد بحران ۳۷
- شکل ۲۸- مقایسه میانگین روزانه داده های غلظت BC و NO در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب)
ستاد بحران ۳۸
- شکل ۲۹- مقایسه میانگین روزانه داده های غلظت BC و NO_2 در ایستگاه های الف) دانشگاه شریف ب)
ستاد بحران ۳۹
- شکل ۳۰- مقایسه میانگین روزانه داده های غلظت BC، NO، NO_2 و NO_x در ایستگاه دانشگاه شریف. ۳۹
- شکل ۳۱- مقایسه میانگین روزانه داده های غلظت BC، NO، NO_2 و NO_x در ایستگاه ستاد بحران ... ۴۰
- شکل ۳۲- موقعیت و توزیع منابع انتشار مهم ثابت PM شهر تهران الف) ۱- پالایشگاه تهران ۲- نیروگاه
طرشت ۳ - نیروگاه ری ۴ - نیروگاه بعثت ۴۱
- شکل ۳۳- مقایسه مقدار ثبت شده غلظت BC روزهای کاری از ساعت ۱ تا ۵ بعد از ظهر ایستگاه دانشگاه
شریف ۴۶



سازمان ملی تحقیقات محیط زیست
پایگاه ملی تحقیقات تهران

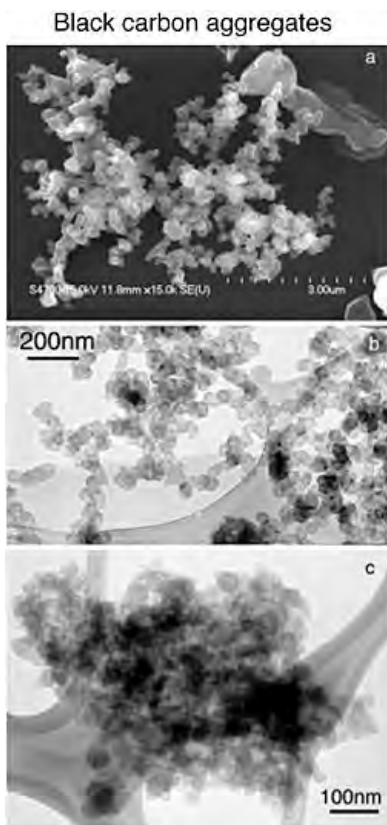
فهرست جداول

- جدول ۱- ضرایب همبستگی میان متوسط غلظت آلاینده های رایج و BC در روزهای کاری ۳۷
- جدول ۲- ضرایب EF(i. I. PM2.5) ۴۲
- جدول ۳- ضرایب SF(i. I. BC/PM2.5) ۴۲
- جدول ۴- میزان مصرف سوخت و انتشار PM و BC منابع مهم ساکن شهر تهران ۴۴

۱- معرفی کربن سیاه

کربن سیاه^۱ یکی از اجزاء مهم ذرات ریز معلق در هوا با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM_{2.5}) است و از انواع فرآیندهای احتراق و بیشتر از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی، سوخت‌های زیستی و زیست‌توده ساطع می‌شود. کربن سیاه موجود در هوا می‌تواند در بروز برخی بیماری‌ها و مرگ زودرس تأثیر زیادی داشته باشد. تحقیقات علمی اخیر نشان می‌دهد که در میان سایر ذرات معلق موجود در هوا، کربن سیاه بیشترین میزان جذب نور را داراست و با جذب نور خورشید موجب تغییر در روند ذوب یخ‌های موجود و تغییر در آب و هوای کره زمین می‌شود.

۱-۱- شکل‌گیری



شکل ۱- شکل‌گیری و ساختار کربن سیاه

کربن سیاه طی فرآیند احتراق سوخت‌های پایه کربنی زمانی که اکسیژن برای احتراق کامل کافی نباشد، تولید می‌شود. در مواردی نیز ممکن است اکسیژن کافی در دسترس نباشد ولی طی عملیات احتراق اکسیژن و سوخت کامل با هم مخلوط نشده باشند. یک سری واکنش‌های پیچیده طرح اولیه کربن سیاه را شکل می‌دهند. این فرآیندها ابتدا در هسته رشد پیدا می‌کنند و سپس به سمت سطح توسعه می‌یابند. مدتی پس از شکل‌گیری، هسته‌های اولیه گرافیتی منعقد شده و به هم می‌پیوندند و شامل زنجیره‌ای از هزاران جزء می‌شوند. اگر خروجی سوخت همچنان داغ بماند و اکسیژن کافی به شکل مناسبی با سوخت مخلوط شود، این اجزای کربنی ممکن است به وسیله واکنش اکسایش قبل از خروج از محفظه احتراق حذف شوند.

^۱ Black Carbon



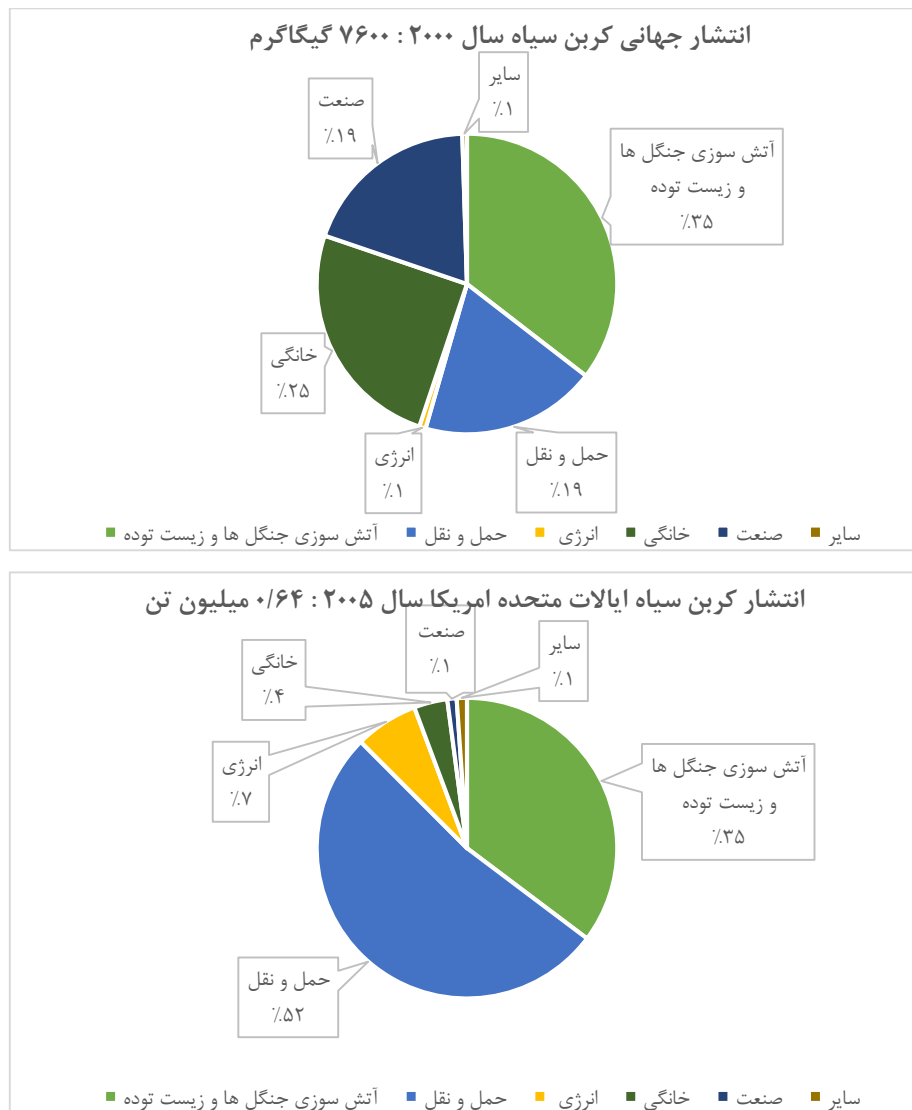
ساختار زنجیری کربن سیاه پس از خروج به سرعت تغییر می‌کند. بخار آب و سایر گازها از بین می‌روند و تبدیل به اجزای چگال‌تر می‌شوند. عکس‌های میکروسکوپ‌های الکترونی نشان می‌دهند اجزایی که به تازگی آزاد شدند اکثراً به صورت مخلوطی از اجزای ارگانیک و غیرارگانیک بازتابنده نور و جاذب شدید نور در شکل‌های مختلف وجود دارند. پس از فرآیند آزادسازی و انعقاد کربن، اجزای شیمیایی با هم مخلوط شده و تبدیل به جز دیگری می‌شوند. این ماده دیگر کربن سیاه خالص نیست بلکه شامل اجزای ارگانیک است. این فرآیند اختلاط پس از چند ساعت از آزاد شدن کربن سیاه در بعضی از نقاط مشاهده می‌شود اما این ارزیابی‌ها برای محاسبه مقدار اصلی این اجزا در اتمسفر کافی نیست. مدل جهانی که پروسه میکروفیزیکی را شبیه‌سازی می‌کند، پیش‌بینی کرده که بیشتر کربن سیاه با مواد دیگر طی ۱ تا ۵ روز مخلوط می‌شود و در تمامی سطوح نیز یافت می‌شود. مخلوط شدن کربن سیاه با اجزای بدون کربن و ساخت اجزای همراه با کربن باعث کاهش عمر مواد و همچنین افزایش میزان جذب تشعشعات خورشیدی می‌گردد. به همین دلیل میزان کربن سیاه موجود در مواد را باید در محاسبه عمر مفید آن‌ها لحاظ کرد.

۲-۱- منابع و سهم انتشار

در سال ۲۰۰۰ مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی حدود ۷/۶۰۰ گیگاگرم (حدود ۷/۶ میلیون تن) تخمین زده شده است. آسیا، بخش‌هایی از آفریقا و بخشی از آمریکای لاتین (مرکزی و آمریکای جنوبی) از جمله مناطقی هستند که بزرگترین مقدار کربن سیاه را انتشار می‌دهند. منابع در کشورهای در حال توسعه به طور قابل توجهی متفاوت از ایالات متحده هستند: منابع متحرک (۱۹٪) و سوزاندن زیست توده باز (۳۵٪)، بخش کوچکی از موجودی جهانی را تشکیل می‌دهند، در حالی که انتشار گازهای مسکونی و آشپزی (۲۵٪) و صنعت (۱۹٪) هستند.

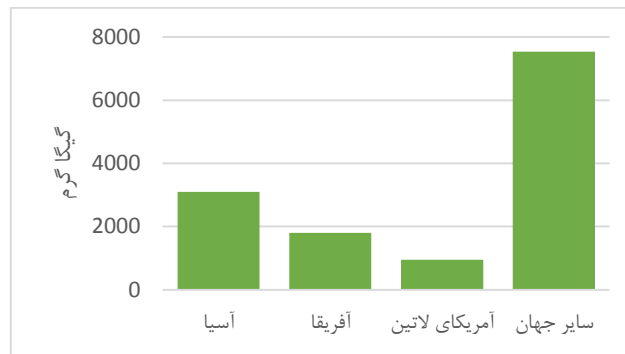
بیشترین انتشار گازهای گلخانه‌ای ایالات متحده از منابع متحرک (۵۲٪)، به خصوص موتورهای دیزلی و وسایل نقلیه است. در حقیقت ۹۳ درصد از کل منابع سیار در سال ۲۰۰۵ از دیزل ساخته شده است. منبع

اصلی دیگر در داخل کشور آمریکا، آتش‌سوزی با سوخت زیست توده باز (از جمله آتش‌سوزی جنگل‌ها) است، گرچه باید گفت آلودگی مسکونی و صنعت نیز نقش مهمی در این زمینه دارند.



شکل ۲- سهم منابع مختلف در انتشار کربن سیاه

طبق تحقیقات اخیر، کشور آمریکا مسئول تولید حدود ۶ درصد از کل کربن سیاه اتمسفر است. بیشترین میزان تولید کربن سیاه برای کشورهای توسعه یافته‌ای چون چین و هند است که روی هم ۲۵ تا ۳۰ درصد از کل کربن سیاه را تولید می‌کنند [۱].



شکل ۳- سهم آسیا، آفریقا و امریکای لاتین در انتشار کربن سیاه در مقایسه با سایر جهان

۳-۱- تأثیرات سلامتی و مرگ و میر

شواهد نشان می‌دهد ذرات کربن سیاه می‌توانند خطرات بیشتری بر سلامت انسان نسبت به سایر اجزاء $PM_{2.5}$ داشته باشند و این در حالی است که کربن سیاه تنها در حدود ۵ تا ۱۰ درصد از میزان ذرات معلق کمتر از 2.5 میکرون را به خود اختصاص می‌دهد.

برآوردها حاکی از آن است که ۸ درصد از کل مقدار انتشار یافته آلاینده کربن سیاه، سهم ایالات متحده بوده و بر اساس سطح کربن سیاه در سال ۲۰۱۰، این آلاینده موجب بروز ۱۴۰۰۰ مورد مرگ در کل آمریکا شده است که این میزان معادل ۰/۶ درصد کل موارد مرگ و میر در آمریکا بوده است. برهمن اساس صدها هزار مورد بیماری اعم از بستری شدن در بیمارستان و اورژانس و علائم تنفسی جزئی نیز بر اثر وجود کربن سیاه رخ داده است. آنالیزها نشان می‌دهد که میزان مرگ و میر متناسب به کربن سیاه حتی می‌تواند رقمی بیش از مقدار مذکور باشد و کنترل انتشار این آلاینده مزایای چشمگیری در کاهش بیماری‌های مرتبط و کاهش میزان مرگ و میر می‌تواند داشته باشد.

هرچند مطالعات انجام شده در زمینه اثرات بهداشتی آلاینده ذرات معلق کمتر از 2.5 میکرون، بیشتر از کربن سیاه بوده است، ولی تحقیقات نشان می‌دهد که $PM_{2.5}$ حاصل از احتراق خودروها به علت درصد کربن سیاه بالاتر، بسیار خطرناکتر از $PM_{2.5}$ ناشی از سایر منابع است.



همچنین بر اساس تحقیقی که در سال ۲۰۱۲ و بر پایه میزان انتشار در سال ۲۰۰۵ صورت پذیرفت، میزان مرگ و میر منتسب به آلاینده $PM_{2.5}$ در حدود ۱۳۰۰۰۰ مورد بود که با توجه به برآوردها، ۱۱ درصد آن مربوط به کربن سیاه بوده است. که در این میان شهرهای لس آنجلس، شیکاگو، نیویورک، فیلادلفیا و دیترویت بیشترین میزان مرگ و میر منتسب به کربن سیاه را به خود اختصاص داده‌اند [۲].

اثر کلی کربن سیاه روی سلامتی این‌گونه است که ذرات ریز به عمق سیستم تنفسی نفوذ می‌کنند و مواد شیمیایی خطرناک وارد جریان خون می‌شوند. در حالی که اختلاف نظر در مورد مسمومیت مستقیم کربن سیاه وجود دارد، این ماده به عنوان حاملی برای مواد سمی مختلف، نظیر هیدروکربن‌های چند حلقه‌ای و فلزات سنگین شناخته می‌شود [۳].

در کل تفاوتی بین اثرات کربن سیاه و $PM_{2.5}$ بر روی سیستم قلبی عروقی که اغلب منجر به مرگ می‌شود وجود ندارد. البته ممکن است عملکرد ریه به خصوص در مورد بیماران مبتلا به کمبود تنفسی مانند بیماران مبتلا به آسم کاهش یابد. علاوه بر این، واکنش‌های التهابی ممکن است در ریه‌ها به وجود آید و گسترش آن‌ها منجر به تخریب سیستم عصبی مستقل شود که به طور غیرمستقیم بر عملکرد قلب تاثیر می‌گذارد. به خصوص در کودکان، سطح بالای قرارگرفتن در معرض ذرات ریز ممکن است بر رشد ریه‌ها تاثیر بگذارد و سبب بیماری‌های تنفسی از جمله سینوزیت سرفه و سرما خوردگی شود.

در مورد مکانیزم‌های توسعه سرطان اختلاف نظر وجود دارد. با این وجود ارتباط بین قرار گرفتن در معرض ذرات ریز و خطر ابتلا به سرطان ارتباط روشنی وجود دارد. در میان ذرات $PM_{2.5}$ ، دود حاصل از موتورهای دیزلی به دلیل دارا بودن غلظت بالایی از ذرات BC دارای بیشترین اثر سرطان‌زایی است.

مطالعات اندکی وجود دارد که به طور اختصاصی اثرات کربن سیاه را بررسی کند و بیشتر مطالعات تنها اثرات $PM_{2.5}$ را مد نظر قرار داده‌اند. به عنوان مثال نشان داده است که افزایش $PM_{2.5}$ بیشتر از ۱۰ میکروگرم در متر مکعب می‌تواند خطر بیماری قلبی عروقی در زنان را ۷۶ درصد افزایش دهد. گروه‌های جمعیتی که در این مطالعات به عنوان آسیب‌پذیرترین گروه‌ها شناخته شده‌اند عبارتند از: کودکان به دلیل اینکه ریه‌ها و



سیستم تنفسی آن‌ها هنوز در حال توسعه است و قرار گرفتن در معرض ذرات ریز باعث اختلال عملکردی شدید می‌شود، افراد مسن به دلیل سیستم قلب و عروق خود به ویژه آسیب پذیر هستند، افراد مبتلا به آسم و افرادی که از بیماری‌های تنفسی رنج می‌برند [۴].

در ایالات متحده، میانگین مزایای بهداشت عمومی در ارتباط با کاهش مستقیم $PM_{2.5}$ از ۲۹۰۰۰۰ دلار به ۱/۲ میلیون دلار در هر تن $PM_{2.5}$ در سال ۲۰۳۰ تخمین زده می‌شود. هزینه کنترل‌های لازم برای دستیابی به این کاهش‌ها نیز عموماً بسیار پایین است. به طور جهانی برآورد می‌شود $PM_{2.5}$ مسئول مرگ زودرس میلیون‌ها نفر در سراسر جهان، که اکثراً در کشورهای در حال توسعه رخ می‌دهد، باشد. سازمان بهداشت جهانی (WHO) برآورد می‌کند سوخت جامد خانگی در میان ده عامل مهم خطرناک در سطح جهانی است که سالانه حدود ۲ میلیون مرگ و میر را به همراه دارد. زنان و کودکان به ویژه در معرض خطر هستند [۵].

تخمین زده می‌شود از ۶۴۰۰۰۰ تا ۴۹۰۰۰۰۰ مرگ و میر زودرس انسان‌ها می‌تواند هر ساله با استفاده از اقدامات کاهش موجود برای کاهش کربن سیاه در جو از بین برود. انسان‌ها در معرض کربن سیاه با استنشاق هوا در نزدیکی منابع محلی هستند. مهمترین منابع داخلی عبارتند از سوختن زیست توده، ترافیک و آتش‌سوزی‌های جنگل. غلظت کربن سیاه با افزایش فاصله از منابع (ترافیک) به شدت کاهش می‌یابد.

مطالعات ذرات جامد به طور سنتی بر روی اندازه‌گیری‌های یک سایت ثابت و یا غلظت تعیین شده در محل زندگی متکی است. مطالعات اخیر نشان داده است که افراد در ترافیک و در هنگام رانندگی با غلظت زیادی از کربن سیاه روبرو می‌شوند. غلظت کربن سیاه با رانندگی در حین ساعات پرتراфик، بزرگراه‌ها و ترافیک متراکم در خودروها بسیار زیاد است.

مزایای سلامتی کاهش میزان دوده و ذرات دیگر سال‌هاست که به رسمیت شناخته شده است. با این حال، در مناطق صنعتی در آسیا و مناطق شهری در غرب مانند شیکاگو، غلظت‌های بالا همچنان ادامه دارد. سازمان بهداشت جهانی برآورد می‌کند که آلودگی هوا باعث تقریباً دو میلیون مرگ زودرس در سال می‌شود. با کاهش



مرکز ملی تحقیقات سلامت هوا
وابسته به سازمان بهداشت

کربن سیاه، یک مولفه اصلی ذرات ریز، خطرات سلامتی از آلودگی هوا کاهش می‌یابد. در واقع، نگرانی‌های بهداشت عمومی منجر به تلاش‌های بسیاری برای کاهش چنین انتشاری شده است.

گزارش جدید سازمان بهداشت جهانی در مورد بیماری‌های قابل پیشگیری از خطرات زیست محیطی، ۳/۷ میلیون مرگ زودرس ناشی از آلودگی هوای آزاد و ۴/۳ میلیون مرگ برای آلودگی هوا در خانه در سال ۲۰۱۲ را نشان می‌دهد. تنفس ذرات (از کربن سیاه، سولفات، نیترات، آمونیاک، کلرید سدیم، گرد و غبار و آب معدنی) که ۱۰ میکرون یا کمتر قطر دارد (PM₁₀)، بیشترین خطر سلامتی را به خود اختصاص می‌دهد، زیرا ذرات می‌توانند راه خود را به ریه‌ها پیدا کنند و در جریان خون نفوذ کنند و باعث بیماری‌های قلبی عروقی و تنفسی و مرگ زودرس شوند.

هدف اتحادیه جهانی آشپزخانه پاک به عنوان یک مشارکت دولتی و خصوصی که توسط بنیاد سازمان ملل برگزار می‌شود، این است که تا سال ۲۰۲۰، ۱۰۰ میلیون خانوار مواد غذایی و سوخت‌های پاکیزه و کارآمدتر را به عنوان سوخت به کار گیرند. این اتحادیه افزایش آگاهی در مورد مزایای آشپزخانه‌های پاک و تلاش برای تسهیل تأمین مالی و توزیع آنها را در دستور کار خود قرار داده است. این تلاش برای جذب اهدا کنندگان و سرمایه گذاران برای سرمایه گذاری ۱ میلیارد دلار در بخش پخت و پز تمیز و موانع پذیرش اجاق‌های جدید مانند عادات آشپزی سنتی است.

تلاش‌های دیگر برای جلوگیری از انتشار کربن سیاه نیز انجام می‌شود. در مذاکرات آب و هوایی پاریس، ائتلاف آب و هوا و هوای پاک که شامل گروه‌های دولتی و صنعتی بود، در مورد برنامه‌هایی برای مقابله با انتشار "آلودگی‌های اقلیمی کوتاه مدت" که شامل کربن سیاه، HFC، متان و سطح زمین است، موافقت کردند. برای کاهش انتشار کربن، این کشورها در حال تلاش برای افزایش تعداد کشورها به ۴۰ کشور در طرح‌های حمل و نقل سبز تا سال ۲۰۱۸ هستند.

طی دو دهه‌ی گذشته تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که قرارگیری در معرض مقدار قابل توجهی از ذرات معلق در هوا از جمله کربن سیاه می‌تواند منجر به مرگ زودرس شود و تا ۱۵ درصد عمر مفید انسان را کم



مرکز کنترل آلودگی هوا
وابسته به سازمان محیط زیست

کند. این تحقیقات اثر کربن سیاه را روی سلامت انسان با تمرکز روی آمار مرگ و میر ناشی از اثرات این مواد توضیح می‌دهد و میزان تغییر در مرگ و میر و اثر روی سلامت انسان ها را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۳۰ با تمرکز روی اثر کربن سیاه نشان می‌دهد.

در ترافیک بودن نیز تاثیر بدی بر سلامت انسان‌ها می‌گذارد. مطالعه‌ای که در این زمینه انجام شد، نشان داد که ماندن در ترافیک در مدت زمان طولانی بیشتر از دو ساعت خطر ناشی از حمله قلبی را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده است کربن سیاه باعث افزایش فشار خون می‌شود. طبق گفته‌های بالا می‌توان نتیجه گرفت در مواقع ترافیک هیچ چیزی به اندازه کربن سیاه برای سلامت انسان ضرر ندارد به همین دلیل محاسبه‌ی کامل و دقیق میزان کربن سیاه تولیدی از موتورهای دیزلی امری ضروری است [۵].

۴-۱- اثرات اقلیمی و آب و هوایی

کربن سیاه به دو روش باعث گرمایش زمین می‌شود: زمانی که کربن سیاه در هوا رها می‌شود نور خورشید تابیده شده به خود را جذب می‌کند و در اتمسفر گرما ایجاد می‌کند که باعث افزایش دمای هوا شده و روی شکل ابرهای منطقه تاثیر می‌گذارد.

حالت دوم مربوط به حالتی است که کربن سیاه جذب برف یا یخ می‌شود، در این حالت، دوباره نور آفتاب را جذب می‌کند و سبب گرمایش هوا و سطح یخ می‌شود که این امر سبب افزایش سرعت آب شدن یخ‌ها می‌شود. به دلیل این که کربن سیاه به مدت یک تا چهار هفته در جو باقی می‌ماند تاثیرات زیادی روی آب و هوای آن منطقه می‌گذارد. بنابراین کاهش در میزان کربن سیاه تولیدی باید جزو سیاست‌های کشورهای مختلف قرار گیرد.

کربن سیاه بیشترین میزان جذب انرژی خورشید را داراست و می‌تواند یک میلیون بار انرژی بیشتری نسبت به دی اکسید کربن جذب کند. مقدار انرژی ذخیره شده در اتمسفر به ازای هر متر مربع سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. در سال ۲۰۱۳، اثر کربن سیاه به ۱/۱ وات بر مترمکعب در سال رسید. به عبارت دیگر، کربن سیاه



دومین کمک کننده به تغییرات آب و هوایی پس از دی اکسید کربن است. اما بر خلاف دی اکسید کربن که می تواند در صدها تا هزاران سال باقی بماند، کربن سیاه، به دلیل اینکه یک ذره است، تنها در چند روز تا چند هفته در جو باقی می ماند تا با باران یا برف به زمین برسد. کربن سیاه هنگامی که همراه با بارش به زمین می افتد، سطح برف و یخ را تیره می کند، این تیره شدن قدرت انعکاسی سطح را کاهش می دهد، برف را گرم می کند و سرعت ذوب شدن را افزایش می دهد.

کربن سیاه، مانند همه ذرات موجود در جو، بر بازتاب، ثبات و طول مدت ابرها تاثیر می گذارد و بارندگی ها را تغییر می دهد. با توجه به میزان پخش شدن، کربن سیاه در هوا اثر متفاوتی بر جو می گذارد دارد. اگر گرما در سطح جایی که ابرها تشکیل می شود، جذب شود سبب تبخیر می گردد. وقتی که آن ها در بالای ابرها قرار گیرند پرتوهای خورشید را می شکنند، آن را تثبیت می کنند و در نتیجه اثر خنک کنندگی دارند. از آن جایی که کربن سیاه با سایر اجزای ذرات مانند سولفات و نیترات که منعکس کننده نور خورشید هستند و جو را خنک می کنند، تعامل دارد، دانشمندان دقیقاً نمی دانند کربن سیاه چگونه به طور مستقیم روی گرم شدن کره زمین تاثیر می گذارد [۶].

۵-۱- کنترل انتشار

تکنولوژی های جدیدی برای کنترل میزان انتشار کربن سیاه، از جمله مجهز کردن ماشین های دیزلی به فیلتر برای جذب کربن سیاه، تغییر در سوخت مصرفی اتومبیل ها از سوخت فسیلی به سوخت های طبیعی و تعویض موتور های کهنه و کم بازده به وجود آمده اند.

انجام این کارها می تواند تاثیر مثبتی روی سلامت عمومی داشته باشد، برای مثال تغییر سوخت اتومبیل ها می تواند کیفیت هوای شهری را به میزان قابل توجهی بالا ببرد و میزان سرطان را به طور قابل توجهی کاهش دهد.



انواع مختلف دوده میزان مختلفی کربن سیاه دارند. به طور کلی دوده‌های سیاه‌تر میزان بیشتری کربن سیاه دارند و دوده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی سیاه‌تر از دوده‌های ناشی از سوخت چوب است. به همین دلیل کنترل مصرف سوخت‌های فسیلی گام موثری برای کنترل دمای اتمسفر در زمان کوتاه است. طبق گزارش سال ۲۰۱۲ EPA که برای کنگره ارسال شده است ایالت متحده متعهد شده است تا سال ۲۰۳۰، ۸۶ درصد از میزان تولید کربن سیاه خود را به دلیل استانداردهای انتشار گازهای جدید در خودروها و برنامه‌های تکمیلی دیزل کاهش دهد. کشورهای دیگر توسعه‌یافته استانداردهای انتشار گاز مشابهی برای وسایل نقلیه دارند، اما انتظار می‌رود انتشار گازهای کربن سیاه از وسایل نقلیه در کشورهای در حال توسعه افزایش یابد [۶].

۲- نحوه مطالعه

۱-۲- مرور ادبیات

اندازه‌گیری، منشایابی و مطالعه رفتار غلظت کربن سیاه موجود در هوا پیش از این در نقاط مختلفی از جهان صورت گرفته است. آقای هنسن^۲ و همکاران، مطالعه خود را از سال ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۶ در ایستگاه تحقیقاتی مک‌موردو^۳ قطب جنوب انجام دادند. آن‌ها دریافتند که مقادیر بالا در غلظت BC تحت تاثیر آلاینده‌های محلی می‌باشد. در ۶۵ درصد مدت زمانی اندازه‌گیری آن‌ها با غلظت کربن سیاه 20 ng m^{-3} مواجه بودند ولی در باقی بازه آزمایش، غلظت‌های بالا در حدود 300 ng m^{-3} ثبت شدند [۶]. مطالعه دیگری را آقای رامچاندران^۴ و راجش^۵ در شهر احمدآباد هند انجام داده‌اند. آنان یافتند که روند تغییرات غلظت کربن سیاه دارای تغییرات روزانه و فصلی است به طوری که تغییرات روزانه شامل دو قله^۶ صبحگاهی و عصرگاهی می‌باشد.

^۲ Anthony D.A. Hansen

^۳ McMurdo

^۴ S. Ramachandran

^۵ T. A. Rajesh

^۶ Peak

این قله‌ها ناشی از تغییرات در ارتفاع لایه مرزی هوا، افزایش در فعالیت‌های انسانی و ساعات اوج ترافیک اند. تغییرات فصلی نیز ناشی از تغییرات دما و به تبع آن ارتفاع لایه مرزی هوا یافت شدند به طوری که مقادیر غلظت کربن سیاه در ماه ژانویه حدود ۵ برابر ماه ژوئن بود [۸]. تحقیقات مشابه دیگر در شهرهای میلان [۹]، لندن [۱۰]، پکن [۱۱]، لیوبلیانا [۱۲] و وین [۱۳] تاکنون صورت پذیرفته است که همگی عوامل ترافیکی را عمده‌ترین فاکتور برای تغییرات غلظت کربن سیاه دانسته‌اند.

درباره مقایسه مقادیر کربن سیاه موجود در هوای محیط‌های مختلف نیز مطالعاتی توسط آقای پارک^۷ و همکاران انجام شده است. در این تحقیق، اندازه‌گیری‌ها در دو محیط بسته اداری و مسکونی و یک محیط شهری مسکونی صورت پذیرفت. نتیجه این بود که در محیط‌های بسته غلظت این آلاینده با میزان تبادل هوا با محیط بیرون، سطح فعالیت‌های انسانی در داخل و ترافیک خیابان‌های اطراف تناسب دارد. در ایستگاه اندازه‌گیری شهری این آزمایش حداکثر غلظت در حد $27.3 \mu g m^{-3}$ به ثبت رسید [۱۴].

در مطالعه‌ای در شهر تهران و در ایستگاه دانشگاه شریف نمونه برداری از آلاینده $PM_{2.5}$ از اسفند ۱۳۹۲ آغاز شد و به مدت یک سال ادامه یافت. نمونه‌ها برای شناسایی ترکیبات موجود مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. به طور میانگین، غلظت کلی این آلاینده $37.13 \mu g m^{-3}$ بدست آمد که نشان می‌داد در ۸۷/۵ درصد از روزهای اندازه‌گیری این غلظت از حد مجاز اعلامی توسط سازمان محیط زیست ایران بالاتر بوده است. ضمناً آنالیز شیمیایی مشخص نمود که ذرات کربن حدود ۹ درصد از جرم $PM_{2.5}$ را به خود اختصاص می‌دهند [۱۵].

۲-۲- ایستگاه‌های اندازه‌گیری

در این مطالعه از ظرفیت شبکه ایستگاه‌های ثابت پایش کیفیت هوای تهران که شامل ۲۱ ایستگاه متشکل از ۱۲ ایستگاه ترافیکی و ۹ ایستگاه شهری می‌باشد، استفاده شده است. ایستگاه‌های ترافیکی با هدف بررسی آلودگی هوا در مجاورت مناطق پرجمعیت بنا شده‌اند و تحت تاثیر مستقیم وسایل نقلیه هستند. ایستگاه‌های

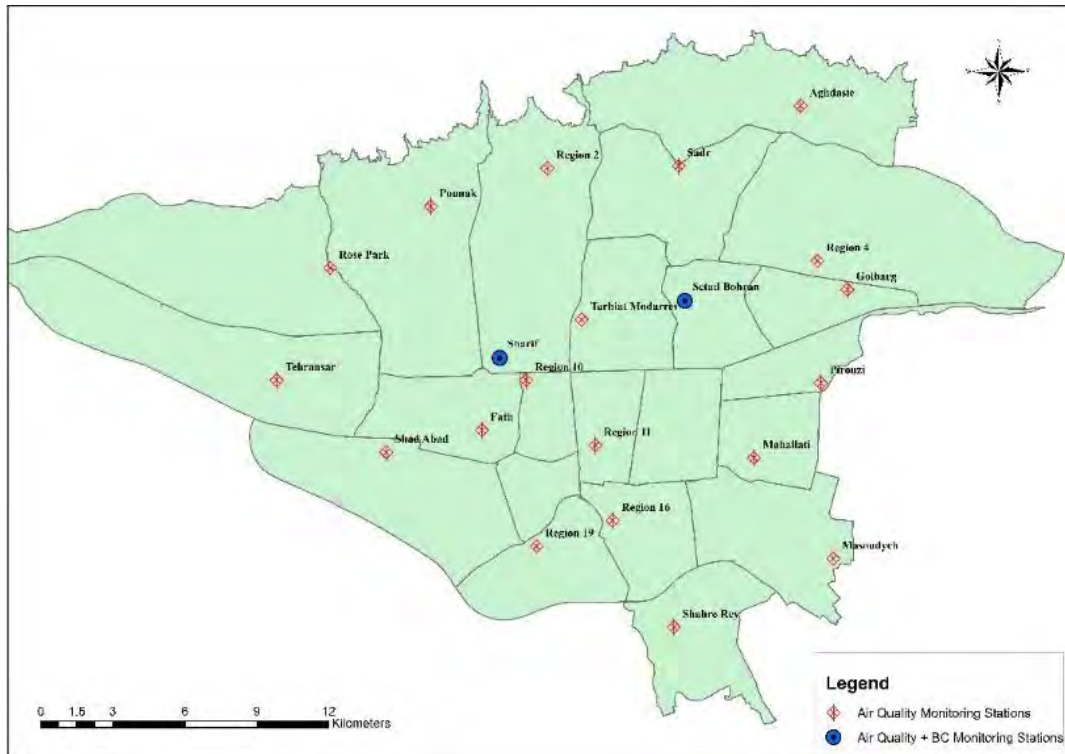
⁷ Seung Shik Park

شهری نیز به منظور بررسی تاثیر آلاینده‌ها بر جمعیت در معرض آلودگی احداث گردیده‌اند. ایستگاه‌های شهری از خیابان‌های بزرگ بین ۱۰ تا ۲۰۰ متر، تعمیرگاه‌های اتومبیل و پارکینگ‌ها حداقل ۲۰۰ متر و ایستگاه‌های تاکسی و اتوبوس در حدود ۱۰۰ متر فاصله دارند. اکثر این ایستگاه‌ها به دستگاه‌هایی برای پایش 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} که به ترتیب بیانگر ذرات با قطر آیرودینامیکی کوچکتر از ۲/۵ و ۱۰ میکرون هستند، مجهزند. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط تجهیزات واقع در ایستگاه‌های مذکور به شکل آنلاین در دسترس عموم قرار می‌گیرد [۱۶]. در این مرحله به منظور پایش غلظت کربن سیاه دستگاه‌هایی مخصوص که به تفضیل به آن پرداخته خواهد شد، به صورت جداگانه در ایستگاه‌های شهری دانشگاه شریف و ستاد بحران منطقه ۷ نصب گردید. شکل ۴ وضعیت استقرار ۲۱ ایستگاه پایش شهر تهران را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در آینده‌ای نزدیک، تعداد ایستگاه‌های مجهز به تجهیزات پایش غلظت BC به ۴ ایستگاه افزایش خواهد یافت.

ایستگاه شریف واقع در محوطه دانشگاه صنعتی شریف، در منطقه ۲ شهرداری تهران، در ناحیه‌ای با بافت شهری و غالباً مسکونی در سال ۱۳۹۱ افتتاح شده‌است. میدان آزادی به عنوان بزرگترین میدان شهر تهران در نزدیکی آن بوده و ۳ بزرگراه جناح، شیخ فضل‌الله نوری و یادگار امام از سه جهت ایستگاه را محاصره کرده‌اند که فاصله هر کدام از ایستگاه دانشگاه شریف کمتر از ۱ کیلومتر می‌باشد و در ساعات اوج ترافیک صبحگاهی بیش از ۶۰۰۰ خودرو در هر ساعت در هر یک از آن‌ها تردد می‌کنند [۱۷]. همچنین پایانه غرب، در فاصله‌ی کمتر از ۱/۵ کیلومتر از ایستگاه مذکور، به عنوان محل تجمع و حرکت اتوبوس‌های بین شهری و ایستگاه اتوبوس BRT خط یک شهر تهران، همواره فعال بوده و تولید قابل توجهی از گازهای حاصله از احتراق دیزل در آن صورت می‌گیرد.

ایستگاه ستاد بحران، در محوطه ستاد بحران منطقه ۷ شهرداری تهران، در مجاورت خیابان‌های شهید مطهری و شهید مفتح، در منطقه‌ای با کاربری عمدتاً اداری واقع شده‌است. اطراف این ایستگاه بجز بزرگراه مدرس در فاصله‌ی کمتر از ۷۰۰ متری فعالیت با تولید آلودگی قابل توجه مشاهده نمی‌شود. ضمناً این ایستگاه در

محدوده طرح‌های زوج و فرد و کاهش نیز واقع شده است که بر روی میزان فعالیت خودروهای سبک در اطراف آن موثر است.



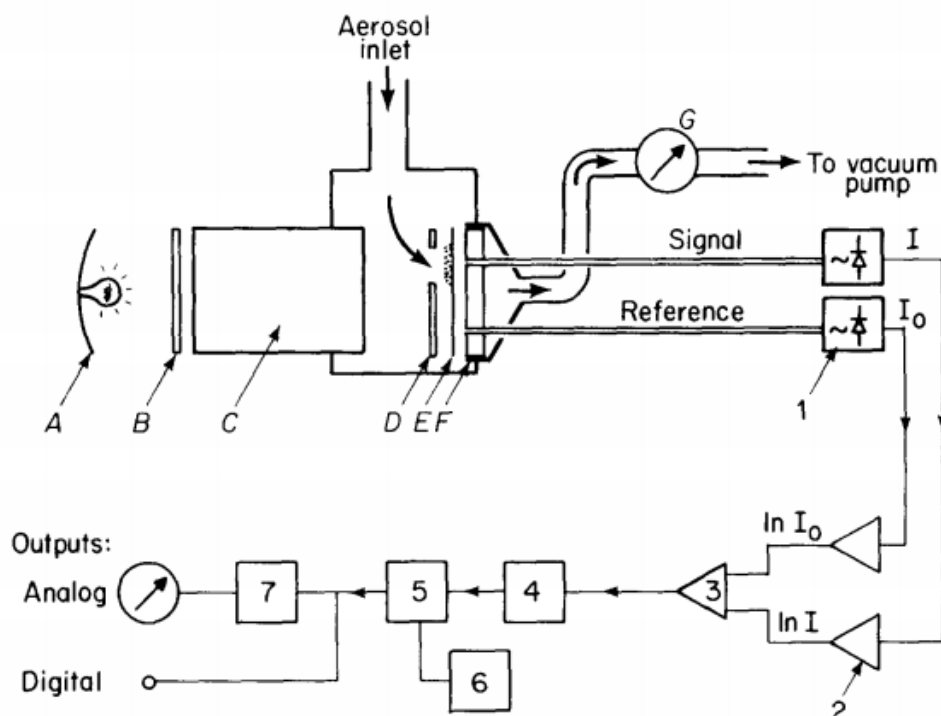
شکل ۴- موقعیت ۲۱ ایستگاه سنجش آلودگی هوا در شهر تهران. ایستگاه‌های مجهز به دستگاه اندازه‌گیری غلظت کربن سیاه با علامت آبی مشخص شده‌اند.

۳-۲- تجهیزات اندازه‌گیری

در این پروژه غلظت آلاینده‌ی کربن سیاه با استفاده از دستگاهی به نام اتلومتر^۸ اندازه‌گیری شده است. نام این دستگاه از واژه‌ای یونانی به معنای "سیاه شده با دوده" گرفته شده است. اساس کار آن مطابق شکل ۵ بر پایه اندازه‌گیری پیوسته‌ی میزان تضعیف یک پرتو نور بعد از عبور از یک فیلتر در حالی که هوای حاوی ذرات کربن سیاه از آن عبور می‌کند، بناگذاشته شده است. هنگامی که جریانی از هوا با دبی ثابت از فیلتر عبور می‌کند ذرات کربن سیاه با آهنگی که متناسب با غلظت آن در هوا است بر روی فیلتر می‌نشینند. متناسب با آهنگ

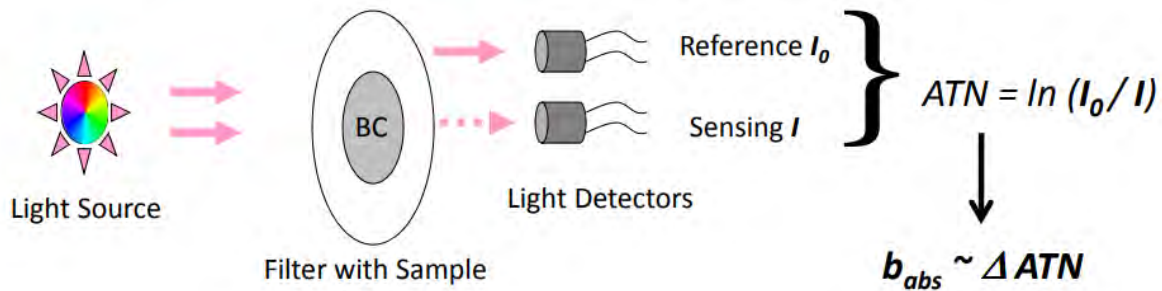
^۸ Aethalometer

نشست ذرات بر روی فیلتر نور عبوری تضعیف می‌گردد. آهنگ این تضعیف نور توسط دستگاه تشخیص داده می‌شود و مبنای محاسبه غلظت کربن سیاه قرار می‌گیرد. در این فرآیند ذرات کربن سیاه روی فیلتر باقی می‌مانند و می‌توانند برای آزمایش‌های بیشتر نیز مورد استفاده قرار گیرند [۱۸].



شکل ۵- طرح شماتیک ساده‌ی کارکرد دستگاه اتلومتر

طبق شکل ۶ جریان هوا به گونه‌ای به دستگاه راه می‌یابد که تنها از بخشی از فیلتر عبور می‌کند و قسمت باقی مانده از فیلتر به عنوان مرجع برای اندازه‌گیری اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. میزان تضعیف پرتو از مقایسه شدت پرتوی عبوری از قسمت جمع‌کننده ذرات در فیلتر (I) با شدت پرتوی عبوری از قسمت مرجع فیلتر (I_0) با رابطه‌ی $A = 100 \ln(I_0/I)$ محاسبه می‌گردد. در مراحل بعدی مقدار این معادله تبدیل به یک ولتاژ شده و از طریق آهنگ افزایش این ولتاژ میزان غلظت آلاینده محاسبه می‌گردد [۱۸].



شکل ۶- اندازه‌گیری اپتیکی با مقابسه‌ی شدت نور عبوری از فیلتر تمیز با فیلتر حاوی ذرات BC

در ایستگاه دانشگاه شریف دستگاه Aethalometer[®] Model AE33 ساخت شرکت Magee Scientific مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری همزمان بر روی ۷ طول موج 520، 470، 370، 880، 660، 590 و 950 nm را دارد. غلظت کربن سیاه بر روی طول موج 880 nm محاسبه می‌گردد. از اندازه‌گیری با چند طول موج همزمان می‌توان برای منشایابی شیمیایی ذرات کربن سیاه، مطالعه میزان جذب نور توسط این ذرات و ... استفاده نمود. در این دستگاه، اندازه‌گیری به صورت موازی در دو نقطه با میزان بار متفاوت انجام می‌شود و در نهایت با محاسبات ریاضی غلظت نهایی کربن سیاه محاسبه می‌گردد. دقت این دستگاه $0.03 \mu g m^{-3}$ در دبی هوای ورودی ۵ لیتر در دقیقه و اندازه‌گیری‌های یک دقیقه‌ای است و توانایی اندازه‌گیری در رنج $0.01 \mu g m^{-3}$ تا $100 \mu g m^{-3}$ را دارا می‌باشد [۱۹]. در ایستگاه ستاد بحران مدل دیگری از دستگاه معرفی شده به نام Aethalometer[®] Model AE31 از همان شرکت سازنده نصب گردیده است. این مدل، اندازه‌گیری را با طول موج‌های 370، 450، 571، 615، 660، 880 و 950 nm انجام می‌دهد [۲۰].



شکل ۷- دستگاه Aethalometer® Model AE33

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 [۲۱ و ۲۲]. دستگاه BAM از یک ورودی انتخابی بر حسب اندازه^۹، 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 جرم آن‌ها استفاده می‌گردد. این فرایند به کمک مکانیزمی به صورت اتوماتیک اجرا می‌گردد [۲۳].

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 گازهای آلاینده مورد استفاده در این تحقیق از آن‌ها بدست آمده است [۲۴].

⁹ Size-selective inlet

۴-۲- داده برداری

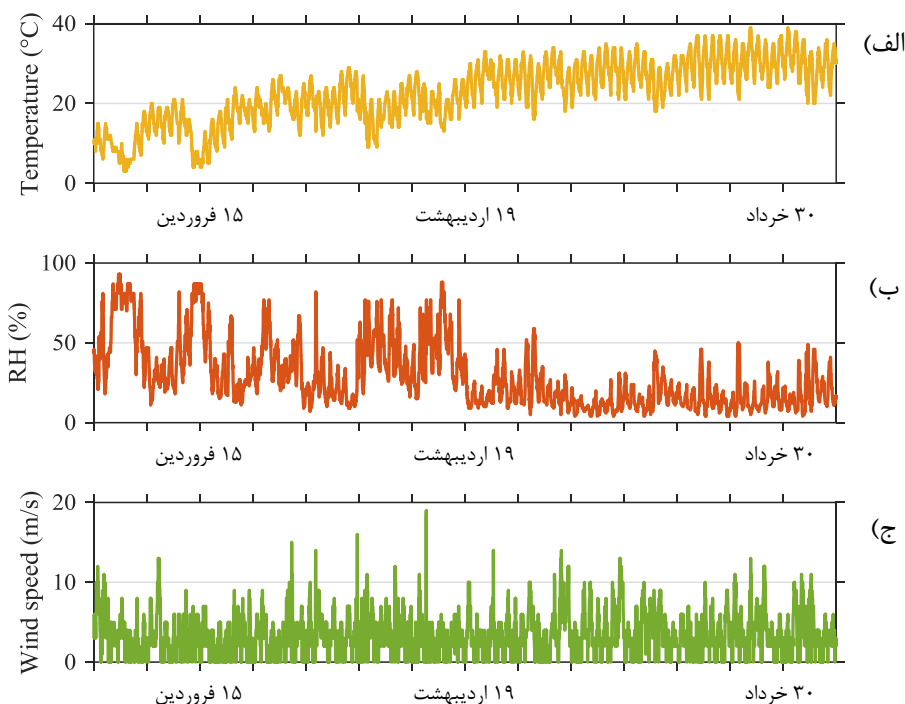
برای این مطالعه، داده برداری غلظت کربن سیاه هر ۵ دقیقه یکبار در مدت ۱۴ هفته و به صورت پیوسته در دو ایستگاه مذکور انجام گرفت. داده برداری از اول فروردین ۱۳۹۵ شروع و تا ۵ تیرماه ادامه یافت. در همین بازه اطلاعات سایر آلاینده‌ها به منظور مقایسه با کربن سیاه از همان ایستگاه‌ها استخراج و مورد استفاده قرار گرفت. این اطلاعات (به جز ذرات معلق $PM_{2.5}$) نیز 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 مورد استفاده قرار گرفتند. از اطلاعات هواشناسی ایستگاه مهرآباد، واقع در ۳ کیلومتری ایستگاه دانشگاه شریف به منظور مقایسه با آلاینده‌های اندازه‌گیری شده در این ایستگاه کمک گرفته شد. این داده‌ها که شامل دما، رطوبت، سرعت و جهت باد می‌باشد، هر ۳۰ دقیقه ثبت گردیده است. ارتفاع لایه مرزی هواشناسی در سطح شهر تهران دیگر پارامتر در نظر گرفته شده در این بررسی است که برای ۳ روز مشخص شامل یک روز ابتدایی، یک روز میانی و یک روز انتهایی بازه مورد بررسی، در دو نوبت حداکثر و حداقل ارتفاع لایه مرزی، از سامانه مدل‌سازی و پیش‌بینی آلودگی هوای تهران [۲۵] استخراج شد.

تمامی داده‌ها به دقت از نظر وجود خطا در اندازه‌گیری و گزارش بررسی و موارد مشکوک به خطا کنار گذاشته شدند. دو هفته ابتدایی داده برداری، مصادف با تعطیلات نوروز بود در راستای مقایسه با ۱۲ هفته دیگر، کنار گذاشته شدند؛ چراکه در ایام نوروز، تردد خودروها در تهران به طور چشمگیری با کاهش مواجه بوده و داده اندازه‌گیری شده در این مدت می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین تاثیر حضور خودروها بر کیفیت هوای تهران باشد. همچنین روزهای ۱۲ هفته مورد بحث به دو بخش روزهای کاری و جمعه‌ها تقسیم شدند. از شنبه تا چهارشنبه به عنوان روزهای کاری در نظر گرفته شده است. پنج‌شنبه‌ها به علت مشخص نبودن وضعیت دقیق تعطیلی فعالیت‌های شهری مورد مطالعه قرار نگرفتند و صرفاً جمعه‌ها به عنوان روزهای تعطیل بررسی شدند.

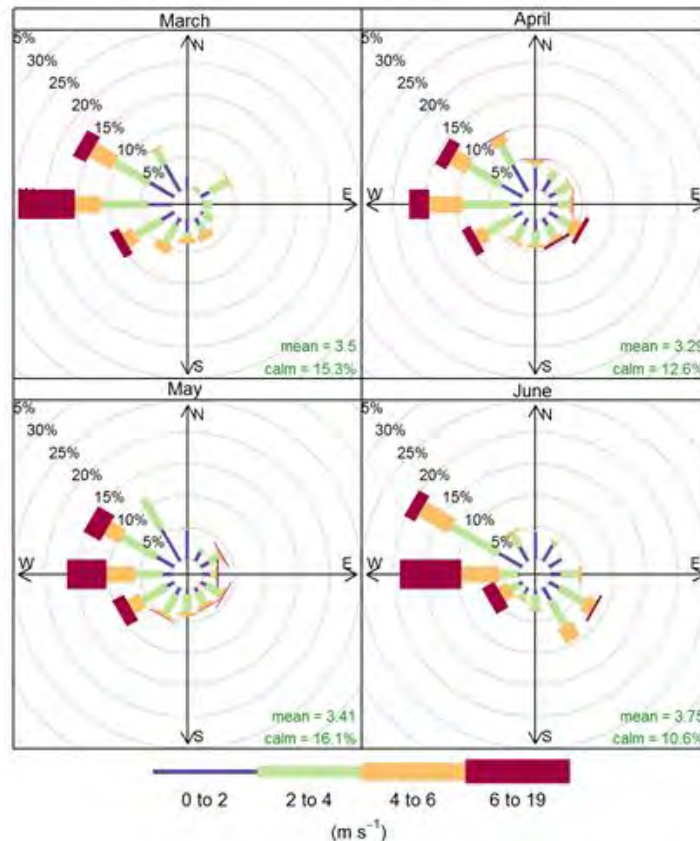
۳- نتایج و تحلیل‌ها

۳-۱- اطلاعات هواشناسی

اطلاعات هواشناسی اندازه‌گیری شده در مدت مورد مطالعه از قرار زیر است. از ابتدای بهار تا تابستان مطابق شکل ۸ دما افزایش یافته است. رطوبت نسبی در روزهای بارانی بهاری بالا بوده و پس از اتمام بارش‌ها مقدار کمی داشته است. همچنین گلباد رسم شده در شکل ۹ نیز، فراوانی، شدت و جهت باد در ۴ ماه میلادی در برگزیده بازه مطالعه شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، جهت باد غالباً از غرب به شرق و گاهی از شمال غرب به جنوب شرق بوده است. سرعت آن گاهی به ۵۰ کیلومتر بر ساعت نیز رسیده ولی اکثر اوقات سرعتی کمتر از ۳۰ کیلومتر بر ساعت داشته است. از این اطلاعات به جهت یافتن میزان تاثیر منابع انتشار ثابت کربن سیاه بر روی ایستگاه شریف استفاده خواهد شد.



شکل ۸- اطلاعات هواشناسی: الف) دمای هوا ب) رطوبت نسبی ج) سرعت باد از ایستگاه هواشناسی مهرآباد



شکل ۹- گلباد: فراوانی سرعت و جهت بادهای ایستگاه هواشناسی مهرآباد

۲-۳- لایه مرزی هوا

پایین‌ترین لایه‌ی اتمسفر، تروپوسفر^{۱۰} نام دارد که خود به دو بخش تقسیم می‌گردد: (۱) لایه مرزی هوا^{۱۱} که از سطح زمین تا ارتفاعی در حدود ۱۰۰ الی ۳۰۰۰ متری گسترش پیدا کرده است. (۲) اتمسفر آزاد که در بالای لایه مرزی حضور دارد. لایه مرزی هوا مستقیماً تحت تاثیر سطح زمین و نیروهای نظیر درگ اصطکاکی، گرمایش خورشیدی و تبخیر آب‌های سطحی است. این نیروها سبب به وجود آمدن اغتشاش در سیال و ایجاد گردابه‌هایی می‌گردد که در کل ارتفاع این لایه مرزی گسترش می‌یابند. این پدیده باعث می‌شود که اجزای

¹⁰ Troposphere

¹¹ Planetary Boundary Layer (PBL)

هوا به شکل عمودی نیز با هم مخلوط شوند و بستری برای تجمع آلاینده‌ها در این لایه پدید آید. در اتمسفر آزاد جریان هوا تقریباً افقی بوده و اجازه نمی‌دهد آلاینده‌ها در آن وارد و مخلوط شوند [۲۶].

ارتفاع لایه مرزی هوا در سطح شهر تهران در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقادیر حداقل ارتفاع در سه روزی که به نمایندگی از کل بازه‌ی مطالعه در هفته‌ی ابتدایی، میانی و آخر انتخاب شدند، تقریباً ثابت و در حدود ۲۵۰ متر بوده است. این مقدار حداقلی چند ساعت قبل از طلوع خورشید و در زمانی از شبانه روز که حداقل دما مشاهده می‌شود، اتفاق افتاده است. در نقطه مقابل، مقادیر حداکثری ارتفاع از شروع زمان داده‌برداری تا پایان آن با افزایش روبرو بوده است، طوری که از حدود ۱۰۰۰ متر در هفته اول بعد از تعطیلات به بیش از ۳۵۰۰ متر در آخرین هفته رسیده است. این افزایش به علت افزایش نسبی دمای هوا از ابتدای بهار

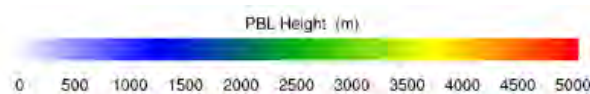
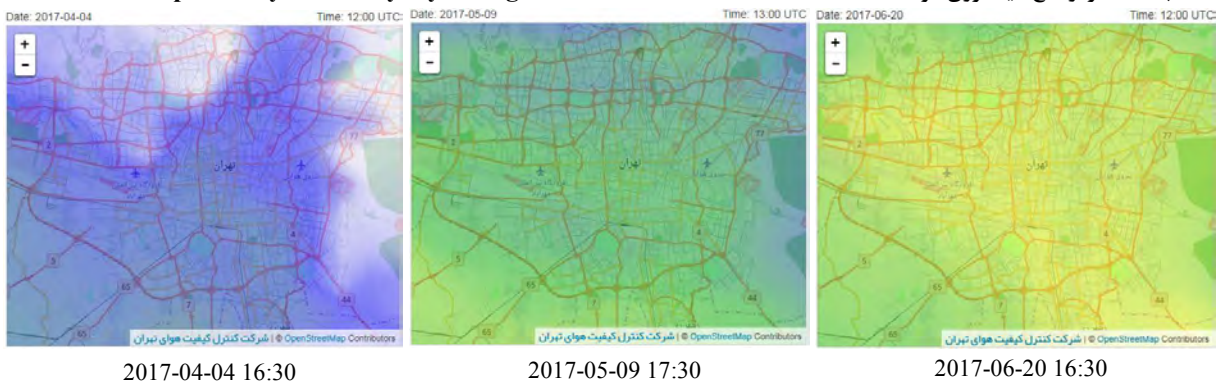
Minimum planetary boundary layer height

الف) حداقل ارتفاع لایه مرزی هوا



Maximum planetary boundary layer height

ب) حداکثر ارتفاع لایه مرزی هوا

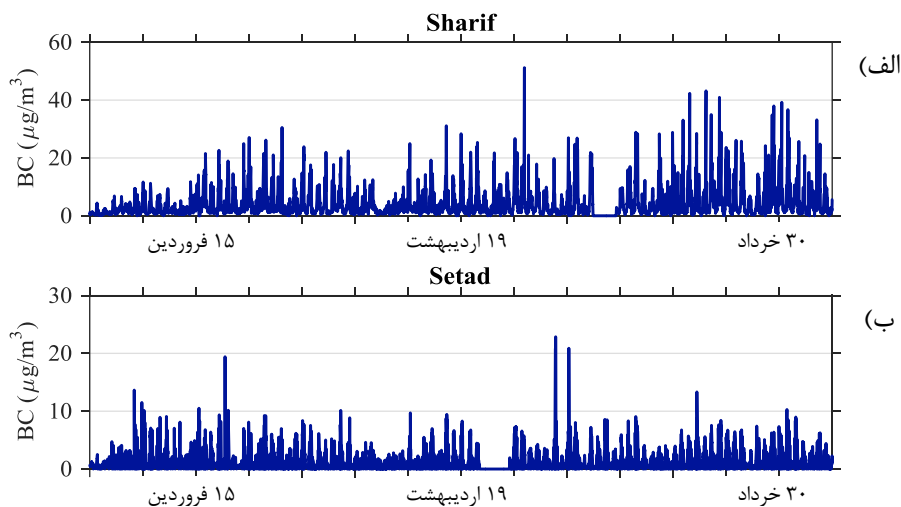


شکل ۱۰-۱) نتایج مدل ارتفاع لایه مرزی هوا در سه روز. الف) حداقل ارتفاع لایه مرزی هوا

تا تابستان بوده است و مطابق انتظار بیشترین ارتفاع لایه مرزی هوا در ساعات بعد از ظهر که دما بیشینه است رخ داده است.

۳-۳- روند تغییرات و نتایج اندازه‌گیری کربن سیاه

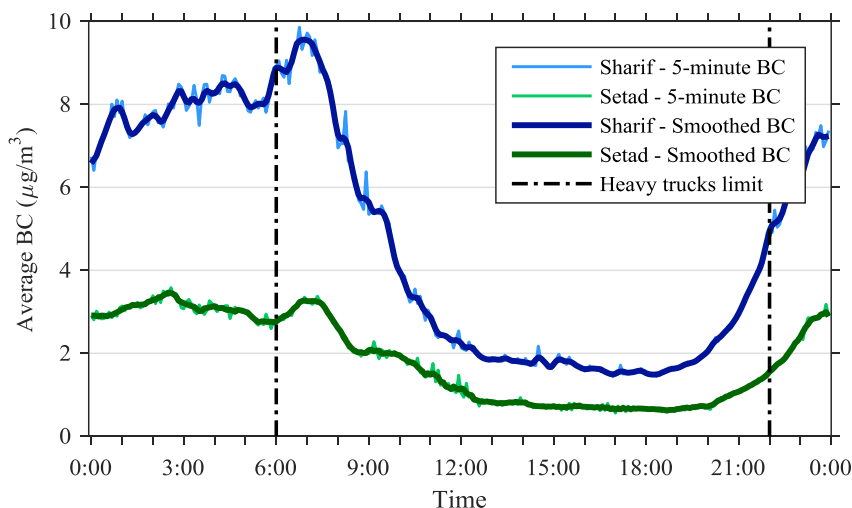
تمامی غلظت‌های کربن سیاه در دو ایستگاه اندازه‌گیری در طول ۱۴ هفته در نمودارهای شکل ۱۱ رسم شده است. از تمامی ۲۸۲۲۴ مقدار قابل اندازه‌گیری در طول این مدت در بازه‌های ۵ دقیقه‌ای، ۲۷۲۲۵ داده در ایستگاه دانشگاه شریف و ۲۵۴۶۹ داده در ایستگاه ستاد بحران ثبت شدند. عدم ثبت داده در برخی لحظات به علت خطا در سیستم انتقال اطلاعات، خطای دستگاه، تعمیرات دوره‌ای و ... بوده است. با این حال در دو ایستگاه، به ترتیب ۹۶/۵ و ۹۰/۲ درصد داده معتبر و صحیح ثبت گردیده است.



شکل ۱۱- داده‌های غلظت کربن سیاه در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

در ابتدا از تمام بازه‌های ۵ دقیقه‌ای در ۵ روز کاری موجود در ۱۲ هفته اصلی این مطالعه، جمعاً ۶۰ روز کاری، میانگین گرفته شده است. نتایج نشان داده شده در شکل ۱۲ شامل اطلاعات دو ایستگاه و مرز بازه‌های مجاز تردد خودروهای سنگین در سطح شهر می‌باشد. در طول یک شبانه روز از روزهای کاری، روند یکسانی در هر دو ایستگاه مشاهده می‌گردد، با غروب آفتاب و شروع حضور خودروهای سنگین در شهر، مقدار غلظت کربن

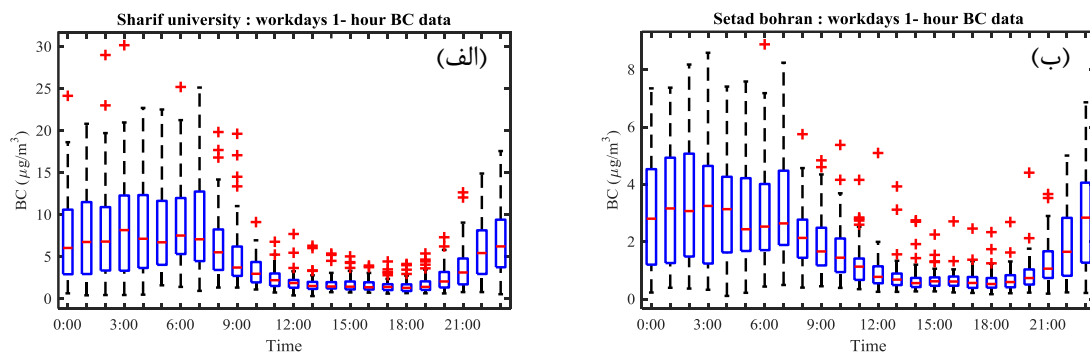
سیاه به شدت شروع به افزایش می‌کند. در ادامه شب نیز با توجه به شدت گرفتن حضور کامیون‌های سنگین و کاهش ارتفاع لایه مرزی هوا که موجب تجمع آلاینده‌ها در ارتفاع نزدیک‌تری به سطح زمین است، مقدار غلظت افزایش یافته و بالا می‌ماند. بعد از طلوع آفتاب و خارج شدن کامیون‌های سنگین از شهر و همچنین کاهش شدید انتشار آلاینده کربن سیاه، غلظت این آلاینده به سرعت شروع به کاهش کرده و به مقدار حداقلی می‌رسد که در طول روز تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این مقدار ناشی از فعالیت‌های روزانه نظیر اتوبوس‌های شهری، کامیون‌های سبک و دیگر منابع انتشار این آلاینده می‌باشد. نکته قابل توجه با نگاه به بازه ۱۰ شب تا ۶ صبح، مجاز برای تردد کامیون‌های سنگین در روزهای کاری در شکل ۱۲ این است که شروع افزایش و کاهش به ترتیب کمی قبل و بعد از ساعت مجاز اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد که کامیون‌های سنگین بعضاً بدون توجه به ساعت مجاز، زودتر اقدام به تردد در سطح شهر کرده و تعدادی نیز کمی دیرتر به کار خود خاتمه می‌دهد. از این جهت با توجه به روند کاملاً متفاوت آلاینده کربن سیاه در بازه حضور و عدم حضور کامیون‌های سنگین دو بازه را بدین صورت تعریف می‌کنیم: از ۷ صبح تا ۷ بعد از ظهر به عنوان "زمان روز" و از ۷ بعد از ظهر تا ۷ صبح بعد به عنوان "زمان شب" در این گزارش نامیده خواهد شد.



شکل ۱۲- مقایسه‌ی غلظت کربن سیاه میانگین روزهای کاری دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران

مقایسه غلظت آلاینده کربن سیاه در دو ایستگاه مذکور، در شکل ۱۲، از بالاتر بودن غلظت آلاینده کربن سیاه در ایستگاه دانشگاه شریف نسبت به ستاد بحران خبر می‌دهد. میانگین این غلظت در زمان روز در ایستگاه شریف $3.23 \mu\text{g m}^{-3}$ و در ایستگاه ستاد بحران $1.30 \mu\text{g m}^{-3}$ بوده است. این مقادیر برای زمان شب این دو ایستگاه به ترتیب $6.37 \mu\text{g m}^{-3}$ و $2.42 \mu\text{g m}^{-3}$ ثبت شده است. اختلاف شدید در میزان غلظت‌ها در زمان شب و روز تایید کننده اثر کمتر ناوگان روز بر روی تولید آلاینده کربن سیاه نسبت به ناوگان شب شهر تهران است.

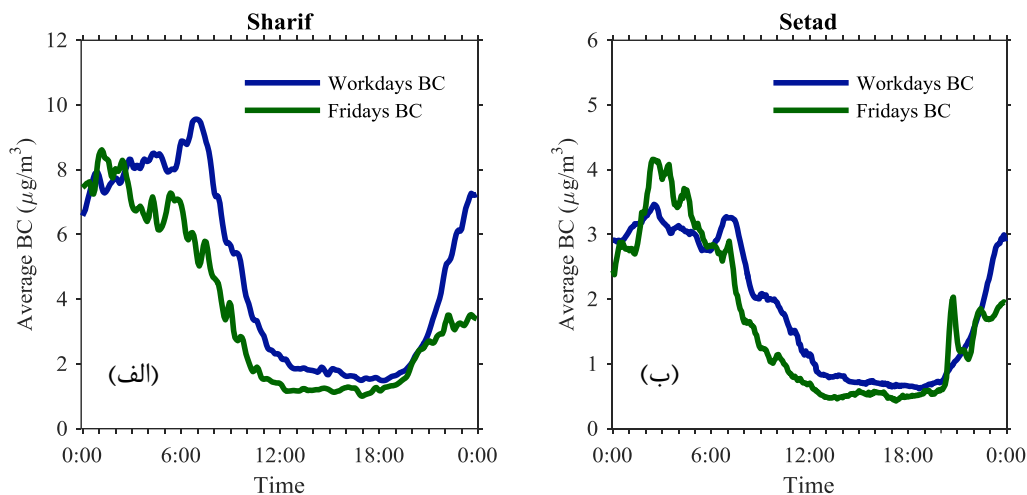
نمودارهای جعبه‌ای غلظت کربن سیاه در روزهای کاری نیز برای مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت آلاینده کربن سیاه در این دو ایستگاه در شکل ۱۳ آمده است. با استفاده از این نمودارها می‌توان به تفاوت مقیاس غلظت این آلاینده در هوای مجاور دو ایستگاه، ناشی از تفاوت در نوع بافت شهری و فعالیت‌های اطراف آن‌ها پی برد. در ایستگاه دانشگاه شریف غلظت‌هایی در حدود $30 \mu\text{g m}^{-3}$ نیز ثبت شده است در حالی که در ایستگاه ستاد بحران غلظت کربن سیاه در مواقع بسیار محدودی از $10 \mu\text{g m}^{-3}$ فراتر رفته است.



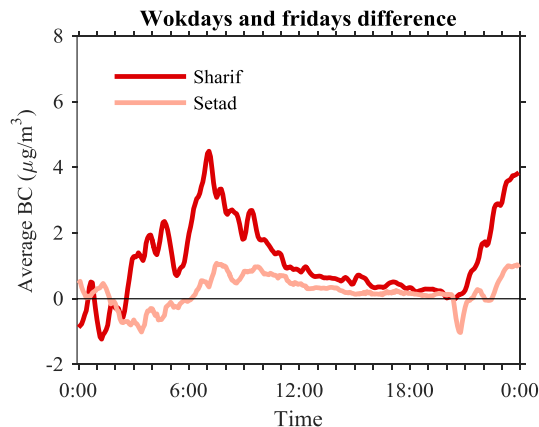
شکل ۱۳- نمودار جعبه‌ای داده‌های غلظت کربن سیاه روزهای کاری در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

در ۱۲ هفته مورد بررسی برای جمعه‌ها نیز میانگین غلظت کربن سیاه محاسبه گردیده است. شکل ۱۴ غلظت آلاینده کربن سیاه را در دو ایستگاه را با میانگین آن در روزهای کاری مقایسه می‌کند. در روزهای جمعه عموماً تفاوتی در فعالیت‌های ساختمانی و کامیون‌های سنگین در سطح شهر تهران مشاهده نمی‌شود، در

صورتی که در زمان روز تردد خودروها، اتوبوس‌ها و کامیون‌های سبک تفاوت چشمگیری با روزهای کاری دارد. این مطلب در شکل ۱۴ به خوبی قابل مشاهده است. تفاوت در مقدار غلظت آلاینده بین روزهای جمعه و روزهای کاری در نمودار شکل ۱۵ رسم شده است. این اختلاف که در زمان روز در هر دو ایستگاه عددی مثبت است، میزان تاثیر حضور پرتعداد ناوگان سبک و اتوبوس‌ها را نسبت به تعداد کم آن‌ها در روزهای جمعه مشخص می‌کند. میانگین این افزایش $1.23 \mu g m^{-3}$ در ایستگاه دانشگاه شریف و $0.43 \mu g m^{-3}$ در ایستگاه ستاد بحران محاسبه گردیده است که در مقایسه با قله‌های شبانه بسیار ناچیزند و بر اثر کم حضور ناوگان روزانه بر غلظت آلاینده کربن سیاه تاکید دارند.

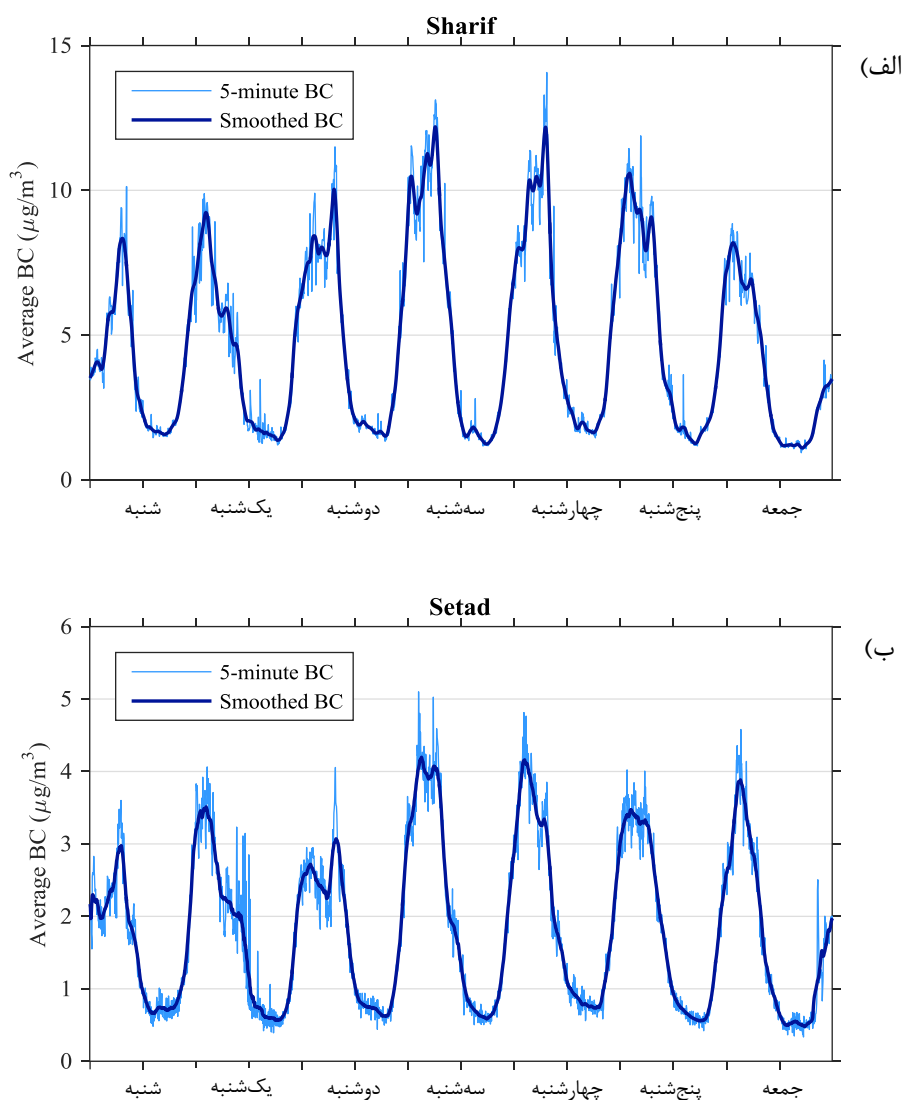


شکل ۱۴- مقایسه‌ی غلظت کربن سیاه روزهای کاری و جمعه‌ها در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران



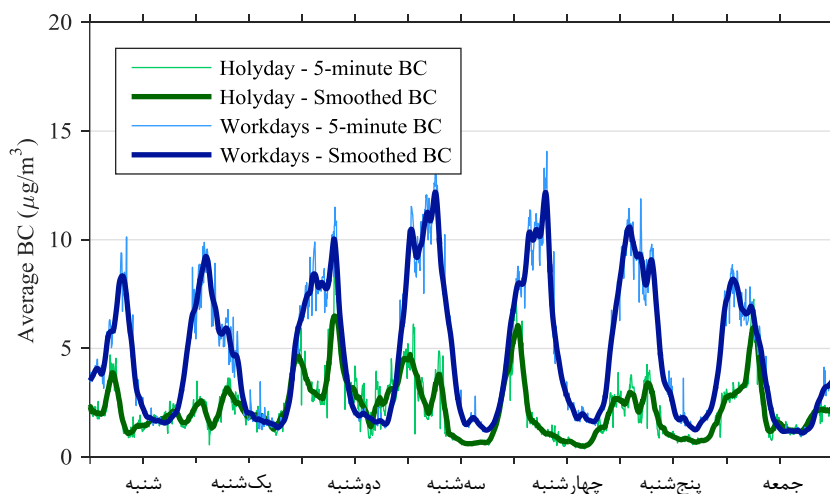
شکل ۱۵- تفاوت غلظت کربن سیاه میانگین روزهای کاری و جمعه‌ها

تغییرات هفتگی غلظت کربن سیاه در دو ایستگاه اندازه‌گیری دانشگاه شریف و ستاد بحران نیز در شکل ۱۶ رسم شده است. همانطور که در این نمودار قابل مشاهده است، قله‌های شبانه در تمامی روزهای هفته بوجود آمده است. در ضمن مشاهده می‌شود که در روزهای میانی هفته فعالیت‌های شهری اوج گرفته و قله‌ها مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند.



شکل ۱۶- میانگین هفتگی داده‌های غلظت کربن سیاه در ایستگاه الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

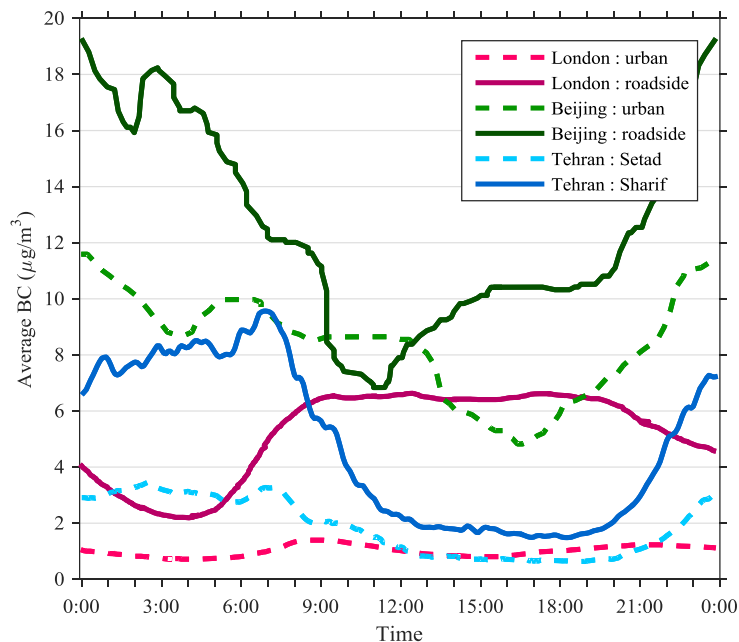
به منظور دریافت اطلاعات بیشتر در رابطه با حضور ناوگان سبک از ۲ هفته ابتدایی سال مصادف با تعطیلات سال نو، کمک گرفته شده است. برای بازه‌های ۵ دقیقه‌ای در تمام طول این دو هفته (۲ سری داده) و ۱۲ هفته‌ی کاری بعدی (۱۲ سری داده) میانگین غلظت کربن سیاه در ایستگاه دانشگاه شریف محاسبه و نتیجه در شکل ۱۷ رسم شده است. همان طور که در شکل مشخص است، در تقریباً تمامی لحظات، شدت آلودگی کربن سیاه در تعطیلات نوروز کمتر از روزهای معمولی بوده است. همچنین اختلاف شدید در قله‌های شبانه تمامی روزهای هفته نشان دهنده کاهش در میزان فعالیت‌های کامیون‌های سنگین در ایام نوروز است که می‌تواند ناشی از کاهش فعالیت بخش ساخت و ساز و فعالیت‌های عمرانی در این بازه باشد. همچنین احتمالاً سایر بخش‌های استفاده کننده از ناوگان دیزلی در شهر تهران، از جمله ناوگان‌های سوخت رسانی، حمل بار، توزیع و پخش مواد غذایی و ... نیز در این ایام با کاهش فعالیت مواجه بوده‌اند.



شکل ۱۷- مقایسه‌ی میانگین هفتگی داده‌های کربن سیاه بین ۲ هفته‌ی تعطیل نوروزی و ۱۲ هفته‌ی کاری

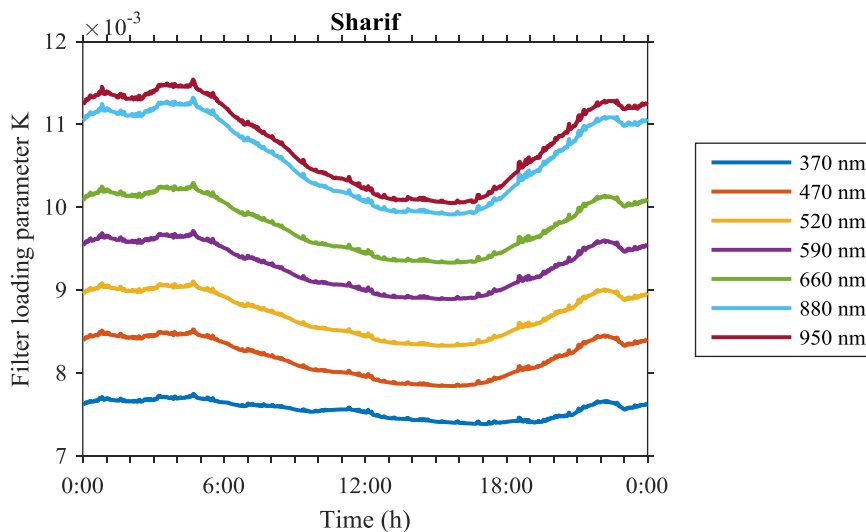
مشابه این تحقیق در شهرهای لندن و پکن نیز در گذشته انجام شده است. در هر دوی این شهرها یک ایستگاه شهری و یک ایستگاه ترافیکی داده‌برداری شده‌اند. میانگین غلظت کربن سیاه در روزهای کاری دو

ایستگاه اندازه‌گیری شهر تهران با شهرهای لندن و پکن در شکل ۱۸ مقایسه شده است. الگوی تردد کامیون‌های سنگین در پکن مشابه تهران به صورت شبانه ولی از ساعت ۱۱ شب تا ۶ صبح بوده اما در شهر لندن این الگو برعکس است، کامیون‌های سنگین در لندن فقط در طول روز و از ساعت ۷ صبح تا ۹ شب اجازه‌ی ورود به شهر را دارند. بر همین اساس در شکل ۱۸ روند کلی تغییرات غلظت در تهران و پکن مشابه ولی در ایستگاه‌های لندن روند بر عکس تهران است. طی مدت داده‌برداری در سال ۲۰۱۵ در شهر لندن غلظت کربن سیاه به طور میانگین $1.0 \mu g m^{-3}$ در ایستگاه شهری و $5.1 \mu g m^{-3}$ در ایستگاه ترافیکی بوده است. این اعداد در پکن و در طول بازه‌ی تابستان سال ۲۰۰۹ به ترتیب $8.1 \mu g m^{-3}$ و $12.3 \mu g m^{-3}$ محاسبه شده بودند. ایستگاه ستاد بحران تهران به عنوان ایستگاهی در ناحیه مرکزی شهر با میانگین روزانه‌ی $1.86 \mu g m^{-3}$ از نظر غلظت کربن سیاه به مراتب پایین‌تر از ایستگاه شهری پکن، ولی بالاتر از ایستگاه شهری لندن قرار می‌گیرد. در ایستگاه ترافیکی دانشگاه شریف غلظت میانگین این آلاینده $4.80 \mu g m^{-3}$ است که از غلظت‌های میانگین در ایستگاه‌های ترافیکی لندن و پکن کمتر است.



شکل ۱۸- مقایسه‌ی میانگین روزهای کاری داده‌های غلظت کربن سیاه در ایستگاه‌های دانشگاه شریف و ستاد بحران شهر تهران با شهرهای لندن و پکن

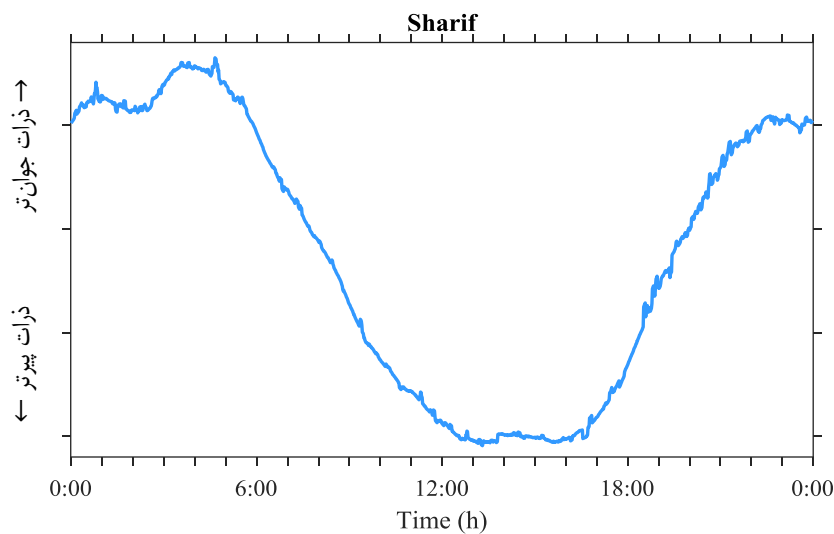
همان طور که در بخش تجهیزات اندازه‌گیری اشاره شد، در دستگاه اندازه‌گیری کربن سیاه، آهنگ تضعیف پرتوی نوری که به فیلتر تابیده می‌شود، با عبور هوا از فیلتر و نشست ذرات کربن سیاه بر روی آن، مبنای محاسبه غلظت قرار می‌گیرد. نکته قابل توجه این است که پس از گذشت زمان از حضور ذرات کربن سیاه در هوا، آلاینده‌های دیگر به شکل یک پوشش دور این ذرات را احاطه می‌کنند و باعث می‌شوند ذرات کربن سیاه بر حسب عمر آن‌ها در جذب طول موج‌های مختلف نور، رفتار متفاوتی داشته باشند [۱۸]. بر همین اساس ضریب اصلاحی k در هر طول موج دستگاه تعریف و با روابطی که در مرجع آن [۲۷] آمده است، محاسبه می‌شود. به ازای γ طول موج اندازه‌گیری، هر چه این ضرایب به هم نزدیک‌تر باشند، کربن سیاه اندازه‌گیری شده دارای پوشش کمتری بوده و ذره‌ای "جوان"^{۱۲} خواهد بود. به عبارتی دیگر، این ذره با فاصله کمی از تولید به دستگاه اندازه‌گیری رسیده و روی فیلتر حبس شده‌است، یا به بیان دیگر، فرصت کافی برای ذره جهت ترکیب با سایر ترکیبان موجود در هوا وجود نداشته است. به شکل برعکس، فاصله گرفتن ضرایب k از هم بیانگر حضور ذرات با عمر بیشتر است.



شکل ۱۹- میانگین روزانه‌ی ضرایب k به ازای طول موج‌های مختلف اندازه‌گیری در ایستگاه دانشگاه شریف

^{۱۲} Fresh

شکل ۲۰ میانگین روزانه این ضرایب به ازای ۷ طول موج مختلف را برای ایستگاه دانشگاه شریف نشان می‌دهد. شیب خط عبوری از نمودار نقاط k بر حسب ۷ طول موج اندازه‌گیری شده در هر لحظه می‌تواند نماینده میزان فاصله این ضرایب و بیانگر عمر ذرات باشد، به گونه‌ای که هر چه این شیب بیشتر باشد، ذرات جمع شده بر روی فیلتر جوان‌تر خواهند بود. بر این اساس، نمودار میانگین روزانه این شیب در شکل ۲۰ ترسیم شده است. این نمودار تایید کننده نقش ناوگان شبانه در تولید و انتشار ذرات کربن سیاه می‌باشد. چراکه 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 و این موضوع نشان می‌دهد که منشأ تولید آن‌ها کامیون‌های سنگینی بوده است که در شب قبل تردد داشتند.

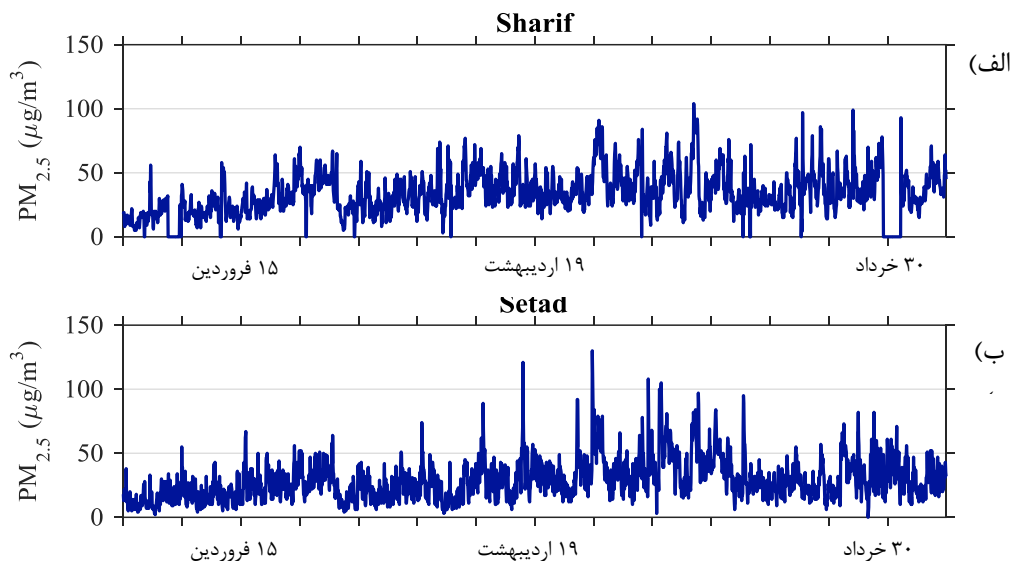


شکل ۲۰ - میانگین روزانه عمر ذرات کربن سیاه اندازه‌گیری شده در ایستگاه دانشگاه شریف

۴-۳- روند تغییرات و نتایج اندازه‌گیری $PM_{2.5}$

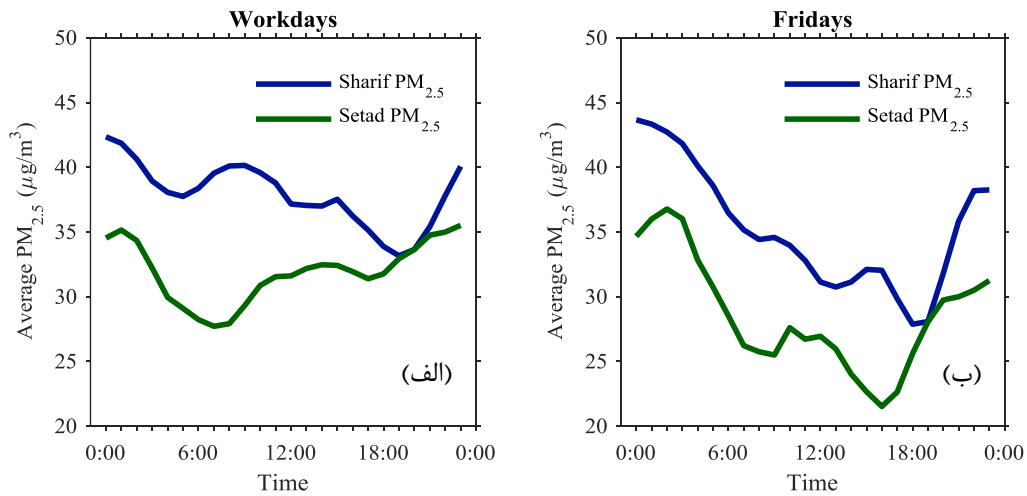
همان‌طور که در معرفی کربن سیاه گفته شد، این آلاینده در زیرمجموعه ذرات معلق با قطر کوچکتر از $2.5/5$ میکرون جای می‌گیرد. بنابراین بررسی میزان و روند تغییرات غلظت $PM_{2.5}$ در هوا برای اطلاع دقیق‌تر از منشأ ذرات کربن سیاه، مفید به نظر می‌رسد. مطابق توضیحات قبلی، اندازه‌گیری آلاینده ذرات معلق با قطر کوچکتر

از ۲/۵ میکرون هر ساعت یکبار در هر دو ایستگاه انجام گرفته است. از بین ۲۳۵۲ داده ساعتی قابل ثبت در مدت ۱۴ هفته، ۲۲۵۱ داده در ایستگاه دانشگاه شریف و ۲۳۵۱ نقطه در ایستگاه ستاد بحران به ثبت رسیده که نشاندهنده ثبت ۹۵/۷٪ و ۹۹/۹٪ داده‌های ممکن می‌باشد. در شکل ۲۱ میزان غلظت $PM_{2.5}$ در بازه ۱۴ هفته مورد مطالعه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۱- داده‌های غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

به روشی مشابه با آلاینده کربن سیاه، میزان متوسط غلظت آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون نیز برای روزهای کاری و جمع‌ها محاسبه شده است. شکل ۲۲، الف) غلظت این آلاینده را در روزهای کاری برای این دو ایستگاه با هم مقایسه می‌کند. همان طور که در این شکل مشخص است، در تمامی ساعات شبانه روز، میزان غلظت آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون 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 $37.91 \mu g m^{-3}$ و در ایستگاه ستاد بحران $31.97 \mu g m^{-3}$ برای روزهای کاری اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲۲- مقایسه‌ی میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت $PM_{2.5}$ دو ایستگاه در الف) روزهای کاری ب) جمعه‌ها

همانطور که از روند تغییرات غلظت $PM_{2.5}$ در شکل ۲۲، الف) قابل مشاهده است، در هر دو ایستگاه دو مقدار بیشینه، یکی برای ساعات شبانه و دیگری برای ساعات روزانه مشاهده می‌شود. مقادیر بیشینه شبانه به ترتیب در ایستگاه‌های دانشگاه شریف و ستاد بحران $43.15 \mu g m^{-3}$ و $36.17 \mu g m^{-3}$ ثبت گردیده و مقدار متناظر روزانه این دو ایستگاه به ترتیب مقادیر $40.92 \mu g m^{-3}$ و $33.08 \mu g m^{-3}$ می‌باشد. بالاتر بودن میزان بیشینه‌های شبانه ناشی از تاثیر بیشتر ناوگان شب و کاهش ارتفاع لایه مرزی هوا است. نگاه دقیق‌تر به این روند نتایج زیر را به دست می‌دهد:

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 ناحیه غربی و مسکونی غرب (محل ایستگاه دانشگاه شریف) و همچنین حومه شهر و شهر کرج حرکت خود را آغاز کرده و بعد از مدتی پیمایش مسیر، به سمت نواحی مرکزی و اداری (محل ایستگاه ستاد بحران) سرازیر می‌شوند. ۲ ساعت تاخیر زمانی برای ثبت آغاز افزایش غلظت $PM_{2.5}$ ناشی از ترافیک روزانه به خوبی این جابجایی از غرب به مرکز را نشان می‌دهد. در شروع بیشینه شبانه نیز همین موضوع مشاهده می‌گردد. در ایستگاه



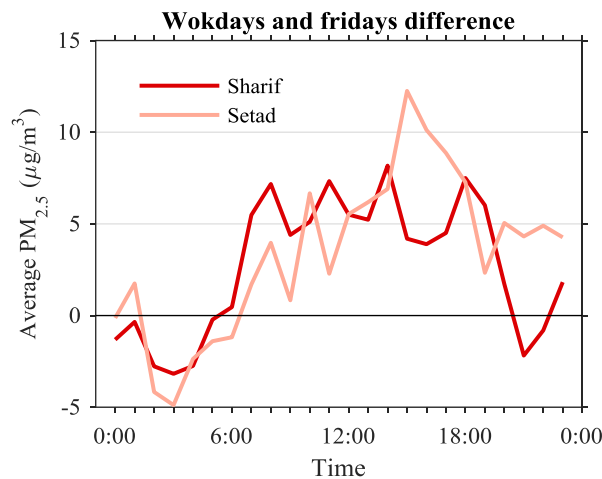
ستاد بحران شروع افزایش ساعت ۵ عصر و در ایستگاه دانشگاه شریف شروع افزایش ساعت ۷ عصر بوده است که نشان از این است که ترافیک از نواحی مرکزی و اداری در پایان ساعت کاری به سمت نواحی مسکونی غربی، معکوس اتفاقی که در بیشینه روزانه افتاد، در حرکت است.

۲. بیشتر بودن میزان غلظت $PM_{2.5}$ زمان روز ایستگاه دانشگاه شریف بیشتر بودن فعالیت‌های ترافیکی اطراف آن را نشان می‌دهد. در ضمن وجود شهرهای کوچک متعدد در غرب تهران و کلانشهر کرج که سکونتگاه تعداد زیادی از شاغلین در تهران است و جریان دائمی ترافیک خودروها از این شهرها به داخل تهران و بلعکس، از سمت غرب، به بالا بودن غلظت این آلاینده در ایستگاه دانشگاه شریف نسبت به ایستگاه ستاد بحران کمک می‌کند.

۳. در زمان شب نیز حداکثر مقدار در ایستگاه دانشگاه شریف از ایستگاه ستاد بحران عدد بزرگ‌تری می‌باشد. این مورد نیز می‌تواند به علت فعالیت‌های ساختمانی بیشتر به علت نوسازی و توسعه بافت شهری در منطق مسکونی و همچنین تردد بیشتر کامیون‌های ترانزیتی از سمت غرب تهران باشد.

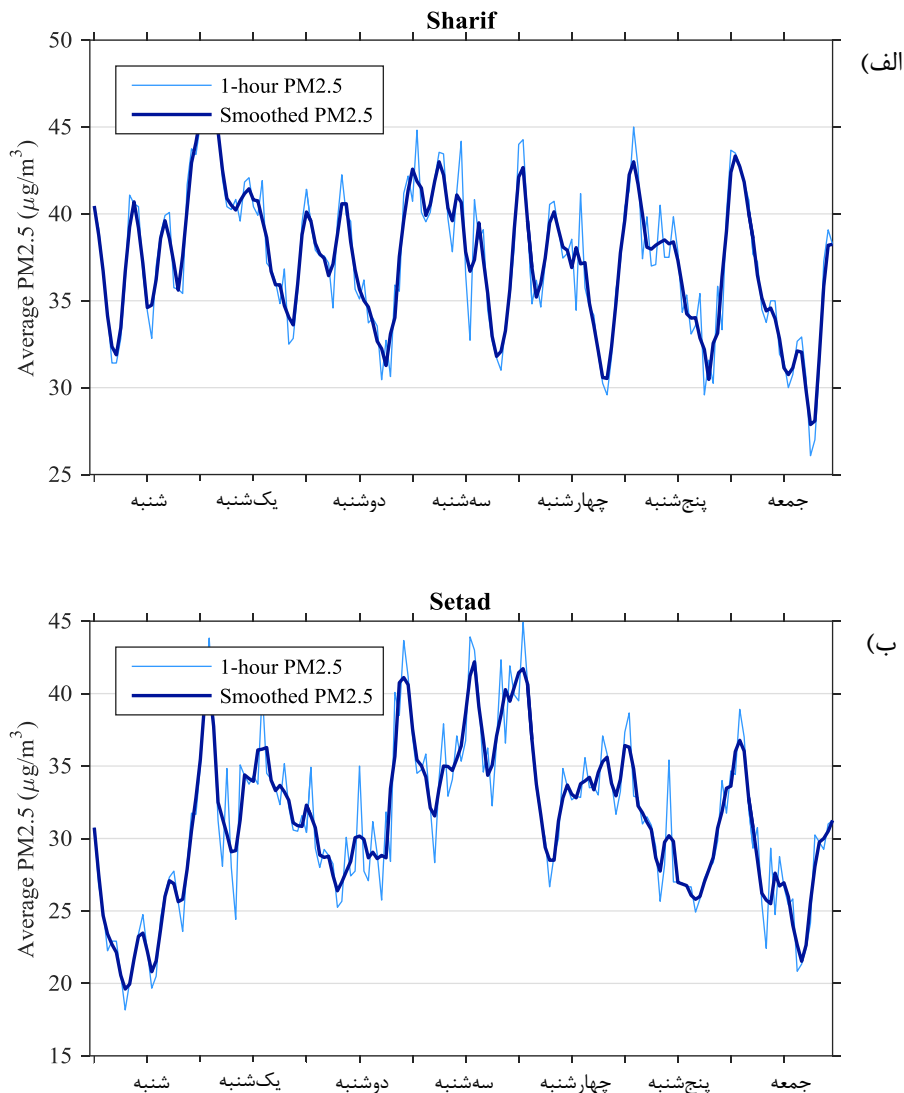
در شکل ۲۲، (ب) نمودار مشابه برای میانگین روزهای جمعه آمده است. مقادیر بیشینه شبانه در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران به ترتیب اعداد $43.67 \mu g m^{-3}$ و $38.92 \mu g m^{-3}$ را نشان می‌دهند که با روزهای کاری تفاوت معناداری ندارد. این بدان معناست که فعالیت‌های ساختمانی و ترانزیتی مرتبط با کامیون‌های سنگین در ورزهای جمعه نیز به قوت خود باقیست. اما در طول روز بیشینه‌ها 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 روزانه 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 باقی مانده 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 ۲۳ 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 $5.76 \mu g m^{-3}$ بوده است. به عبارتی، با کاهش تعداد کلی خودروها و فعالیت‌ها به مقدار حداقلی آن در روزهای جمعه، می‌توان به اندازه مقادیر فوق به طور میانگین از غلظت $PM_{2.5}$ کاست و کیفیت هوا را بهبود بخشید. نتیجه دیگری که از این نمودار می‌توان گرفت این است که در ایستگاه ستاد بحران روند اختلاف صعودی بوده ولی در ایستگاه دیگر اینگونه نیست. این رفتار نشان می‌دهد که در روزهای کاری شدت فعالیت‌های ترافیکی اطراف این ایستگاه در زمان روز با نزدیک شدن به ساعات بعد از ظهر افزایش می‌یابد.



شکل ۲۳- تفاوت غلظت $PM_{2.5}$ میانگین روزهای کاری و جمعه‌ها

شکل ۲۴ روند تغییرات هفتگی غلظت $PM_{2.5}$ در دو ایستگاه را نشان می‌دهد. در ایستگاه دانشگاه شریف که بافت اطراف آن عمدتاً مسکونی است، در تمامی روزهای هفته بازه تغییرات این آلاینده نسبتاً مشابه و با تغییرات کم است. این در صورتیست که در ایستگاه ستاد بحران با بافت اداری اواسط هفته فعالیت‌ها اوج گرفته و قله‌های بزرگ‌تری از غلظت این آلاینده ایجاد شده است.

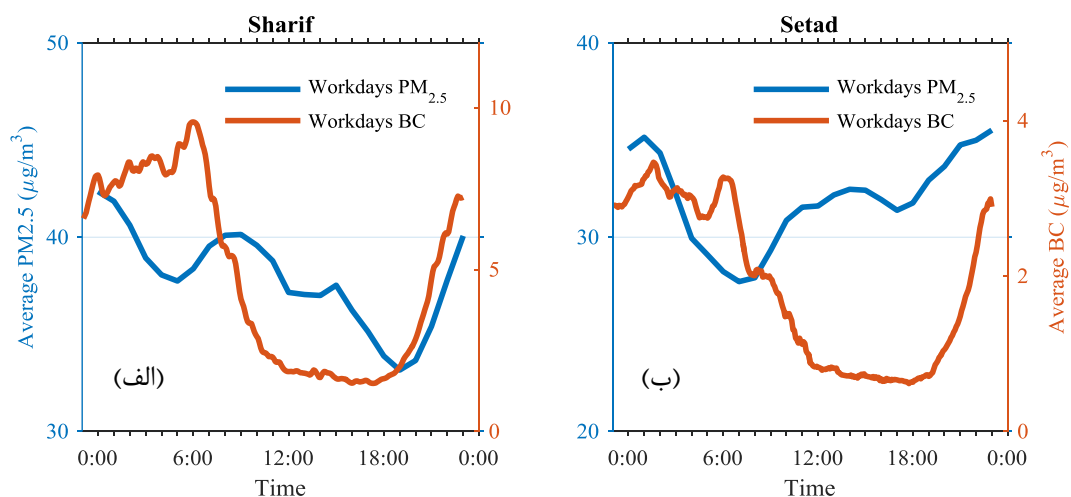


شکل ۲۴- میانگین هفتگی داده‌های غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

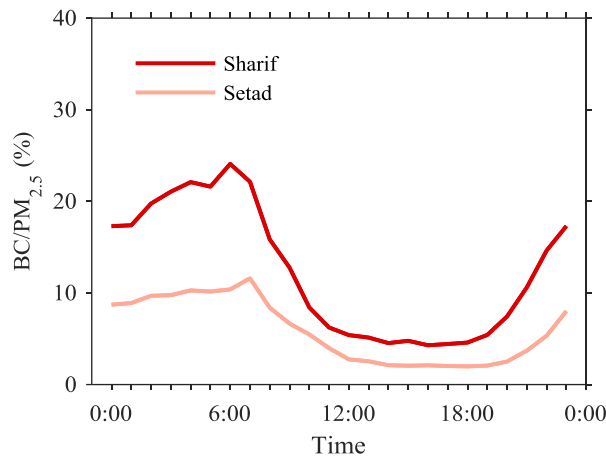
۵-۳- مقایسه نتایج اندازه‌گیری $PM_{2.5}$ و BC

شکل ۲۵ 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 BC و $PM_{2.5}$ برابر ۰/۶۹ در ایستگاه دانشگاه شریف و ۰/۸۵- 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 نزول‌یست. 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 شدت 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 پرتعداد 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 حدود ۲۴ درصد از $PM_{2.5}$ مربوط به BC است. این عدد در ایستگاه ستاد بحران در حدود ۱۲ درصد می‌باشد که نشان دهنده اهمیت منابع غیرمحلی در تولید $PM_{2.5}$ این ایستگاه است. شکل ۲۶ 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 ۶/۸ و ۱۸ درصد از جرم $PM_{2.5}$ مربوط به BC است. این مقادیر در ایستگاه ستاد بحران به ترتیب ۳/۵ و ۸/۳ درصد هستند. در زمان شب ضریب همبستگی بین BC و $PM_{2.5}$ در دو ایستگاه به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۱۷- است که نسبت به زمان روز مقدار بیشتری است.



شکل ۲۵- مقایسه‌ی میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت $PM_{2.5}$ و BC در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران



شکل ۲۶- درصد جرمی BC موجود در $PM_{2.5}$ اندازه گیری شده در دو ایستگاه

نکته دیگری که از شکل ۲۵ استنتاج می شود، مربوط به سرعت تغییرات در روند غلظت BC و $PM_{2.5}$ است. در رابطه با کربن سیاه، این تغییرات نسبت به ذرات معلق، سریع تر رخ می دهد. به عنوان مثال در ایستگاه دانشگاه شریف غلظت کربن سیاه در میانگین روزهای کاری از $9.86 \mu g m^{-3}$ در ساعت ۶ و ۴۵ دقیقه صبح با کاهش ۳/۲ برابری به میزان $3.08 \mu g m^{-3}$ در ساعت ۱۰ و ۴۵ دقیقه صبح (۴ ساعت بعد) می رسد. این نتیجه تایید 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 می کند.

۳-۶- روند تغییرات و نتایج اندازه گیری سایر آلاینده ها

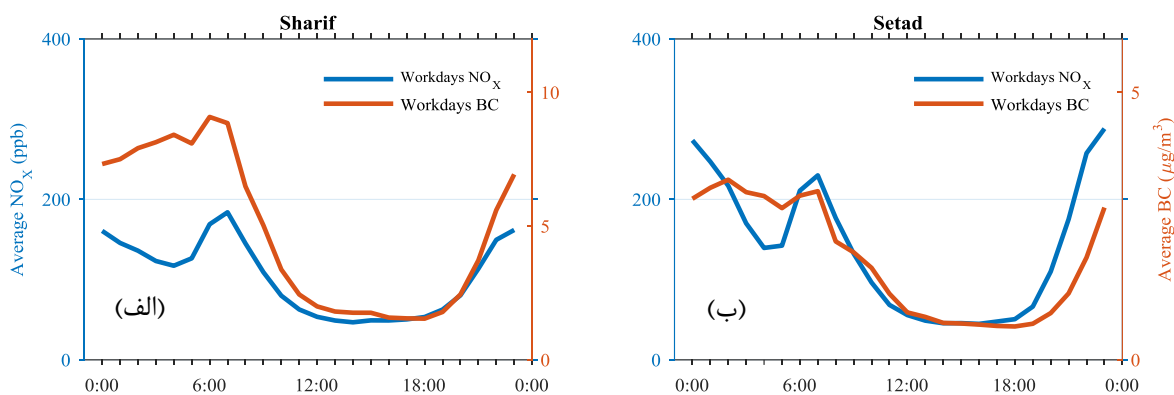
سایر آلاینده هایی که غلظت آن ها در بازه زمانی مورد مطالعه ثبت گردیده است، شامل NO_2 ، NO ، CO ، PM_{10} و SO_2 ، O_3 ، NO_x می باشند. همانند روند طی شده برای کربن سیاه و ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرون، برای این داده ها نیز میانگین روزهای کاری محاسبه گردیده است. به منظور یافتن ارتباط میان این آلاینده ها 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.

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

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

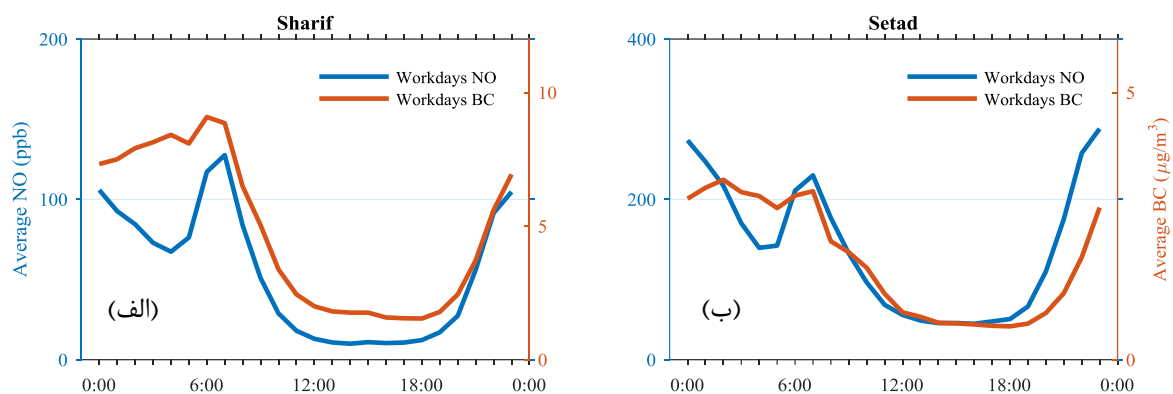
۷-۳- مقایسه‌ی نتایج اندازه‌گیری سایر آلاینده‌ها و BC

همانطور که در جدول ۱ نیز نشان داده شده است، برای آلاینده‌های NO و NO_x بیشترین ارتباط معنی‌دار با غلظت کربن سیاه مشاهده می‌گردد. در زمان روز، ضریب همبستگی میان NO_x و BC به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۸ در ایستگاه‌های دانشگاه شریف و ستاد بحران می‌باشد. شکل ۲۷ تغییرات غلظت این دو آلاینده را به هم مقایسه می‌کند.



شکل ۲۷- مقایسه میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت BC و NO_x در ایستگاه‌های (الف) دانشگاه شریف (ب) ستاد بحران

همچنین این ضرایب برای NO و BC، که تغییرات غلظت‌های آن‌ها در شکل ۲۸ با هم مقایسه شده‌اند، 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_x 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 دیگر، سهم ناوگان شبانه از انتشار این دو گاز نسبتاً زیاد است.

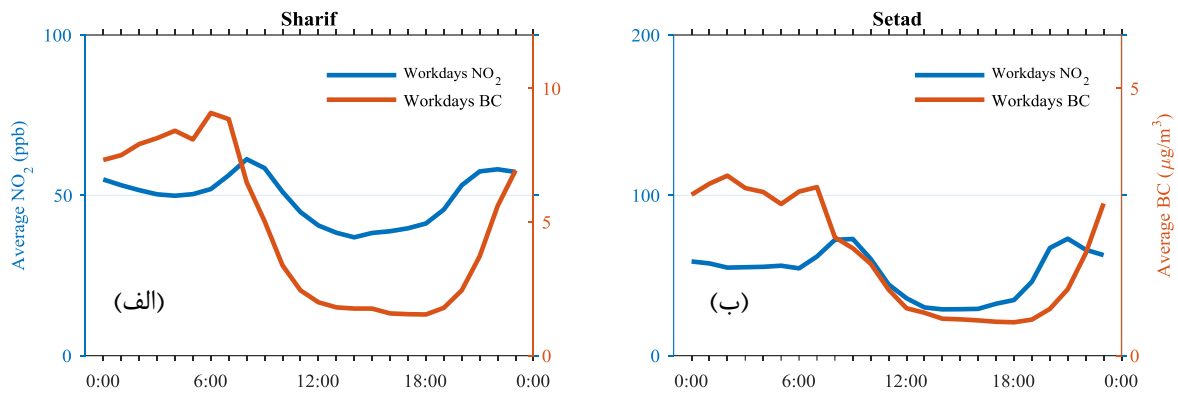


شکل ۲۸- مقایسه میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت NO و BC در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

برای گاز NO₂ در زمان روز ضریب همبستگی با BC معادل ۰/۸۸ در ایستگاه دانشگاه شریف و ۰/۸۷ در ایستگاه ستاد بحران است. لازم به ذکر است که یکی از عواملی که بر غلظت آلاینده NO₂ 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 و همین امر باعث گردیده مطابق شکل ۲۹ روند تغییرات این آلاینده در مقایسه با کربن سیاه کمی تفاوت داشته باشد.

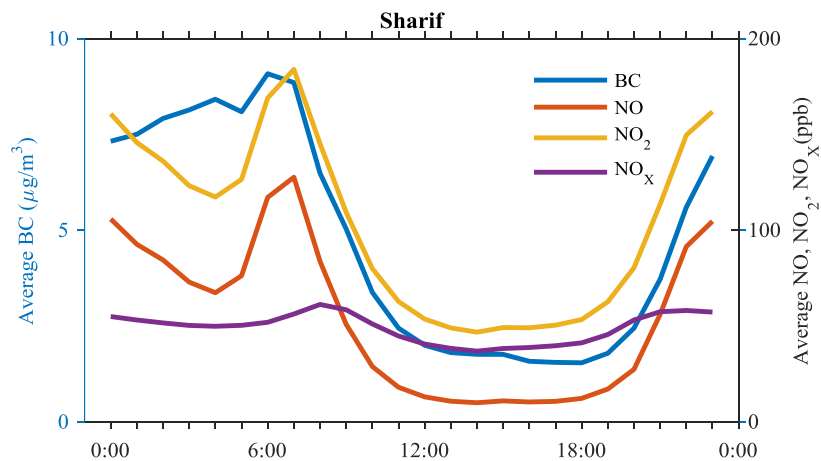
در زمان شب، ضریب همبستگی بین NO و BC به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۶۲ و همچنین بین NO_x و BC برابر با ۰/۷۶ و ۰/۵۷ در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران است. اما بین NO₂ و BC در این زمان ضریب همبستگی ۰/۰۲ و ۰/۰۳- در دو ایستگاه نام‌برده شده به ترتیب برقرار است که نشان می‌دهد تولید NO₂ ناوگان

شب و احتراق دیزل همان‌طور که انتظار می‌رفت نسبت به NO و NO_x قابل توجه نیست و باعث گردیده ارتباط کمی بین غلظت NO_2 و BC دیده شود.

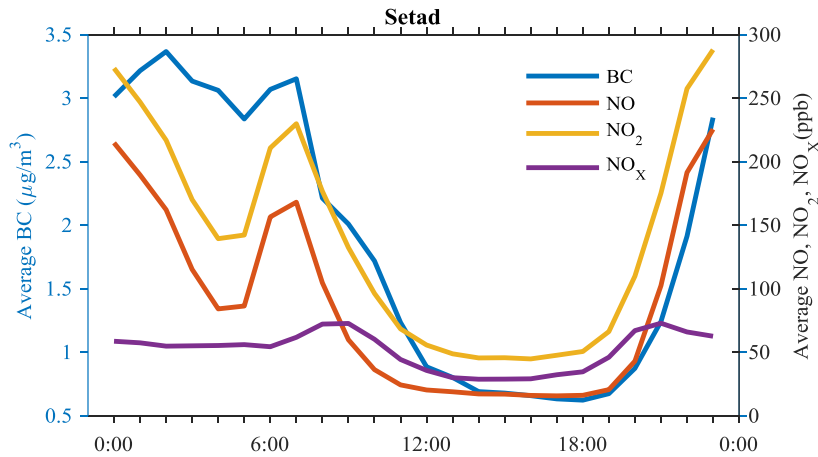


شکل ۲۹- مقایسه میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت NO_2 و BC در ایستگاه‌های الف) دانشگاه شریف ب) ستاد بحران

در شکل ۳۰ و شکل ۳۱ تغییرات غلظت آلاینده‌های ذکر شده به صورت جداگانه در دو ایستگاه دانشگاه شریف و ستاد بحران مورد مقایسه با هم قرار گرفته‌اند.



شکل ۳۰- مقایسه میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت BC ، NO ، NO_2 و NO_x در ایستگاه دانشگاه شریف



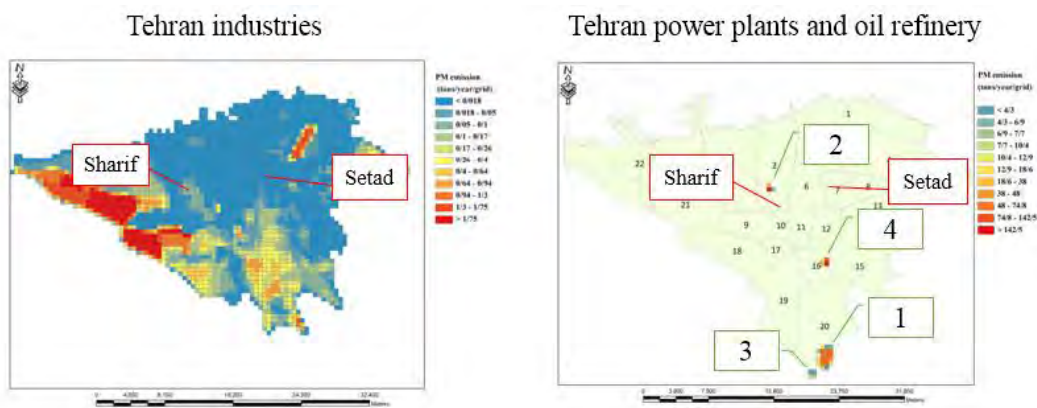
شکل ۳۱- مقایسه میانگین روزانه‌ی داده‌های غلظت BC ، NO ، NO_2 و NO_x در ایستگاه ستاد بحران

۸-۳- بررسی سهم فعالیت‌های صنعتی در غلظت آلاینده کربن سیاه

فعالیت‌های صنعتی از دیگر منابع انتشار کربن سیاه به شمار می‌روند. بدین منظور اطلاعات مربوط به میزان انتشار صنایع در کنار جهت وزش باد با غلظت کربن سیاه اندازه‌گیری شده مقایسه شده تا درباره اثر این منابع روی غلظت کربن سیاه هوا در طول مدت این اندازه‌گیری اظهار نظر شود. بدین منظور، ابتدا موقعیت مکانی منابع مهم ساکن و میزان تخمینی انتشار کربن سیاه هر یک ارائه گردیده، سپس با در دست بودن جهت منبع انتشار غالب نسبت به ایستگاه دانشگاه شریف و جهت باد، میزان تاثیر آن منابع مشاهده خواهد شد.

با مراجعه به سیاهه انتشار آلاینده‌گی شهر تهران [۲۸] می‌توان فعالیت‌های صنعتی موثر بر آلودگی در شهر تهران را به سه بخش صنایع، نیروگاه‌ها (ری، طرشت و بعثت) و پالایشگاه تهران تقسیم نمود. بر طبق همین گزارش، میزان انتشار ذرات معلق مجموعه صنایع برابر با ۶۱۲ تن در سال و پالایشگاه تهران ۸۶۰ تن در سال است. در رابطه با سه نیروگاه نام برده شده این نکته حائز اهمیت است که در بازه اندازه‌گیری این تحقیق، فصل اوج مصرف گاز به پایان رسیده و سوخت نیروگاه‌ها تماماً گاز طبیعی بوده است. مطابق با سیاهه انتشار، نیروگاه طرشت در تمام طول سال تنها ۱۰۳ میلیون متر مکعب گاز طبیعی مصرف کرده و سوخت دیگری در آن سوزانده نشده است. با این حال میزان انتشار ذرات معلق آن نیروگاه ۲۵ تن در سال بوده است. به منظور

تخمین انتشار سایر نیروگاه‌ها، تنها میزان سوخت گاز طبیعی آن دو در نظر گرفته شده و به نسبت میزان انتشار نیروگاه طرشت به میزان مصرفی آن، برای نیروگاه‌های ری و بعثت به ترتیب حدود ۱۰۰ و ۵۰ تن در سال میزان انتشار ذرات معلق تخمین زده شده است. شکل ۳۲ موقعیت و توزیع صنایع، نیروگاه‌ها و پالایشگاه تهران را بر حسب میزان ذرات معلق تولیدی آن‌ها و همچنین موقعیت دو ایستگاه اندازه‌گیری نشان می‌دهد.



شکل ۳۲- موقعیت و توزیع منابع انتشار مهم ثابت PM شهر تهران الف) ۱- پالایشگاه تهران ۲- نیروگاه طرشت ۳- نیروگاه ری ۴- نیروگاه بعثت ب) صنایع [۲۸]

به منظور برآورد میزان انتشار آلاینده کربن سیاه، آژانس حفاظت از محیط زیست امریکا (EPA) روشی را بر مبنای نوع و میزان سوخت مصرفی یک صنعت یا نیروگاه پیشنهاد می‌کند [۲۹]. در این روش از رابطه زیر استفاده می‌گردد که ضرایب آن از جدول‌های ۲ و ۳ انتخاب می‌شوند:

$$E_{BC} = \sum_{i,l} (Q_{i,l} \times EF_{i,l,PM_{2.5}} \times SF_{i,l,BC/PM_{2.5}})$$

در این رابطه:

E_{BC} = میزان انتشار کربن سیاه صنعت یا نیروگاه

i = نوع سوخت مصرفی (جدول ۲)



I = نوع صنعت یا نیروگاه (جدول ۲)

$Q_{i,I}$ = میزان مصرفی سوخت i در صنعت I

$EF_{i,I,PM_{2.5}}$ = ضریب انتشار $PM_{2.5}$ سوخت i در صنعت I (جدول ۲)

$SF_{i,I,BC/PM_{2.5}}$ = ضریب ویژه‌ی تبدیل $PM_{2.5}$ به BC برای سوخت i در صنعت I (جدول ۳)

جدول ۲- ضرایب $EF_{i,I,PM_{2.5}}$ [۲۹]

Tier 1 Emission Factors (EF)						
Fuels	Emission Source	Factor	Pollutant	Units	Reference	WebFIRE Factor ID #
Anthracite Coal	Electric Generation	(2.500E0)+(8E-2*A)	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	45
Bituminous/ Subbituminous Coal	Electric Generation	5.64	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	502
Distillate Oil	Electric Generation	1.55	PM _{2.5}	LB/1000 gallons	WebFIRE (EPA 2015b)	2256
Kerosene/Naphtha (Jet Fuel)	Electric Generation	0.01107	PM _{2.5}	LB/million BTUs	WebFIRE (EPA 2015b)	11510
Lignite Coal	Electric Generation	0.79*[6.6E-1 * (A)]	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	1584
Liquified Petroleum Gas (LPG)	Electric Generation	0.848	PM _{2.5}	LB/1000 gallons	WebFIRE (EPA 2015b)	3778
Natural Gas	Electric Generation	7.6	PM _{2.5}	LB/million Cubic Feet	WebFIRE (EPA 2015b)	2496
Process Gas	Electric Generation	7.41	PM _{2.5}	LB/million Cubic Feet	WebFIRE (EPA 2015b)	2596
Residual Oil	Electric Generation	4.3A	PM _{2.5}	LB/1000 gallons	WebFIRE (EPA 2015b)	2004
Solid Waste	Electric Generation	0.04063	PM _{2.5}	LB/million BTUs	WebFIRE (EPA 2015b)	3823
Wood/Bark Waste	Electric Generation	10	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	2860
Anthracite Coal	Industrial	(2.500E0)+(8E-2*A)	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	3896
Bituminous/Subbituminous Coal	Industrial	5.64	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	4329
Distillate Oil	Industrial	1.55	PM _{2.5}	LB/1000 gallons	WebFIRE (EPA 2015b)	5690
Kerosene/ Naphtha (Jet Fuel)	Industrial	0.01107	PM _{2.5}	LB/million BTUs	WebFIRE (EPA 2015b)	12248
Lignite Coal	Industrial	(5.600E-1*A) + 6.400E-1	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	5461
Liquified Petroleum Gas (LPG)	Industrial	1.106	PM _{2.5}	LB/1000 gallons	WebFIRE (EPA 2015b)	8006
Natural Gas	Industrial	7.6	PM _{2.5}	LB/million Cubic Feet	WebFIRE (EPA 2015b)	5945
Process Gas - Petroleum Refinery Gas	Industrial	8.7	PM _{2.5}	LB/million Cubic Feet	WebFIRE (EPA 2015b)	5995
Process Gas - BFG	Industrial	8.6	PM _{2.5}	LB/million Cubic Feet	WebFIRE (EPA 2015b)	6006
Process Gas - Coke Oven Gas	Industrial	8.919	PM _{2.5}	LB/million Cubic Feet	WebFIRE (EPA 2015b)	6015
Residual Oil	Industrial	(4.67E0*A)+(1.50E0)	PM _{2.5}	LB/1000 gallons	WebFIRE (EPA 2015b)	5526
Wood/Bark Waste	Industrial	10	PM _{2.5}	LB/ton	WebFIRE (EPA 2015b)	6360
Various	Brick Kilns (Mexico)	40.39	PM _{2.5}	kg/burn	TCEQ 2002, CARB 2014	NA

Notes: NA = not applicable. A = Ash content of fuel, weight %.



جدول ۳- ضرایب $SF_{i,I.PM_{2.5}/BC}$ [۲۹]

Tier 1 Speciation Factors (SF)				
Source / Fuel Type	EC (weight %)*	Reference(s)	SPECIATE Profile # (if applicable)	SPECIATE Uncertainty (if applicable)
Bituminous Coal Combustion	1.696	SPECIATE (EPA 2011b)	92104	NA
Distillate Oil Combustion	10	SPECIATE (EPA 2011b)	92115	NA
Lignite Combustion	1.428729379	SPECIATE (EPA 2011b)	92125	NA
Natural Gas Combustion	38.4	SPECIATE (EPA 2011b)	92112	NA
Liquified Petroleum Gas (LPG)	38.4	SPECIATE (EPA 2011b)	92112	NA
Process Gas Combustion	14.57143457	SPECIATE (EPA 2011b)	92136	NA
Residual Oil Combustion	1	SPECIATE (EPA 2011b)	92117	NA
Solid Waste Combustion	1.52188727	SPECIATE (EPA 2011b)	92126	NA
Subbituminous Coal Combustion	4.2763	SPECIATE (EPA 2011b)	92110	NA
Wood/Bark Waste	3.3	EMEP/EEA 2013	NA	NA
Brick Kilns (Mexico)	0.865	Stratus 2012	NA	NA

به منظور تخمین انتشار کربن سیاه، ابتدا برای نیروگاه طرشت با فرمول EPA محاسبات را انجام می‌دهیم:

$$i = \text{Natural Gas}$$

$$I = \text{Electronic Generation}$$

$$Q_{i,I} = 103 \text{ Mm}^3 = 3637.4 \text{ Mft}^3$$

$$EF_{i,I.PM_{2.5}} = 7.6$$

$$SF_{i,I.PM_{2.5}/BC} = 38.4\%$$

$$\rightarrow E_{PM_{2.5}} = 12.5 \frac{\text{ton}}{\text{year}} \rightarrow E_{BC} = 5 \frac{\text{ton}}{\text{year}}$$



با توجه به نسبت ۴ برابری و ۲ برابری مصرف سوخت گاز طبیعی در نیروگاه‌های ری و بعثت نسبت به نیروگاه طرشت با ۵ تن انتشار سالانه کربن سیاه، مقدار انتشار کربن سیاه آن دو به ترتیب برابر با ۲۰ و ۱۰ تن در سال خواهد بود. به عبارتی مجموع سه نیروگاه، انتشاری معادل ۳۵ تن کربن سیاه در سال (فقط با سوخت گاز طبیعی) دارند.

در ضمن محاسبات، میزان $PM_{2.5}$ منتشر شده نیروگاه طرشت برابر با ۱۲/۵ تن به دست آمد که نصف میزان کل ذرات معلق منتشر شده از این منبع مطابق با سیاهه انتشار است. بر همین اساس میزان $PM_{2.5}$ منتشر شده از پالایشگاه تهران و صنایع را به طور تقریبی برابر با نصف میزان کل ذرات معلق اعلامی در سیاهه انتشار در نظر می‌گیریم. با این تقریب برای پالایشگاه تهران خواهیم داشت:

$$E_{PM_{2.5}} = 430 \frac{ton}{year} \xrightarrow{SF_{i.I.PM_{2.5}/BC}=10\%} E_{BC} \cong 40 \frac{ton}{year}$$

به همین روش برای صنایع تهران:

$$E_{PM_{2.5}} = 306 \frac{ton}{year} \xrightarrow{SF_{i.I.PM_{2.5}/BC}=10\%} E_{BC} \cong 115 \frac{ton}{year}$$

نتایج محاسبات فوق در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲- میزان مصرف سوخت و انتشار PM و BC منابع مهم ساکن شهر تهران

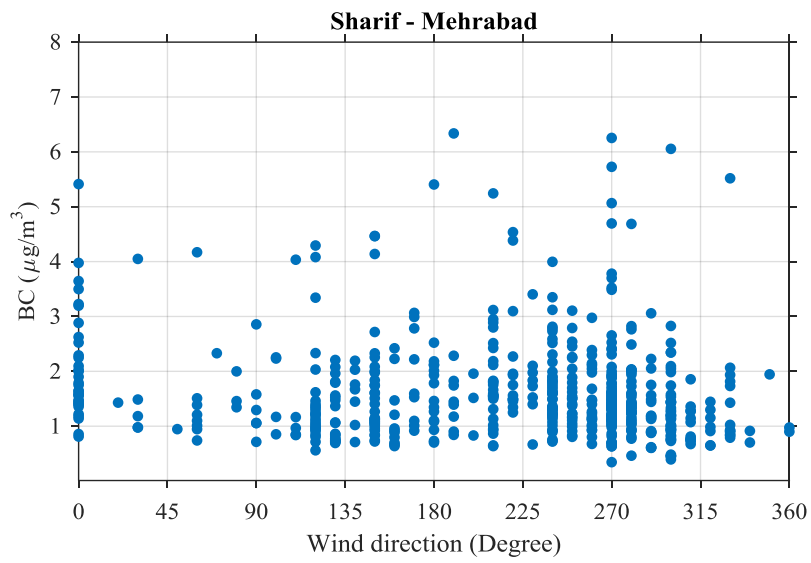
	منبع انتشار	مصرف گاز (Mm^3)	انتشار PM (ton/year)	انتشار BC ** (ton/year)
-	مجموعه‌ی صنایع	۷۲۵	۶۱۲	۱۱۵
۱	پالایشگاه تهران	-	۸۶۰	۴۰
۲	نیروگاه طرشت	۱۰۳	۱۷۵*	۳۵
۳	نیروگاه ری	۴۲۰		
۴	نیروگاه بعثت	۲۲۳		

* با در نظر گرفتن فقط سهم گاز طبیعی به عنوان سوخت

** میزان تخمینی



همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، سهم تخمینی صنایع در انتشار آلاینده کربن سیاه در حدود ۳ برابر پالایشگاه تهران و بیش از ۳ برابر مجموع سه نیروگاه است. بنابراین از میان ۵ منبع بررسی شده، صنایع را که مطابق شکل ۳۲ عمدتاً در غرب ایستگاه دانشگاه شریف واقع شده‌اند به عنوان منبع غالب آلاینده‌گی ثابت کربن سیاه در نظر می‌گیریم. از شکل ۱۲ می‌توان دریافت که از ساعت ۱۳ تا ۱۷ از میزان غلظت کربن سیاه در مقدار کمینه و بدون تاثیر از ناوگان شبانه بوده است. بنابراین داده‌های این بازه زمانی می‌تواند معیاری از تاثیر منابع ساکن نیز باشد. در شکل ۳۳ داده‌های میزان غلظت کربن سیاه موجود در ایستگاه دانشگاه شریف بر حسب جهت باد در ایستگاه مهرآباد نشان داده شده است. با توجه به واقع بودن صنایع در غرب ایستگاه اندازه‌گیری، در صورتی که صنایع بر غلظت آلاینده کربن سیاه در هوا تاثیر قابل توجهی داشته باشند، انتظار می‌رود هنگام وزش باد با زاویه‌ی حدود ۲۷۰ درجه (از سمت غرب به شرق) میزان غلظت‌های ثبت شده همگی افزایش یابد. در حالیکه شکل ۳۳ نشان می‌دهد که در همه جهات وزش باد غلظت‌های کم BC و همینطور غلظت‌های زیاد این آلاینده به ثبت رسیده است. البته باید این نکته را خاطر نشان کرد که در شکل ۳۳ علت وقوع نقاطی با غلظت کربن سیاه بیشتر از $5 \mu g m^{-3}$ در جهت‌های باد بین ۱۸۰ تا ۳۲۰ درجه، غالب بودن این جهات وزش باد در طول مدت آزمایش می‌باشد و آن نقاط، نقاطی هستند که در روزهای آلوده این بازه به ثبت رسیده‌اند و نشان دهنده غلظت بالای کربن سیاه در جهت باد خاصی نمی‌باشند. بنابراین نتیجه کلی این خواهد بود که منابع آلاینده ساکن در مدت این اندازه‌گیری تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر غلظت کربن سیاه موجود در هوا نداشتند.



شکل ۳۳- مقایسه‌ی مقدار ثبت شده‌ی غلظت BC روزهای کاری از ساعت ۱ تا ۵ بعد از ظهر ایستگاه دانشگاه شریف و جهت باد ایستگاه هواشناسی مهرآباد



۴- منابع و مراجع

1. <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/basic.html>
2. <http://blogs.ei.columbia.edu/2016/03/22/the-damaging-effects-of-black-carbon>
3. <http://www.environment.brussels/state-environment/summary-report-2011-2012/environment-and-health/health-effects-black-carbon>
4. <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/effects.html>
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Black_carbon#Public_health_impacts
6. United Nations Environment Programme (UNEP). (2011). Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. UNEP.
7. Hansen, A. D., Lowenthal, D. H., Chow, J. C., & Watson, J. G. (2001). Black carbon aerosol at McMurdo station, Antarctica. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(4), 593-600.
8. Ramachandran, S., & Rajesh, T. A. (2007). Black carbon aerosol mass concentrations over Ahmedabad, an urban location in western India: comparison with urban sites in Asia, Europe, Canada, and the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D6).
9. Invernizzi, G., Ruprecht, A., Mazza, R., De Marco, C., Močnik, G., Sioutas, C., & Westerdahl, D. (2011). Measurement of black carbon concentration as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in Milan, Italy. *Atmospheric Environment*, 45(21), 3522-3527.
10. Butterfield, D., Beccaceci, S., Quincey, P., Sweeney, B., Lilley, A., Bradshaw, C., Fuller, G., Green, D., Font Font, A. (2016). 2015 Annual report for the UK Black Carbon Network. London: NPL Report
11. Song, S., Wu, Y., Xu, J., Ohara, T., Hasegawa, S., Li, J., ... & Hao, J. (2013). Black carbon at a roadside site in Beijing: Temporal variations and relationships with carbon monoxide and particle number size distribution. *Atmospheric environment*, 77, 213-221.
12. Bizjak, M., Cigler, R., Hansen, A. D. A., & Hudnik, V. (1993). Diurnal concentrations of black carbon and some other air pollutants in Ljubljana, Slovenia. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 27(8), 1347-1350.



13. Hitzenger, R., Ctyroky, P., Berner, A., Turšič, J., Podkrajšek, B., & Grgič, I. (2006). Size distribution of black (BC) and total carbon (TC) in Vienna and Ljubljana. *Chemosphere*, 65(11), 2106-2113.
14. Park, S. S., Hansen, A. D., & Cho, S. Y. (2010). Measurement of real time black carbon for investigating spot loading effects of Aethalometer data. *Atmospheric Environment*, 44(11), 1449-1455.
15. 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.
۱۶. گزارش کیفیت هوای تهران ۱۳۹۵، QM96/02/01(U)/1، اردیبهشت ماه ۱۳۹۶
17. 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
18. Hansen, A. D. A., Rosen, H., & Novakov, T. (1984). The aethalometer—an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Science of the Total Environment*, 36, 191-196.
19. http://www.mageesci.com/EACworkshop2017/BROCHURES/Magee_Scientific_Aethalometer%C2%AE_AE33_brochure_sheet_A4.pdf
20. http://www.mageesci.com/aethalometer_sample_data/ae31_7-wavelength_spectrum_aethalometer_data_example_ambient_air_in_berkeley_california.html
21. <http://metone.com/air-quality-particulate-monitors/regulatory/bam-1020/>
22. <http://www.environnement-sa.com/products-page/en/air-quality-monitoring-en/mp101m-continuous-automatic-pm10-pm2-5-pm1-tsp-particulate-monitor/>
23. 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.
24. <https://www.ecotech.com/products>
25. <https://apfs.tehran.ir/>



26. Stull, R. B. (2012). An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
27. 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.
۲۸. سیاهه انتشار آلاینده‌گی شهر تهران برای سال مبنای ۱۳۹۲، جلد پنجم: جایگاه‌های بنزین، صنایع، نیروگاه‌ها و پالایشگاه تهران، QM/94/04/03/(U)/05، سال ۱۳۹۴.
29. CEC. 2015. North American Black Carbon Emissions Estimation Guidelines: Recommended Methods for Estimating Black Carbon Emissions. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation. 89 pp.