



فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۰

۹۹-۱۲۲

## پایش بلندمدت غلظت آلاینده کربن سیاه (BC) در ایران با استفاده از داده‌های مدل مبنای NASA/MERRA-2

کوهزاد رئیس پور<sup>۱\*</sup> و یونس خسروی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
<sup>۲</sup> گروه محیط زیست، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۳

رئیس پور، ک. و ی. خسروی. ۱۴۰۰. پایش بلندمدت غلظت آلاینده کربن سیاه (BC) در ایران با استفاده از داده‌های مدل مبنای NASA/MERRA-2. فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۳): ۹۹-۱۲۲.

**سابقه و هدف:** جو یا اتمسفر سامانه گازی طبیعی پویا و پیچیده‌ای است که آلودگی آن بیش از هر آلودگی دیگری جان انسان‌ها را می‌گیرد. آلودگی هوا زمانی اتفاق می‌افتد که حجم زیادی از ذرات یا مواد مضر معلق وارد اتمسفر شود. ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM 2.5) از جمله مهمترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شوند. ذرات کربن سیاه (BC)<sup>۱</sup> یکی از اجزاء بسیار مهم و خطرناک ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ μm به‌شمار می‌رود. بر همین اساس، این پژوهش با هدف تحلیل رفتار و پراکنش زمانی - مکانی آلاینده کربن سیاه (BC) در گستره جغرافیایی ایران با استفاده از داده‌های مدل مبنای MERRA-2<sup>۲</sup> طی دوره‌ی آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۹ - ۱۹۸۰) انجام گردید.

**مواد و روش‌ها:** در این تحقیق در ابتدا داده‌های کربن سیاه با فرمت NetCDF با گام‌های زمانی ماهانه و مکانی 0.5° x 0.625° از وبگاه Earth data استخراج گردید. پس از استخراج داده‌ها، عملیات کنترل کیفی، پیش‌پردازش و پردازش روی آن‌ها اعمال شد. سپس محاسبات روی دو ماتریس ماهانه و فصلی (روی ۷۴۰ پیکسل یا نقاط شبکه‌بندی شده) با استفاده از امکاناتی که نرم‌افزارهای کاربردی ArcGIS، Grads و Origin pro در اختیار کاربر قرار می‌دهد، انجام شد. در گام آخر برای ساخت لایه‌های رستری، وکتوری، نمودارها و جدول‌های اطلاعاتی اقدام و خروجی‌های مورد نظر تهیه گردید.

**نتایج و بحث:** استفاده از داده‌های مدل مبنای MERRA-2 نتایج بسیار خوبی از توزیع زمانی - مکانی پراکنش آلاینده کربن سیاه در گستره ایران ارائه داده است. نتایج بررسی نشان داد که تفاوت‌های ماهانه و فصلی بسیار چشمگیر بوده است، به‌طوری‌که به لحاظ ماهانه، بیشترین میزان کربن سیاه در ماه دسامبر و کمترین میزان آن در ماه ژوئن برآورد شده است. در میان فصل‌ها نیز، بیشترین و کمترین میزان کربن سیاه مربوط به فصل‌های زمستان و تابستان است. به لحاظ مکانی نیز، بیشترین پراکنش کربن سیاه در نیمه غربی ایران و بویژه روی کلان‌شهرهای تهران و اهواز مشاهده شد. واکاوی روند سری زمانی غلظت کربن سیاه در جو ایران نشان داد که غلظت این آلاینده در طول دوره آماری افزایشی و این افزایش بویژه از سال ۲۰۰۰م به بعد اتفاق افتاد. همچنین در بررسی پارامترهای هواشناسی مؤثر بر غلظت کربن

\* Corresponding Author: *Email Address*. Raispour@znu.ac.ir  
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.33941>

سیاه، نتایج حاصله به‌خوبی بیانگر همبستگی مثبت معنی‌دار میان غلظت کربن سیاه با فشار هوا و منفی معنی‌دار با سرعت باد است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج حاصله به‌خوبی درک روشنی از غلظت کربن سیاه (BC) را در جو ایران نشان داد. این نتایج که از واکاوی آماری و اعمال الگوریتم‌های بهینه روی اطلاعات مکان‌دار (GIS) آلاینده کربن سیاه در گستره‌ی جغرافیایی کشور ایران حاصل گردید؛ بیانگر تفاوت آشکار در توزیع زمانی و مکانی غلظت کربن سیاه در طول دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۹ - ۱۹۸۰) بوده است. افزون بر نتایج بالا، آلاینده کربن سیاه از برخی پارامترهای هواشناسی از قبیل فشار هوا و سرعت باد متأثر است. به‌طور کلی صرف‌نظر از ساز و کارهای تکوین، ماهیت و انتشار این آلاینده در نواحی مختلف ایران، رفتار غلظت این آلاینده در بستر زمان، بیانگر هشداردهنده بودن خطر آن در بخش‌های وسیعی از کشور ایران می‌باشد. بنابراین اتخاذ راهکارهای مدیریتی و اجرایی لازم در راستای کاهش این آلاینده، بویژه در کلان‌شهرهای همراه با غلظت بالای کربن سیاه امری ضروری به نظر می‌رسد.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی هوا، ذرات معلق، تحلیل زمانی - مکانی، کربن سیاه، مدل MERRA-2

### مقدمه

شیمیایی خطرناک وارد جریان خون می‌شوند (Abdul-Razzak and Ghan, 2000; Pope and Dockery, 2006; Bian, 2013). زیرا این ذرات به اندازه کافی ریز هستند که به‌همراه دم از موانع قسمت بالایی دستگاه تنفسی عبور نموده و وارد ریه شوند (Bigdeli, 2001; Afyoni and Arfanmanesh, 2015; Ajami Taheri *et al.*, 2015). نتایج حاصل از تحقیق منتشر شده توسط Bell (2017) در مورد آلودگی هوا نشان داد که کربن سیاه یا دوده تأثیر بسزایی در کاهش کلسترول مفید خون و ابتلای افراد به بیماری‌های قلبی و عروقی دارد. وی نشان داده است افرادی که در معرض آلودگی هوای ناشی از ترافیک شامل ذرات ریز و یا دوده هستند، دچار کاهش معنادار سطح کلسترول مفید خون شده و ریسک ابتلای آن‌ها به بیماری‌های قلبی شامل گرفتگی عروق و سکت قلبی به شدت افزایش می‌یابد. از منابع اصلی انتشار این آلاینده می‌توان به موتورهای احتراقی بویژه از نوع دیزلی، فعالیت‌های صنعتی، سوزاندن چوب، ذغال و ضایعات کشاورزی و آتش سوزی جنگل‌ها اشاره کرد. (Bisiaux *et al.*, 2011; Sterle *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015). ذرات کربن سیاه بویژه طی فرآیند احتراق سوخت‌های پایه کربنی، زمانی که اکسیژن برای احتراق کامل کافی نباشد، تولید می‌شود (Shariapoor and Akbari Bidakhti, 2014; Taheri Taheri *et al.*, 2018). همچنین تصور می‌شود از عوامل انسانی مهم برای گرم

امروزه انسان بعد از گذراندن مرحله‌های مختلف توسعه، متوجه بحران‌های عظیم محیط زیستی در پیرامون خود شده است که یکی از آن‌ها، آلودگی هوا می‌باشد. در سال‌های اخیر افزایش سطح غلظت آلاینده‌های هوا به یکی از چالش برانگیزترین مسئله‌های محیط زیستی تبدیل شده و مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است (Bisiaux *et al.*, 2012; Farzad *et al.*, 2018). ذرات معلق با قطر کمتر از  $2.5 \mu\text{m}$  (PM 2.5) از جمله مهمترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شوند (Taheri *et al.*, 2017). این ذرات شامل عناصر و ترکیب‌های مختلفی با منابع بسیار متنوع است و در این میان (Carbon) یکی از اجزاء بسیار مهم و خطرناک ذرات معلق در هوا با قطر کمتر از  $2.5 \mu\text{m}$  میکرون به شمار می‌رود (Arhami *et al.*, 2017). این آلاینده عامل مهم آسیب‌ها و اثرهای زیان‌باری بر انسان همچون ایست قلبی، مشکلات تنفسی و برخی از انواع سرطان می‌باشد (Zare, 2003; Laden *et al.*, 2006; Pope and Dockery, 2006; Hoek *et al.*, 2013; Putero *et al.*, 2014). برآورد شده که تأثیر قرارگیری در معرض این آلاینده از غلظت مشابه سایر ذرات با قطر کمتر از  $2.5 \mu\text{m}$  بر سلامتی انسان مضرتر باشد (Puett *et al.*, 2009). اثر کلی کربن سیاه (BC) بر سلامتی انسان به نحوی است که با ورود ذرات ریز به عمق سیستم تنفسی، مواد

شدن کره زمین بوده و افزایش آن اثرهای نامطلوب اقلیمی را به دنبال خواهد داشت (Aaheim *et al.*, 2006; Ramanathan and Carmichael, 2008; Omidvar *et al.*, 2013; Bond *et al.*, 2013; Randles *et al.*, 2017). زیرا که کربن سیاه با جذب تابش خورشیدی تأثیرهای مخرب جوی به بار می آورد (Karcher *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2016; Julia *et al.*, 2017). دو روش سبب گرمایش زمین می شود: حالت اول؛ زمانی که در هوا رها می شود با جذب نور خورشید تابیده شده به خود، در اتمسفر گرما ایجاد می کند که گرمای بیان شده موجب افزایش دمای هوا شده و روی شکل ابرهای منطقه تأثیر می گذارد (Abbatt *et al.*, 2006; Julie, 2010). حالت دوم مربوط به زمانی است که جذب برف و یخ می شود (Kaspari *et al.*, 2014). در این حالت نیز، با جذب نور آفتاب سبب گرمایش هوا و سطح یخ شده و ذوب شدن سریع یخ و برف را به دنبال دارد (Ming *et al.*, 2009; Menon *et al.*, 2010; Kaspari *et al.*, 2011; Sterle *et al.*, 2013; Wendl *et al.*, 2014; Mckenzie and Thomas, 2017; Rizza *et al.*, 2018). بر همین اساس امروزه روند افزایش غلظت کربن سیاه (BC) به یکی از مهمترین چالش های بسیاری از کشورهای جهان تبدیل شده است. مطالعات متعددی در مورد ماهیت، منشأ، خاستگاه، ترکیب شیمیایی، حالت فیزیکی، روش انتشار، اثرهای فیزیولوژیک و محیط زیستی آلاینده های هوا از جمله کربن سیاه توسط پژوهشگران پرشماری در نقاط مختلفی از جهان (Shahbazi *et al.*, 2016; Arhami *et al.*, 2017; Qin *et al.*, 2019) صورت گرفته است. بیشتر محققان در وهله اول بر عامل های ترافیکی و سوخت های فسیلی به عنوان عمده ترین فاکتور در افزایش غلظت مواد آلاینده (کربن سیاه) اذعان داشته و در وهله دوم نقش آلاینده های بیان شده را در افزایش میزان مرگ و میر ناشی از بیماری های قلبی، تنفسی مؤثر دانسته اند (Hansen *et al.*, 1984; Dutkiewicz *et al.*, 2014).

مطالعه ای آلودگی هوا در جهان با روش های متنوعی انجام شده است. از جمله مهمترین روش های مطالعه می توان به روش های آماری، مشاهداتی (ایستگاه های پایش کیفیت هوا)، سنجش از دور هوایبرد و فضابرد و مدل سازی آلودگی هوا اشاره کرد (Virkkula *et al.*, 2015). امروزه پیشرفت های زیادی در مدل سازی غلظت آلاینده های هوا صورت گرفته است. یکی از این مدل ها که به تازگی کاربرد زیادی در مطالعه آئروسول ها و ذرات ریز معلق موجود در هوا (کوچکتر از  $2.5 \mu\text{m}$  میکرون) کاربرد فراوانی پیدا کرده است، مدل MERRA-2 می باشد. طی سال های اخیر مطالعات زیادی با استفاده از داده های ماهواره مبنای بازکاوی شده و این مدل در راستای پایش آلودگی هوا و ذرات معلق در نقاط مختلف جهان انجام شده است. تمامی مطالعات انجام شده به موفقیت این مدل و دقت داده های آن نسبت به مدل های مشابه اقرار کرده اند. از جمله مطالعات مبتنی بر داده های این مدل در راستای پایش آلاینده های هوای توان به (Buchard *et al.*, 2015; Jose and Singh, 2018; Kristofer *et al.*, 2018; Sitnov *et al.*, 2020; Lerato, 2019) اشاره نمود. یکی از مهمترین ترکیب های آلاینده های هوا با قطر ذرات کوچکتر از  $2.5 \mu\text{m}$ ، کربن سیاه می باشد که در برخی از نقاط کشور ایران نیز از غلظت فزاینده ای برخوردار شده است. با این وجود تاکنون مطالعه جامع که هم به واکاوی زمانی - مکانی بلندمدت آلاینده کربن سیاه در کل پهنه ی ایران پرداخته و هم مبتنی بر داده های مدل مبنای ماهواره ای باشد، انجام نشده است. از این - رو پژوهش حاضر تلاش دارد تا ضمن پایش پراکنش زمانی - فضایی کربن سیاه و پیش بینی روند آن، پیش آگاهی لازم را برای مدیریت منابع و خاستگاه این آلاینده در راستای برنامه ریزی های بهینه محیط زیستی و کاهش اثرهای نامطلوب آن به دنبال داشته

باشد. برای نیل به این مقصود به بررسی غلظت آلاینده کربن سیاه در طول دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۹ - ۱۹۸۰) در جو ایران با استفاده از داده‌های ماهواره مبنای مدل MERRA-2 اقدام گردید.

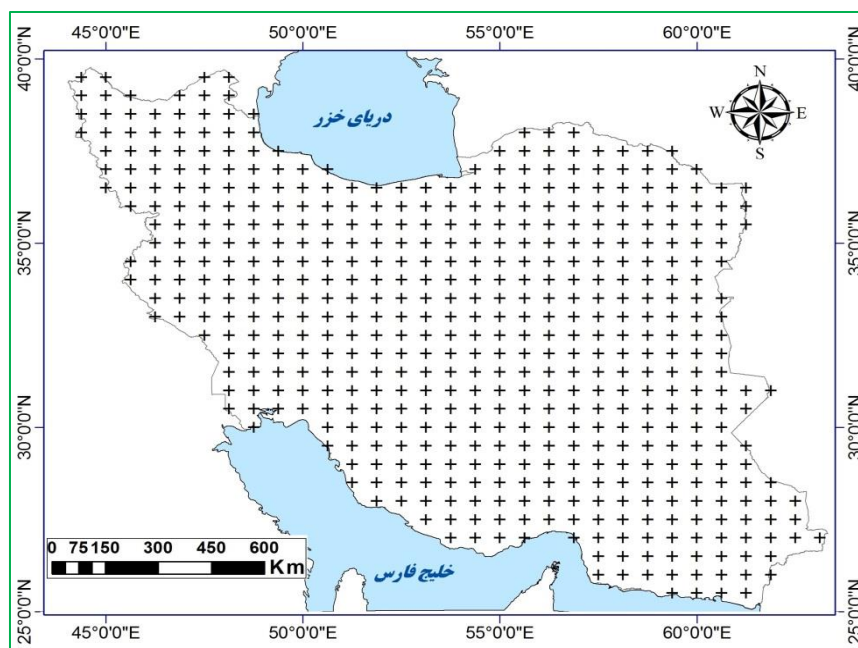
## مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش از محصولات بازکاوی شده کربن سیاه مدل MERRA-2 استفاده گردید. مدل MERRA-2 نسخه‌ی دوم پایگاه MERRA می‌باشد که توسط مرکز مدل‌سازی و داده‌گذاری سازمان فضایی و هوانوردی ملی آمریکا NASA ارائه شده است. این پایگاه مانند پایگاه‌های ECMWF و NCEP/NCAR یک پایگاه اطلاعات تحلیل مجدد است. یکی از مهمترین هدف‌های پایگاه MERRA قرار دادن مشاهدات ماهواره‌های مختلف NASA در یک بستر اقلیمی و ارائه آن به صورت شبکه‌بندی شده برای کل جهان می‌باشد. پروژه MERRA که روی تجزیه و تحلیل بلندمدت شرایط آب و هوایی (از ژانویه ۱۹۸۰ تا امروز) تمرکز نموده است، برای طیف وسیعی از مقیاس‌های آب‌وهوا، مجموعه‌ای از مشاهدات و نتایج اتمسفری بازکاوی شده مبتنی بر پایش‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های سنجش از دور را در اختیار کاربران قرار می‌دهد (Bloom et al., 1996). داده‌های این مدل از قدرت تفکیک قابل قبولی برخوردار بوده و از کیفیت و دقت بسیار بالاتری نسبت به ابزارهای مشابه (NCEP/NCAR, ECMWF, ...) برخوردار می‌باشند. در این میان، نسخه MERRA-2 یکی از قابل اعتمادترین مدل‌های پایگاه MERRA می‌باشد که با هدف کمک به محققان مختلف از جمله اقلیم‌شناسی و محیط زیست برای پاسخگویی به مسئله‌های مربوط به تحقیقات آب و هوایی و تغییرات اقلیمی برای بهره‌برداری بهینه از مشاهدات ماهواره‌ای، بکار گرفته شده است (Molod et al., 2012; Inness et al., 2019). این مدل که با هدف تجزیه و تحلیل مجدد مدرن دوره‌ای برای

تحقیقات و برنامه‌های کاربردی (بررسی مجدد اتمسفر ناسا براساس داده‌های ماهواره‌ای) راه‌اندازی شده است، با استفاده از داده‌های نسخه‌ی ۵ سیستم مشاهدات زمین گودارد سازمان فضایی ناسا<sup>۳</sup> به‌مراه داده‌های سیستم<sup>۴</sup> پشتیبانی می‌شود (Wu et al., 2002; Randles et al., 2017). یکی از مهمترین کاربردهای این مدل، پایش و شبیه‌سازی ذرات معلق موجود در هوا (گردوغبار، نمک دریا، گازهای طبیعی و انسانی، سولفات، کربن‌های آلی و معدنی و ...) از جمله ذرات با قطر کمتر از  $2/5 \mu\text{m}$  می‌باشد که ذرات معلق کربن سیاه (BC) یکی از مهمترین آن‌ها می‌باشد. در مورد پایش ذرات معلق ریز موجود در هوا (آلاینده‌های هوا) مدل MERRA-2 پیشروترین سیستم تجزیه و تحلیل بلندمدت جهانی می‌باشد که مشاهدات مبتنی بر فضا از ذرات معلق موجود در هوا را عملیاتی نموده و تعامل آن‌ها را با سایر فرایندهای موجود در سیستم آب‌وهوا نشان می‌دهد. این مدل برای آشکارسازی ذرات معلق در هوا با بهره‌گیری از یک روش گروهی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های زمین - پایه‌ی شبکه روباتیک آئروسول جهانی<sup>۵</sup> و مشاهدات ماهواره‌ای، اطلاعاتی را در مورد غلظت عناصر موجود در هوا در اختیار کاربران قرار می‌دهد (Holben et al., 1998; Dubovik et al., 2000; Rizza et al., 2018). منابع مورد استفاده در این مدل شامل داده‌های دریافتی حاصل از سنسورهای طیف‌سنجی با قابلیت تصویربرداری چند زاویه‌ای (کانال ۵۵۰ نانومتر) شامل: سنسور رادیومتری پیشرفته با وضوح بسیار بالا<sup>۶</sup> MISR, MODIS/Aqua, MODIS/Terra, AERONET, و ماژول آئروسول GOCART می‌باشد (Chin et al., 2002). مطالعات زیادی به موفقیت مدل MERRA-2 در شبیه‌سازی کربن سیاه و سایر ویژگی‌های قابل مشاهده آن در هوا اقرار داشته‌اند (Colarco et al., 2010; Rienecker et al., 2011; Bian, 2013; Buchard et al., 2016). در این تحقیق نیز از داده‌های کربن سیاه مدل MERRA-2 با قدرت تفکیک مکانی  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$

در حدود ۵۰ km در جهت عرض جغرافیایی و ۶۲ km در جهت طول جغرافیایی) و گام زمانی ماهانه برای یک دوره آماری بلندمدت ۴۰ ساله (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹) با فرمت NetCDF که از وبگاه Earth data و از طریق لینک <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2> دریافت شده‌اند، استفاده گردید. پس از استخراج داده‌ها، عملیات کنترل کیفی و پیش‌پردازش روی آن‌ها اعمال گردید. به‌طور کلی خروجی‌های حاصله نتیجه‌ی اعمال محاسبات روی دو ماتریس؛ یکی ماتریس ماهانه به ابعاد ۷۴۰×۴۸۰ (معرف تعداد مشاهدات در ماه‌های پیاپی از ۴۰ سال مورد مطالعه (۴۰×۱۲) و ۷۴۰ معرف تعداد نقاط شبکه‌بندی شده مدل MERRA-2 به ابعاد

۰.۵° x ۰.۶۲۵° در پهنه‌ی ایران) و دیگری ماتریس فصلی به ابعاد ۷۴۰×۱۶۰ (معرف تعداد مشاهدات در فصل‌های پیاپی (۴×۴۰) است) (شکل ۱). در گام بعدی با استفاده از امکاناتی که نرم‌افزارهای کاربردی Grads, ArcGIS و Origin pro در اختیار کاربر قرار می‌دهد، برای ساخت لایه‌های رستری، وکتوری، نمودارها و جدول‌های اطلاعاتی برحسب میکروگرم بر مترمکعب ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) اقدام گردید. در گام نهایی نیز واکاوی، تفسیر و استنباط‌های استدلالی یافته‌ها برای دست‌یابی به هدف پژوهش (بررسی غلظت آلاینده‌ی کربن سیاه در ایران طی دوره‌ی آماری بلندمدت ۲۰۱۹ - ۱۹۸۰) جای گرفت.



شکل ۱- پراکنش نقاط شبکه بندی شده‌ی مدل MERRA-2 با تفکیک مکانی  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$  در ایران  
Fig. 1- Distribution of MERRA-2 networked points with a spatial resolution of  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$  in Iran

میزان کربن سیاه در دیگر ماه‌های سال از قبیل فوریه، مارس، آوریل، اوت و سپتامبر در حد فاصل ماه‌های بیشینه (دسامبر، ژانویه و نوامبر) و ماه‌های کمینه (ژوئن، می و ژولای) قرار گرفته است. در میان تمامی ماه‌های مورد مطالعه (۴۸۰ ماه)؛ بیشترین میزان کربن سیاه به ترتیب در نوامبر  $2017$  ( $4/08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )، دسامبر  $2017$  ( $3/91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) و ژانویه  $2014$  ( $3/69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) است. از

## نتایج و بحث

### تحلیل ماهانه

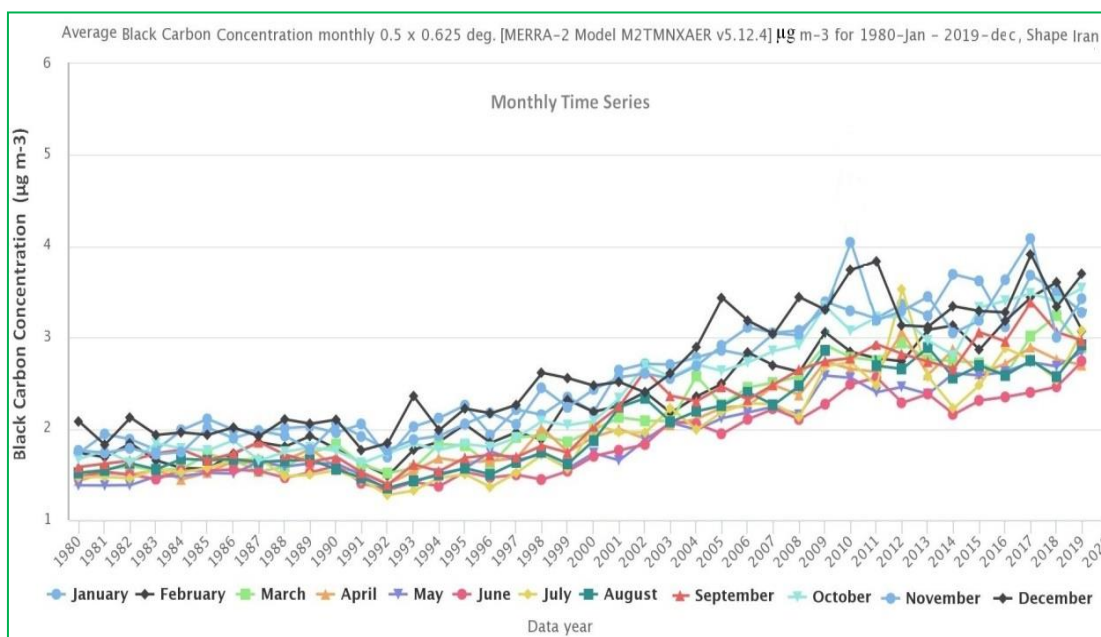
آنالیز آماری داده‌های میانگین مطلق ماهانه کربن سیاه در شکل‌های ۲ و ۳ و جدول ۱ نشان داده شده است. در این میان؛ بیشترین میانگین ماهانه کربن سیاه به ترتیب مربوط به ماه‌های دسامبر، ژانویه و نوامبر و کمترین مربوط به ماه‌های ژوئن، می و ژولای است. براساس این گراف‌ها

می‌یابد و گرمای حاصل از تابش خورشید برای غلبه بر وارونگی دما (پدیده اینورژن) کفایت نکرده و سبب تداوم و تقویت وارونگی می‌گردد. تداوم روزهای همراه با پدیده وارونگی که به لحاظ فراوانی در این دوره از سال چندین برابر روزهای توأم با بارش (در نیمه غربی کشور) است؛ اثر روزهای بارشی را در کاهش قابل ملاحظه مقدار کربن سیاه کم‌رنگ می‌نماید. با حاکمیت چنین شرایطی، با سقوط سقف وارونگی به ارتفاع پایین‌تر، فضای انباشت کربن سیاه کمتر شده و آلودگی‌های چند روزه روی هم مترکم می‌گردند. از سویی دیگر چون در هنگام رخداد پدیده وارونگی کمابیش هیچ وزش بادی به دلیل حاکم بودن شرایط پایدار هوا به وجود نمی‌آید، کربن سیاه تولید شده در حجم وسیعی از هوا تخلیه نشده و ابر غلیظی از آن شکل می‌گیرد. اما در دوره گرم سال، گرمای حاصل از تابش خورشید به دلیل بیشتر بودن شدت و مدت تابش، عاملی برای شکستن مرز بالایی وارونگی گردیده شده و حرکات تلاطمی هوای گرم شده به وسیله تابش خورشید، در همان ساعت‌های اولیه صبح بر سرپوش وارونگی غلبه کرده و چینش دمای هوا منطبق بر شرایط طبیعی خود می‌باشد. برآیند چنین شرایطی منجر به افزایش سرعت باد سطحی در ماه‌های دوره گرم سال و کاهش سرعت آن در ماه‌های سرد سال می‌شود (Raispour et al., 2019). افزایش سرعت باد در ماه‌های گرم سال منجر به توزیع کربن سیاه در حجم وسیع‌تری از هوا شده و کاهش غلظت آن را در واحد حجم به دنبال خواهد داشت. به لحاظ فضایی نیز، بیشترین میزان تمرکز کربن سیاه روی کلان‌شهر تهران و انتشار آن تا شعاع چندین کیلومتری می‌باشد. شهر تهران با عنوان پایتخت کشور ایران با مساحتی حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع در دامنه جنوبی کوه‌های البرز واقع شده که براساس مطالعات و گزارش‌های بیان شده یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان به‌شمار می‌رود. در پاسخ به این سؤال که دلیل بیشترین تمرکز ذرات کربن سیاه

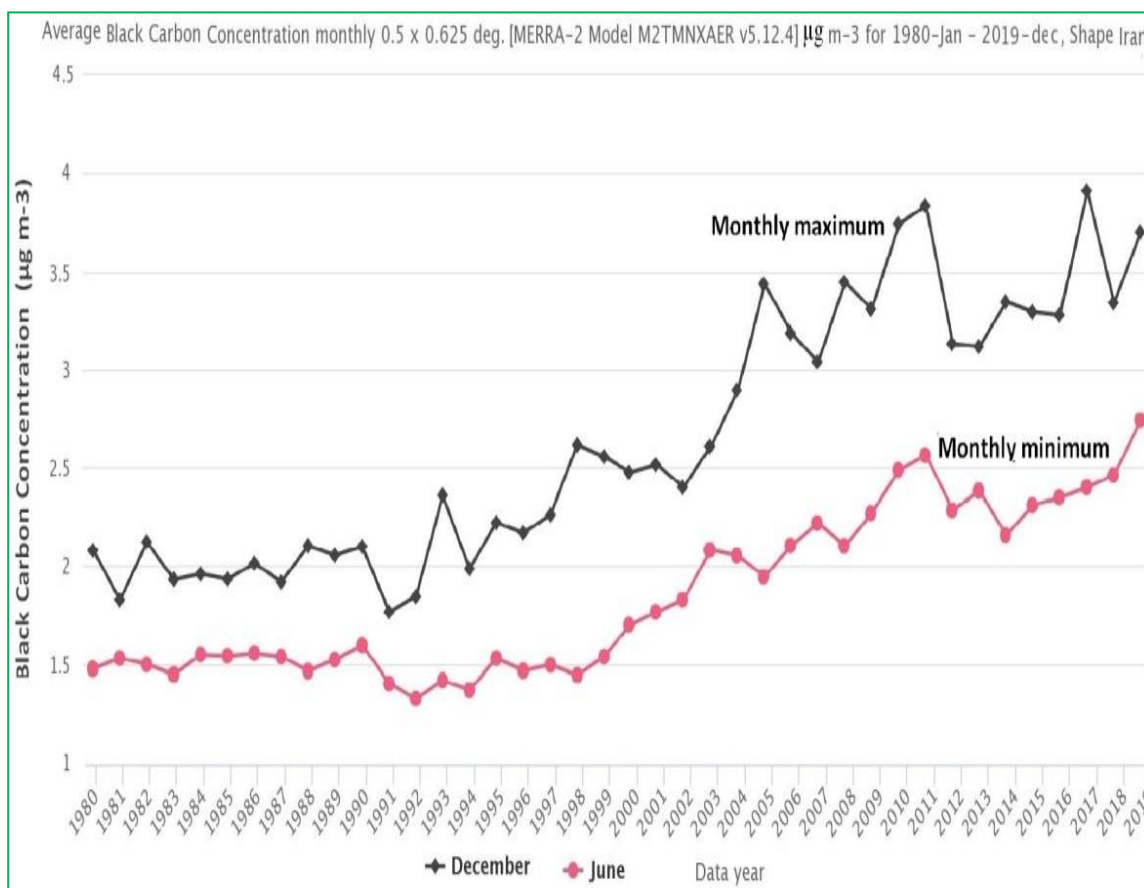
سویی دیگر کمینه کربن سیاه به‌ترتیب در ماه‌های ژولای ( $1/27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )، ژوئن ( $1/33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) و می ( $1/33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) برآورد گردید که هر سه مورد مربوط به سال ۱۹۹۲ می‌باشد. (جدول ۱). بر همین اساس غلظت کربن سیاه در بیشترین میزان ماهانه خود (نوامبر ۲۰۱۷) بیش از سه برابر میزان کربن سیاه در ماه کمینه (ژولای ۱۹۹۲) است. بررسی توزیع مکانی غلظت آلاینده کربن سیاه نیز گویای تفاوت‌های معنادار فضایی آن در گستره‌ی جغرافیایی ایران می‌باشد. این تفاوت در نقشه‌های پهنه‌بندی ماهانه (شکل‌های ۴ و ۵) به خوبی قابل مشاهده است. همان‌طوری که الگوهای مربوطه نشان می‌دهد، هرچند تمرکز کربن سیاه از نوسان بالای ماهانه برخوردار است ولی توزیع فضایی آن از الگوی واحدی تبعیت می‌نماید. بدین مفهوم که غلظت آلاینده کربن سیاه در تمامی ماه‌های مورد مطالعه در نیمه‌ی غربی ایران بیش از نیمه‌ی شرقی می‌باشد. این شرایط بیانگر این است که کانون‌های تولید و انتشار کربن سیاه در کلان‌شهرهای واقع در نیمه‌ی غربی ایران بیش از منابع انتشار آن در شرق کشور می‌باشد. در این میان تمرکز بالای کربن سیاه (در تمام ماه‌ها) بر فراز کلان‌شهرهای تهران، اهواز، ایلام، کرمانشاه آذربایجان شرقی و غربی، گیلان، مازندران و خراسان رضوی بیش از دیگر منطقه‌ها است. می‌توان گفت؛ تمرکز کربن سیاه در نیمه‌ی غربی ایران و گسترش آن به‌صورت زبانه‌هایی در امتداد سلسله جبال زاگرس و البرز، بیانگر نقش عامل‌های جغرافیایی (شکل توپوگرافی) در تمرکز و پراکنش آن می‌باشد. بدین مفهوم که دامنه‌های غربی زاگرس و جنوبی البرز همانند سدّی جلوی جریان هوا و خروج کربن سیاه را از این نواحی گرفته و زمان ماندگاری و تداوم آن را در این نواحی بیشتر می‌نماید. به‌طور کلی غلظت کربن سیاه در ایران؛ در ماه‌های سرد سال بیش از ماه‌های گرم سال است (شکل ۴ و ۵). در ماه‌های سرد سال شدت و مدت تابش خورشید به‌شدت کاهش

شده، عامل‌های انسانی بویژه تمرکز بالای جمعیت (۱۴) میلیون نفر معال ۱۷٪ درصد از جمعیت کل کشور) در شهر تهران و همچنین شهرهای بزرگ و پرجمعیتی از قبیل شهرهای اهواز، ایلام، کرمانشاه، تبریز، ارومیه و شهرهای پرجمعیت واقع در نوار شمالی تا شمال شرق ایران نقش اساسی دارد. تمرکز بالای جمعیت در این نواحی در کنار بالا بودن تعداد خودروها (اغلب فرسوده و بخش زیادی دیزلی) و بالا بودن حجم ترافیک بویژه در دوره سرد سال (به دلیل باز بودن مدارس، دانشگاه‌ها و اداره‌ها)، افزایش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی برای تأمین گرمایش فضاها، مسکونی، اداری، آموزشی و بهداشتی، استقرار کارخانه‌ها و صنایع می‌تواند به انتشار هرچه بیشتر کربن سیاه و افزایش تمرکز آن منجر شود. افزون بر موارد بالا، برخی از استان‌های واقع در نیمه غربی، شمال و شمال شرق به‌عنوان منطقه‌های هدف زیارتی و سیاحتی (گردشگرپذیری)، حجم بالایی از ترافیک را بویژه در ایام تعطیلات به خود می‌بینند که می‌تواند نقش مؤثری در افزایش میزان کربن سیاه داشته باشد.

به‌عنوان یکی از آلاینده‌های خطرناک هوا بر فراز شهر تهران چه می‌باشد؟ می‌توان گفت؛ عامل‌های زیادی در بالا بودن میزان آلاینده‌ی گفته شده بر فراز شهر تهران دخالت دارند که به نظر می‌رسد از میان آن‌ها عامل‌های انسانی و جغرافیایی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. استقرار شهر تهران در محیطی نیمه‌محصور در دامنه‌ی جنوبی ارتفاعات البرز، سبب می‌گردد تا رشته کوه‌های البرز در شمال و شرق آن همانند سد از گذر بادهای غربی جلوگیری نموده و شرایط را برای ماندگاری و تداوم هرچه بیشتر آلاینده‌ها (کربن سیاه) فراهم آورد. از سویی دیگر در برخی از ایام سرد سال، استقرار برخی از سیستم‌های حرارتی و دینامیکی می‌تواند منجر به تکوین و تشدید شرایط پایدار جوی و حاکمیت شرایط وارونگی گردیده و تمرکز ذرات کربن سیاه را در لایه مجاور سطح زمین تشدید نماید. وارونگی هوا از ویژگی‌های طبیعی کلان‌شهر تهران و تعداد زیادی از دیگر کلان‌شهرها و شهرهای بزرگ ایران می‌باشد که شرایط را برای آلودگی هرچه بیشتر هوا در ماه‌های سرد سال فراهم می‌آورد. افزون بر عامل‌های طبیعی بیان



شکل ۲- نمودار سری زمانی میانگین ماهانه غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)  
 Fig. 2- Time series diagram of the average monthly BC concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Iran (1980-2019)



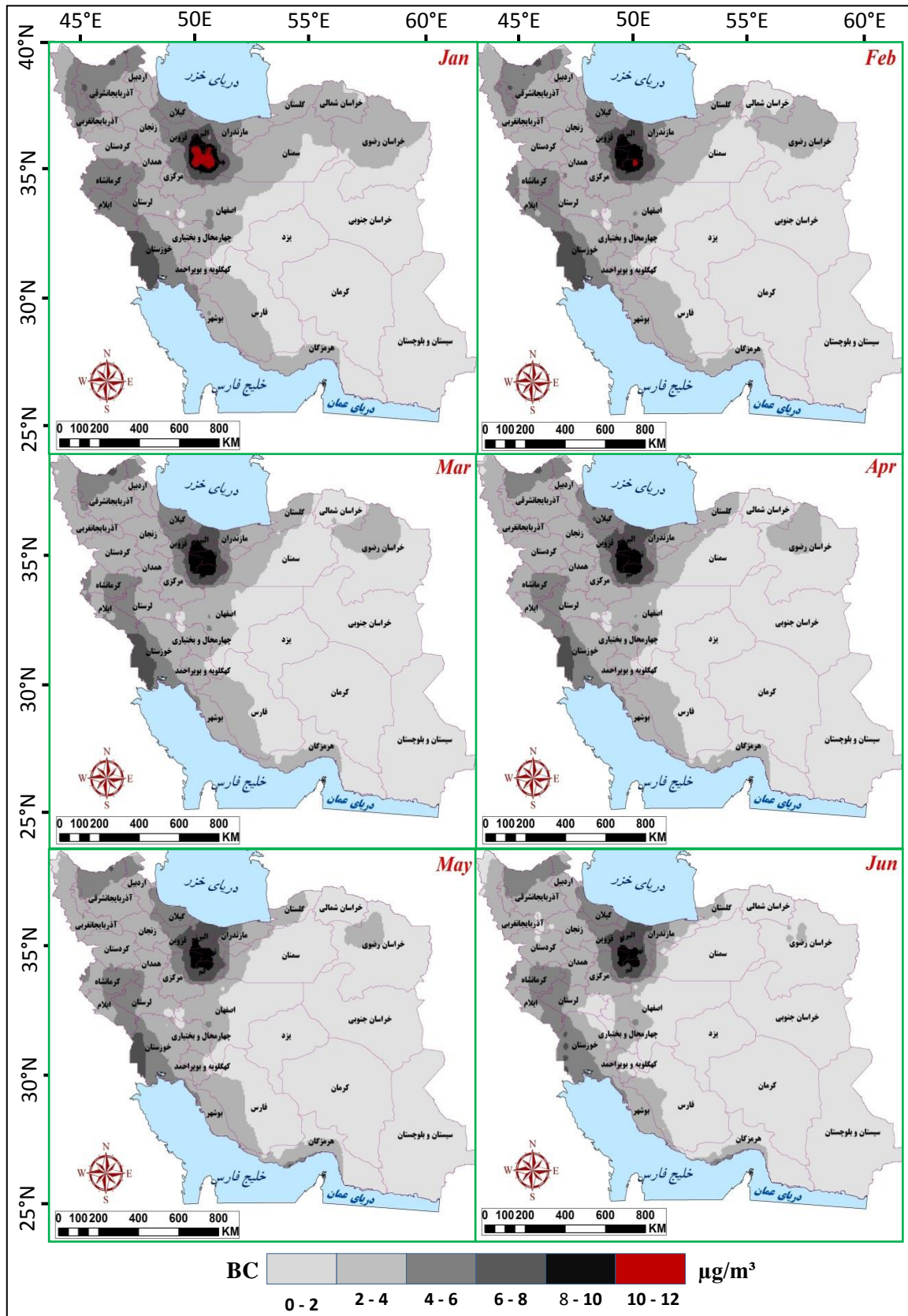
شکل ۳- نمودار سری زمانی میانگین ماهانه حداقل و حداکثر غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)  
 Fig. 3- Time series diagram of the average monthly minimum and maximum concentrations of BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Iran (1980-2019)

جدول ۱- میانگین ماهانه غلظت کربن سیاه در ایران ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) طی دوره آماری (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)

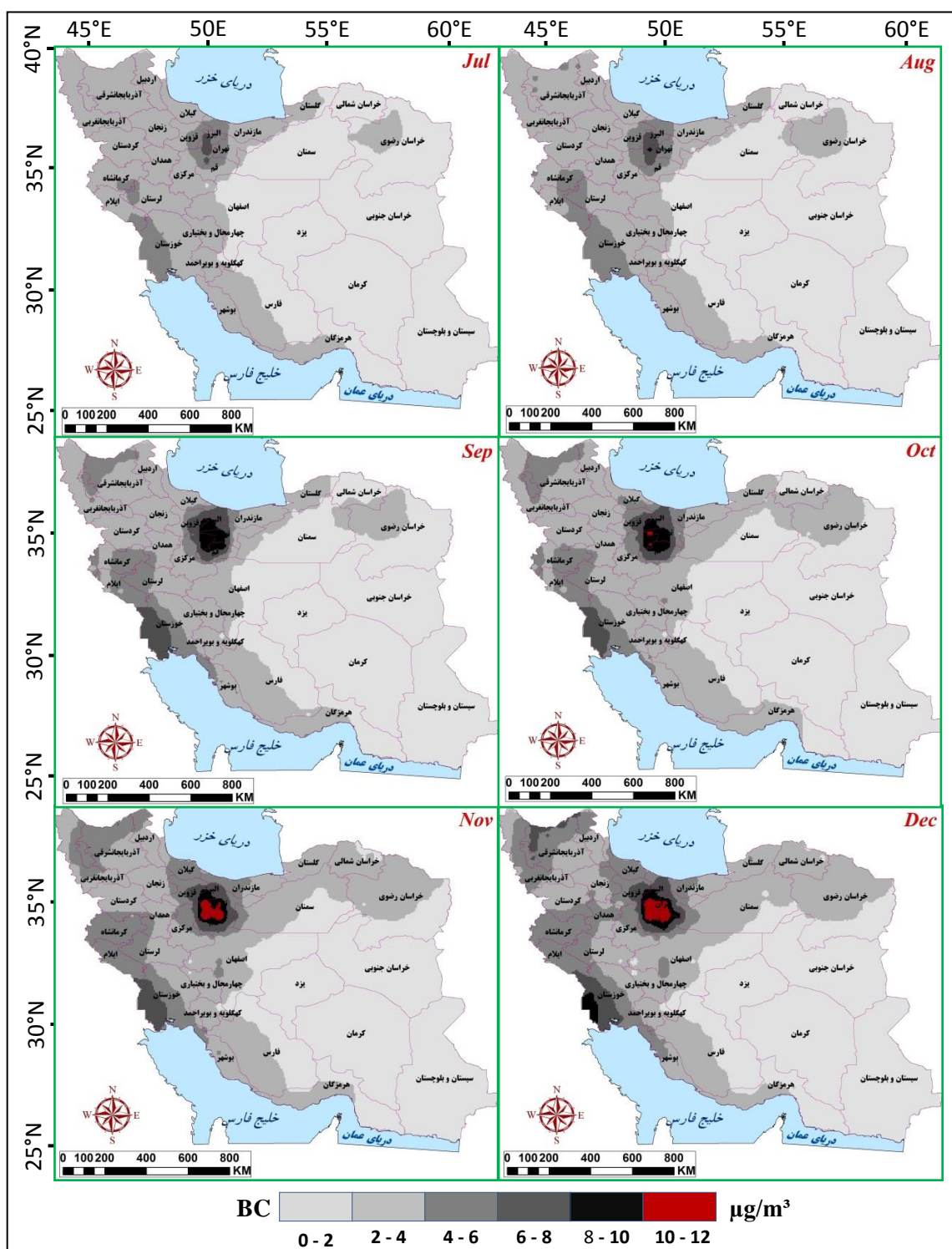
Table 1. Average monthly BC concentration in Iran ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) during the statistical period (1980-2019)

ماه Month	ژانویه January	فوریه February	مارس March	آوریل April	می May	ژوئن June	ژوئلی July	آگوست August	سپتامبر September	اکتبر October	نوامبر November	دسامبر December
میانگین Average	2.56	2.29	2.14	2.04	1.93	1.85	1.98	2.10	2.17	2.38	2.54	2.65
حداکثر Maximum	3.91 (2017)	4.08 (2017)	3.54 (2019)	3.39 (2017)	3.10 (2012)	3.53 (2012)	2.74 (2019)	2.58 (2019)	3.06 (2012)	3.24 (2018)	3.61 (2018)	3.69 (2014)
حداقل Minimum	1.77 (1392)	1.72 (1992)	1.63 (1992)	1.39 (1992)	1.35 (1992)	1.27 (1992)	1.33 (1992)	1.33 (1992)	1.39 (1992)	1.51 (1992)	1.48 (1992)	1.69 (1992)





شکل ۴- پراکنش مکانی میانگین ماهانه غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)  
 Fig.4- Spatial distribution of the monthly average BC concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Iran (1980-2019)



شکل ۵- پراکنش مکانی میانگین ماهانه غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)

Fig. 5- Spatial distribution of the monthly average BC concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Iran (1980-2019)

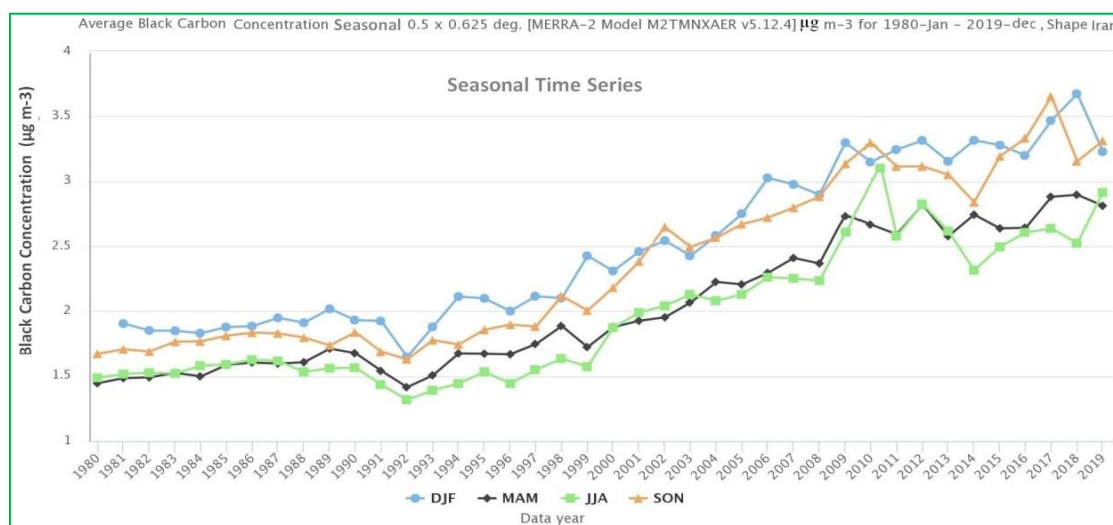
در گستره ایران نشان می‌دهد. نتایج حاصل بیانگر بیشترین میزان تمرکز کربن سیاه در فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه یا DJF) و کمترین میزان آن

### تحلیل فصلی

شکل ۶ و جدول ۲ آنالیز حاصل از داده‌های آماری میانگین فصلی غلظت کربن سیاه را در فصل‌های چهارگانه

کمیته کربن سیاه فصلی در پهنه جهانی به طور کامل منطبق است. شکل ۷ نیز توزیع فضایی میزان کربن سیاه را برای فصل‌های چهارگانه‌ی بهار (MAM)<sup>۷</sup>، تابستان (JJA)<sup>۸</sup>، پاییز (SON)<sup>۹</sup> و زمستان (DJF)<sup>۱۰</sup> نشان می‌دهد. براساس این شکل‌ها میزان کربن سیاه از بیشترین میزان به کمترین میزان به ترتیب مربوط به فصل‌های زمستان (DJF)، پاییز (SON)، بهار (MAM) و تابستان (JJA) می‌باشد. در میان تمامی فصل‌های مورد مطالعه (۱۶۰ فصل) بیشترین میزان کربن سیاه مربوط به زمستان سال ۲۰۱۸ ( $3.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) و کمترین میزان آن مربوط به تابستان ۱۹۹۲ ( $1.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) می‌باشد. به عبارتی دیگر می‌توان گفت بیشترین میزان غلظت فصلی کربن سیاه حدود سه برابر میزان کمیته فصلی آن در فصل‌های مورد مطالعه بوده است.

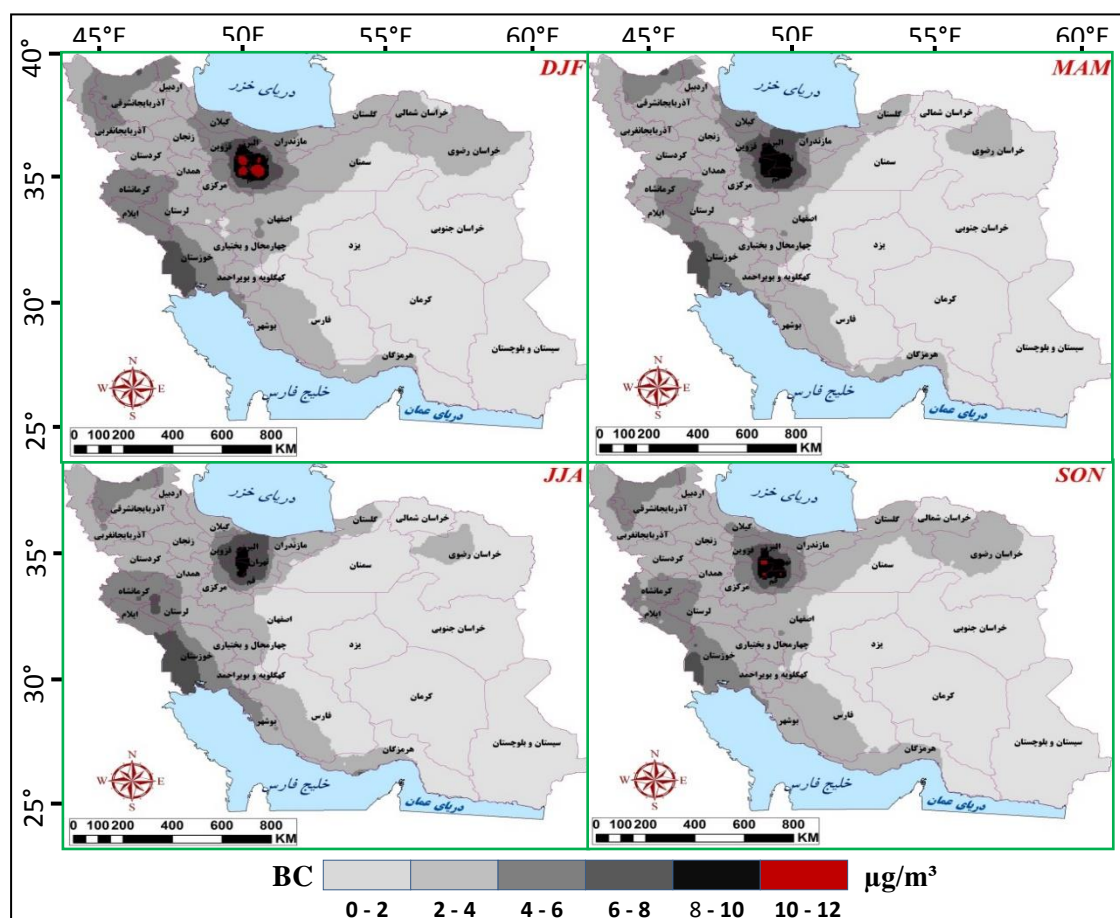
مربوط به فصل تابستان (ماه‌های ژوئن، ژولای و آگوست یا JJA) است. همان‌طوریکه در مباحث بالا نیز اشاره گردید، از جمله مهمترین عامل‌های اقلیمی (جغرافیایی) مؤثر در افزایش میزان کربن سیاه در فصل‌های سرد سال، می‌توان به وارونگی‌های دمایی اشاره کرد که به دو صورت تابشی و سینوپتیکی ایجاد می‌شوند. وارونگی‌های تابشی بر اثر سرد شدن شدید سطح زمین و وارونگی‌های سینوپتیکی به‌طور عمده بر اثر استقرار سیستم‌های پرفشار پایدار جوی تشکیل می‌شوند. هر دو پدیده از ویژگی‌های اصلی شرایط آب و هوایی ایران در دوره سرد سال می‌باشند. افزون بر موارد مطرح شده، از دیگر عامل‌های مؤثر بر افزایش میزان کربن سیاه در این دوره از سال، می‌توان به بالا بودن حجم ترافیک و افزایش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی اشاره کرد. این نتایج با بیشینه و



شکل ۶- نمودار سری زمانی میانگین فصلی غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)  
Fig. 6- Time series diagram of the average seasonal BC concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Iran (1980-2019)

جدول ۲- میانگین فصلی غلظت کربن سیاه در پهنه ایران ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) طی دوره‌ی آماری (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)  
Table 2. Seasonal average BC concentration in Iran ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) during the statistical period (1980-2019)

فصل Season	زمستان Dec./Jan./Feb.	بهار Mar./Apr./May	تابستان Jun./Jul./Aug.	پاییز Sep./Oct./Nov.
میانگین Average	2.5	2.05	1.99	2.38
حداکثر Maximum	3.67 (2018)	2.90 (2018)	3.44 (2010)	3.65 (2017)
حداقل Minimum	1.65 (1992)	1.41 (1992)	1.31 (1992)	1.63 (1992)



شکل ۷- پراکنش مکانی میانگین فصلی غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)

Fig. 7- Spatial distribution of the seasonal average BC concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Iran (1980-2019)

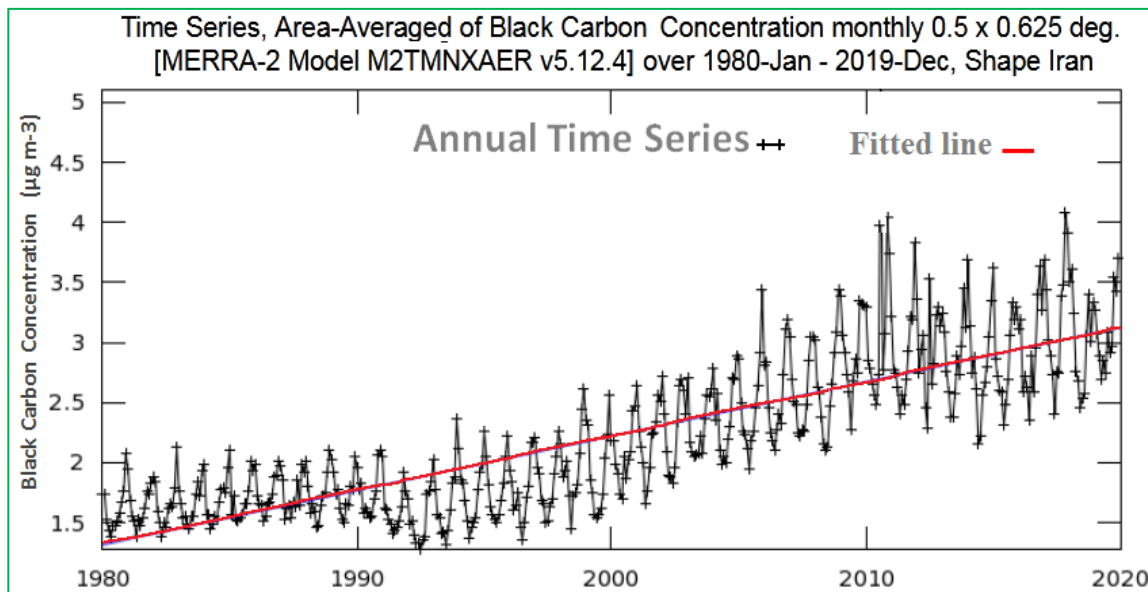
### تحلیل سالانه

سال ۲۰۰۰ میلادی شروع گردیده و روند افزایشی آن تا اواخر دوره‌ی آماری تداوم داشته است (جدول ۳). درمیان تمامی سال‌های مورد مطالعه به ترتیب (از چپ به راست) سال‌های (۲۰۱۸ - ۲۰۱۹ - ۲۰۱۰ - ۲۰۱۷) دارای بیشترین تمرکز کربن سیاه و سال‌های (۱۹۸۱ - ۱۹۹۱ - ۱۹۸۰ - ۱۹۹۲) از کمترین میزان آلاینده بیان شده برخوردار بوده‌اند. به‌طور کلی سال‌های مربوط به نیمه دوم دوره آماری (۲۰ سال دوم) به طرز بسیار بارزی از تمرکز بسیار بالاتر کربن سیاه نسبت به نیمه اول دوره (۲۰ سال اول) برخوردار بوده‌اند. در بررسی دیگری که توزیع فضایی کربن سیاه در گستره ایران برای سال‌های انتهایی نماینده دوره‌های ۱۰ ساله (۲۰۱۹ - ۲۰۱۰ - ۲۰۰۰ - ۱۹۹۰ - ۱۹۸۰) صورت گرفت، به‌خوبی مشخص گردید که میزان غلظت کربن سیاه در هر سال نسبت به سال نماینده دوره

شکل ۸ گراف تغییرات سری زمانی کربن سیاه را از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۹ نشان می‌دهد. براساس این شکل و محاسبه‌های انجام شده میانگین غلظت کربن سیاه در گستره ایران  $2/2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  برآورد گردید. بررسی روند تغییرات غلظت ذرات کربن سیاه به خوبی تأیید کننده‌ی افزایشی بودن روند غلظت این آلاینده است، به گونه‌ای که میانگین کربن سیاه در جو ایران از  $1/61 \mu\text{g}/\text{m}^3$  در سال ۱۹۸۰ به  $3/10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  در سال ۲۰۱۹ رسیده است. بدین مفهوم که از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۹ غلظت کربن سیاه حدود دو برابر افزایش یافته است. در یک بررسی دقیقتر که مقادیر کربن سیاه در طول دوره آماری ۴۰ ساله‌ی مورد مطالعه به ترتیب از بیشترین به کمترین میزان (به‌صورت نزولی) مرتب شده‌اند؛ افزایش ذرات کربن سیاه به‌طور آشکاری از

بویژه کلان‌شهرهای تهران و اهواز بوده است (شکل ۹). از دلیل‌های اصلی افزایش آلاینده در این نواحی، می‌توان به رشد بیش از حد جمعیت سال‌های اخیر دو کلان‌شهر تهران و اهواز به دلیل مهاجرپذیری، افزایش زیاد وسایل نقلیه و بیشتر بدون استاندارد، تمرکزگرایی صنایع و تشدید فعالیت آن‌ها اشاره نمود.

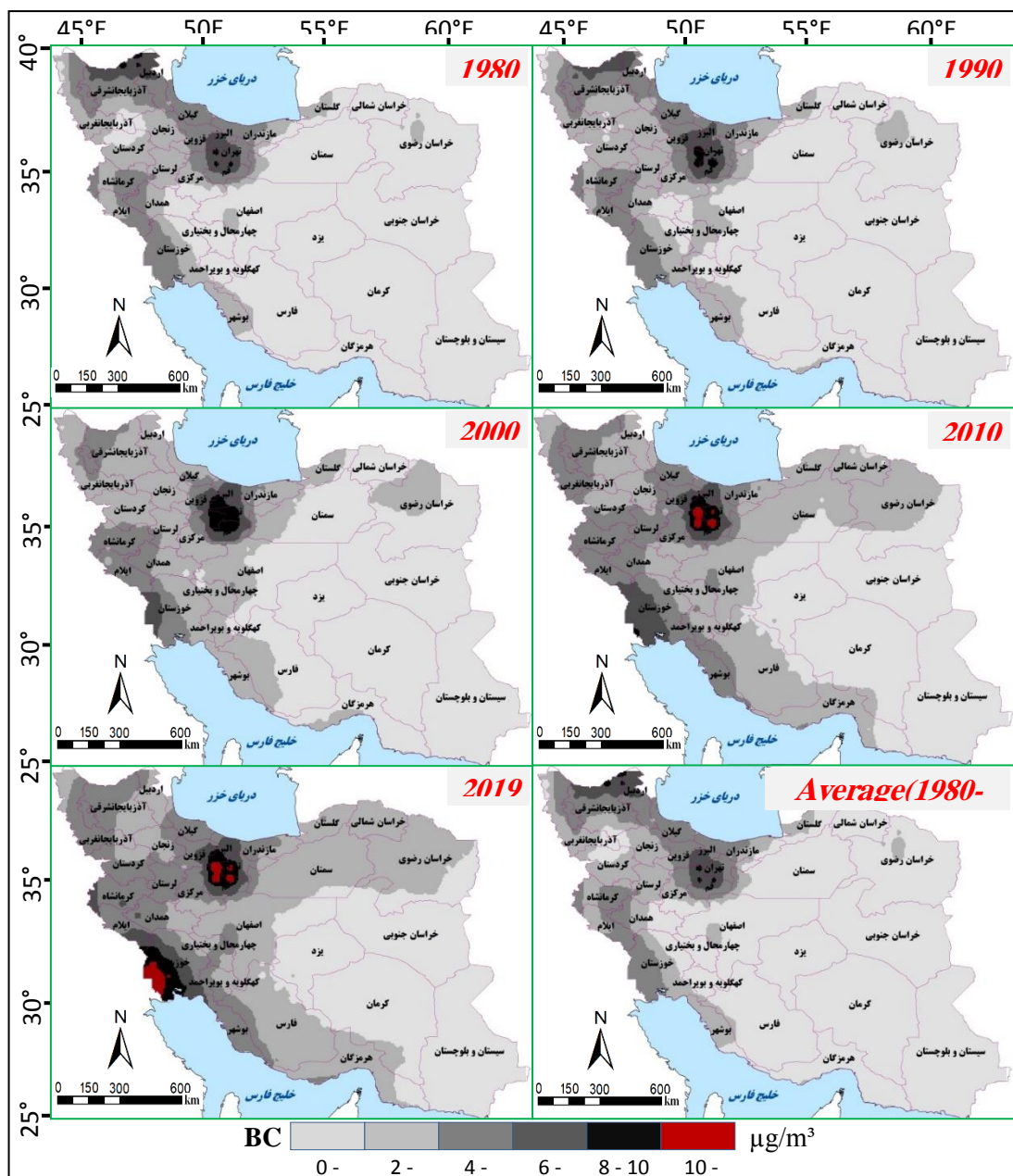
۱۰ ساله قبل از خود از افزایش قابل ملاحظه‌ای در پهنه‌ی ایران برخوردار بوده است. به‌طوریکه در این میان، سال ۲۰۱۹ از بیشترین میزان غلظت کربن سیاه در میان تمامی ۵ سال انتخابی نماینده برخوردار بوده است. نکته قابل توجه دیگر در بررسی غلظت کربن سیاه در گستره ایران افزایش شتابان این آلاینده در نیمه غربی ایران و



شکل ۸- نمودار سری زمانی و روند میانگین ماهانه غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)  
 Fig. 8- Time series diagram and trend of the average monthly BC concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in Iran (1980-2019)

جدول ۳- میانگین سالانه غلظت کربن سیاه (به ترتیب نزولی) در پهنه ایران ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )  
 Table 3. Annual average concentration of BC (descending order) in Iran ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

ردیف (Row)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
سال (Year)	2017	2010	2019	2018	2012	2016	2009	2015	2011	2013
میانگین (Average)	3.21	3.17	3.10	3.01	2.96	2.94	2.93	2.90	2.89	2.85
ردیف (Row)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
سال (Year)	2014	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000
میانگین (Average)	2.82	2.63	2.60	2.55	2.48	2.39	2.30	2.29	2.19	2.05
ردیف (Row)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
سال (Year)	1998	1999	1997	1995	1990	1989	1996	1986	1987	1988
میانگین (Average)	1.69	1.93	1.83	1.81	1.76	1.75	1.75	1.74	1.74	1.73
ردیف (Row)	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
سال (Year)	1985	1994	1993	1984	1982	1983	1981	1991	1980	1992
میانگین (Average)	1.71	1.71	1.68	1.61	1.66	1.65	1.63	1.61	1.61	1.51



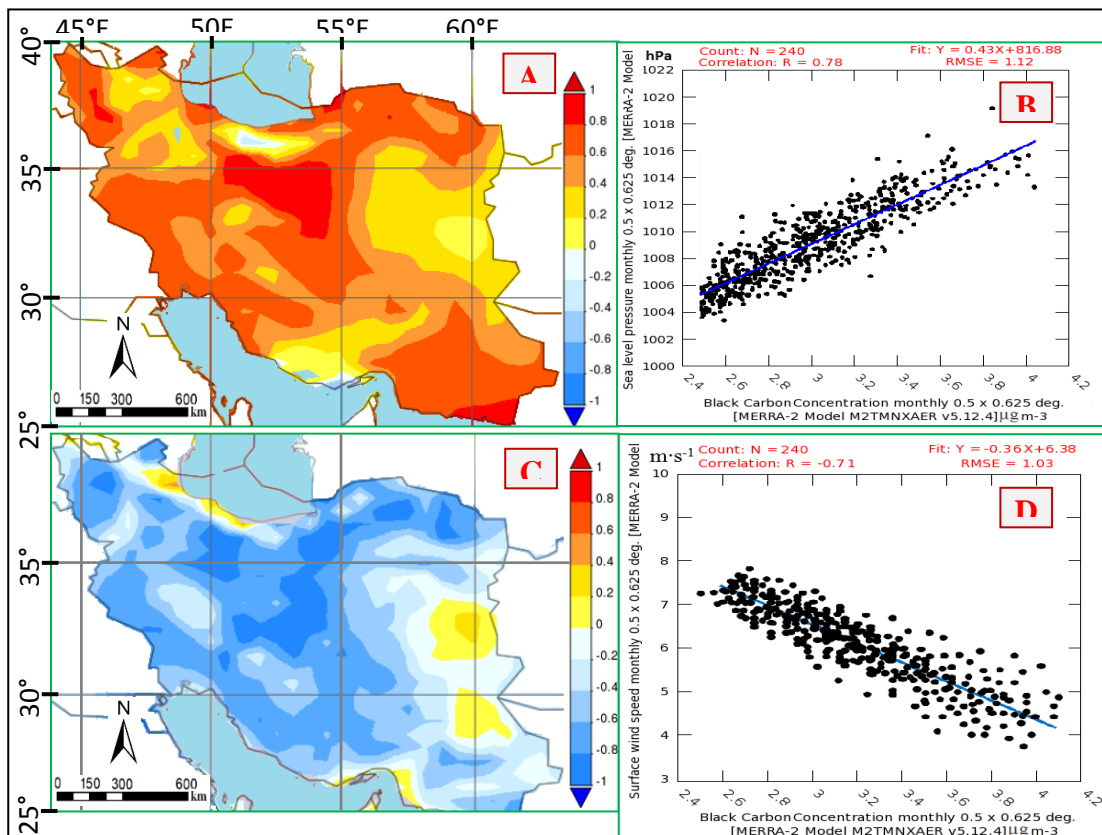
شکل ۹- پراکنش مکانی میانگین سالانه غلظت کربن سیاه ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) سال‌های نماینده و کل دوره آماری در ایران  
 Fig. 9- Spatial distribution of the annual average BC concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) for the representative years and the total statistical period in Iran

تهویه هوا می‌باشد. باد، مؤثرترین پدیده هواشناسی در انتقال و پخش آلاینده‌ها، هم در جهت افقی و هم در جهت قائم بوده و همان‌طوری که پایداری هوا موجب تشدید و انباشتگی آلاینده‌های هوا می‌شود، باد موجب پخش، رقیق‌سازی و پاک‌سازی آن می‌شود. بر همین اساس به بررسی ارتباط آلاینده کربن سیاه (متغیر وابسته) و میزان همبستگی آن با پارامتر فشار هوا و سرعت باد (تابعی از

ارتباط‌سنجی آلاینده‌ی کربن سیاه با پارامترهای هواشناسی (فشار و باد) چگونگی توزیع مواد آلاینده بعد از تولید، تابعی از سیستم‌های فشار هوا (کم فشار و پرفشار) بوده و در واقع متأثر از شرایط جوی حاکم می‌باشد. فشار جو یکی از فراسنج‌های هواشناختی است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و تغییرات آن عامل اصلی شکل‌گیری باد و

کلان‌شهرها فراهم می‌نماید. این شرایط در کنار سایر عامل‌های جغرافیایی به‌طور عموم منجر به تضعیف شدت باد می‌گردد. بنابراین کمیت باد در گستره جغرافیایی کشور ایران با فشار هوا رابطه معکوس دارد. بر همین اساس بنابر رابطه رگرسیون خطی؛  $0.78$  همبستگی مثبت معنی‌دار بین غلظت آلاینده‌ی کربن سیاه با فشار هوا (شکل ۱۰: A, B) و  $0.71$  همبستگی منفی معنی‌دار میان غلظت این آلاینده و میانگین سرعت باد وجود داشت (شکل ۱۰: C, D). به‌طور کلی می‌توان گفت رابطه معنی‌دار مستقیم میان فشار هوا و غلظت کربن سیاه و رابطه معنی‌دار معکوس میان میان سرعت باد با آن در گستره جغرافیایی ایران وجود دارد. به همین دلیل بیشترین میزان غلظت کربن سیاه منطبق بر دوره سرد سال (افزایش فشار هوا = افزایش غلظت BC) و کمترین میزان آن منطبق بر دوره گرم سال (افزایش سرعت باد = کاهش غلظت BC) است.

فشار) به‌عنوان متغیرهای مستقل با استفاده از رابطه رگرسیون خطی پیروسون پرداخته شد. نقشه و شکل‌های همبستگی به خوبی بیانگر این است که غلظت آلاینده کربن سیاه با متغیر فشار رابطه مستقیم و با سرعت باد رابطه‌ی معکوس دارد. این بدان معناست که غلظت آلاینده کربن سیاه، در دوره سرد سال که گستره ایران بیشتر تحت حاکمیت هوای سرد توأم با فشار بیشتر هوا قرار دارد از غلظت بیشتری برخوردار می‌باشد. زیرا که سیستم‌های پرفشار دارای شرایط نشست هوا در نواحی تحت سیطره خود بوده و بدین ترتیب نزول هوا سبب بروز وارونگی فرونشینی می‌شود. به عبارتی دیگر در دوره سرد سال بر اثر استقرار هوای سرد و بیشتر پایدار بر فراز کشور ایران، آسمان بدون ابر بویژه در طول شب، سبب سرمایش سطح زمین گردیده و شرایط مطلوبی را برای شکل‌گیری پدیده اینورژن در بیشتر نقاط از جمله محدوده جغرافیایی



شکل ۱۰- نقشه و نمودار همبستگی میان غلظت کربن سیاه با فشار هوا (A, B) و سرعت باد (C, D) در ایران (۱۹۸۰ - ۲۰۱۹)

Fig. 10- Map and correlation diagram between BC concentration and meteorological parameters of air pressure (A, B) and wind speed (C, D) in Iran (1980-2019)

## نتیجه گیری

این پژوهش بر مبنای داده‌های حاصل از مدل MERRA-2 که از جمله مدل‌های پرکاربرد در مطالعات اتمسفری بوده و برای آشکارسازی آلودگی هوا نیز کاربرد دارد، برای پایش آلاینده کربن سیاه در گستره ایران انجام گرفت. نتایج حاصل به‌خوبی درک روشنی از غلظت کربن سیاه (BC) را در جو ایران نشان داد. این نتایج که از واکاوی آماری و اعمال الگوریتم‌های بهینه روی اطلاعات مکان‌دار<sup>۱۱</sup> آلاینده کربن سیاه در گستره جغرافیایی کشور ایران حاصل گردید، بیانگر تفاوت آشکار در توزیع زمانی و مکانی غلظت کربن سیاه در طول دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۹ - ۱۹۸۰) بوده است. براساس آنالیزهای انجام شده، بیشترین میزان غلظت آلاینده کربن سیاه در ماه‌های دسامبر، ژانویه و نوامبر و کمترین میزان آن در ماه‌های ژوئن، می و ژولای برآورد گردید. به‌عنوان نمونه، میانگین غلظت این آلاینده در ماه دسامبر  $2/65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  و در ماه ژوئن  $1/85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  بوده است. همچنین در میان سری زمانی کل ماه‌های مورد مطالعه، بیشترین میزان کربن سیاه در نوامبر ۲۰۱۷ ( $4/08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) و کمینه آن در ژولای ۱۹۹۲ ( $1/27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) برآورد گردید. به‌عبارتی دیگر، غلظت کربن سیاه در ماه پیشینه بیش از سه برابر میزان آن در ماه کمینه بوده است. آنالیز فصلی نیز بیانگر تفاوت‌های معنادار غلظت کربن سیاه در فصل‌های چهارگانه می‌باشد به نحوی که میزان کربن سیاه از بیشترین میزان فصلی در فصل زمستان (DJF) به میزان ( $2/5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) تا کمترین غلظت آن به مقدار ( $1/99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) در فصل تابستان (JJA) متغیر است. بررسی سری زمانی سالانه نیز گویای افزایشی بودن روند غلظت کربن سیاه در گستره جغرافیایی ایران می‌باشد. به‌طوری‌که میانگین کربن سیاه در جو ایران از  $1/61 \mu\text{g}/\text{m}^3$  در سال ۱۹۸۰ به  $3/10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  در سال ۲۰۱۹ رسید. روند افزایشی این آلاینده بویژه از سال ۲۰۰۰ میلادی به بعد شیب بیشتری به خود گرفته است. نمود روند افزایشی آلاینده بیان شده را می‌توان در میانگین بالای غلظت آن در

سال‌های آخر دوره آماری از قبیل سال‌های ۲۰۱۷ با میانگین  $3/21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ، ۲۰۱۹ با میانگین  $3/10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ، ۲۰۱۸ با میانگین  $3/01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  و ۲۰۱۵ با میانگین  $2/90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  در مقایسه با سال ۱۹۹۲ با میانگین  $1/50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  تبیین نمود. از سویی دیگر تفاوت‌های معنادار مکانی غلظت کربن سیاه در گستره ایران و تشدید غلظت آن در بسیاری از نواحی به‌طور کامل مشهود است. در این میان میزان قابل ملاحظه غلظت کربن سیاه در نیمه غربی ایران و گسترش زبانه‌های آن به موازات شمال و جنوب، بیانگر تراکم بالای جمعیت، بالا بودن تعداد خودروها، تعدد بالای صنایع، گردشگرپذیری و ... می‌باشد. البته نقش عامل‌های طبیعی (شکل توپوگرافی) از جمله نحوه استقرار سلسله جبال زاگرس و البرز را نباید نادیده گرفت. در این میان غلظت کربن سیاه بر فراز تعدادی از کلان‌شهرهای واقع در این ناحیه از جمله دو کلان‌شهر تهران و اهواز تأمل برانگیز است. به‌طوری‌که در برخی از ایام سال غلظت این آلاینده در کلان‌شهر تهران تا  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  افزایش یافته است. این وضعیت در کنار افزایشی بودن روند آن، به‌طور کامل هشدار دهنده است. افزون بر نتایج بالا، آلاینده کربن سیاه از برخی پارامترهای هواشناسی از قبیل فشار هوا و سرعت باد متأثر است. براساس تحلیل همبستگی پیرسون، آلاینده گفته شده دارای همبستگی مثبت معنی‌دار با فشار هوا ( $R = 0.78$ ) و منفی معنی‌دار با سرعت باد ( $R = 0.71$ ) است. این بدان معناست که پارامترهای هواشناسی به فراخور شرایط زمانی، در تشدید یا تضعیف غلظت آلاینده کربن سیاه در گستره ایران نقش اساسی دارند. به‌طور کلی صرف‌نظر از سازوکارهای تکوین، ماهیت و انتشار این آلاینده در نواحی مختلف ایران، رفتار غلظت این آلاینده در بستر زمان، بیانگر هشدار دهنده بودن خطر آن در بخش‌های وسیعی از کشور ایران می‌باشد. بنابراین اتخاذ راهکارهای مدیریتی و اجرایی لازم در راستای کاهش این آلاینده، بویژه در کلان‌شهرهای همراه با غلظت بالای کربن سیاه امری ضروری به‌نظر می‌رسد.



<sup>5</sup> Aerosol Robotic Network

<sup>6</sup> Advanced Very High-Resolution Radiometer

<sup>7</sup> March, April, May

<sup>8</sup> June, July, August

<sup>9</sup> September, October, November

<sup>10</sup> December, January, February

Aaheim, H.A., Fuglestedt, J.S. and Godal, O., 2006. Cost's savings of a flexible multi-gas climate policy. *The Energy Journal*. 13, 485-502.

Abbatt, J.P., Benz, S., Cziczo, D.J., Kanji, Z., Lohmann, U. and Mohler, O., 2006. Solid ammonium sulfate aerosols as ice nuclei: A pathway for cirrus cloud formation. *Science*. 313, 1770-1779.

Abdul-Razzak, H. and Ghan, S.J., 2000. A parameterization of aerosol activation: Multiple aerosol types. *Journal Geophysical Research*. 105, 6837- 6844.

Afyoni, M. and Arfan-Manesh, M., 2015. *Environmental pollution: water, soil and air*. Eleventh Edition., Arkan Danesh Publications, Isfahan, Iran.

Ajami-Trichan, N., Omidvar, K. and Shahaeyan, S., 2015. Assessing the effect of air pollution on mortality from heart attacks in Mashhad. *The First International Conference and the Fourth National Conference on Tourism, Geography and Sustainable Environment*, Hamedan.P.36. (In Persian with English Abstract).

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

Bell, G., Mora, S., Greenland, P., Tsai, M., Gill, E. and Kaufman, J.D., 2017. Association of air pollution exposures with high density lipoprotein cholesterol and particle number: the multi-ethnic

## پی‌نوشت‌ها

<sup>1</sup> Black Carbon

<sup>2</sup> The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2

<sup>3</sup> The Goddard Earth Observing System Model, Version 5

<sup>4</sup> Assimilation Data Accident System

## منابع

study of atherosclerosis. *National Library of Medicine*. 7, 976-982.

Bian, H., Colarco, P.R., Chin, M., Chen, G., Rodriguez, J.M., Liang, Q. and Diskin, G., 2013. Source attributions of pollution to the Western Arctic during the NASA ARCTAS field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 13, 4707-4721.

Bigdeli, A., 2001. The effect of climate and air pollution in Tehran on heart attack disease. *Journal of Geographical Research*. 6, 27-41. (In Persian).

Bisiaux, M.M., Edwards, R., McConnell, J.R., Albert, M.R., Anschutz, H., Neumann, T., Isaksson, E. and Penner, J.E., 2011. Variability of black carbon deposition to the East Antarctic Plateau, AD 1800–2000. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 11, 31091–31114.

Bisiaux, M.M., Edwards, R., McConnell, J.R., Curran, M.A., Vanommen, T.D., Smith, A.M., Neumann, T.A., Pasteris, D.R., Penner, J.E. and Taylor, K., 2012. Changes in black carbon deposition to Antarctica from two high-resolution ice core records, 1850-2000 AD. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 12, 4107-4115.

Bloom, S., Takacs, L., DaSilva, A. and Ledvina, D., 1996. Data assimilation using incremental analysis updates. *Monthly Weather Review*. 124, 1256-1271.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W. and Forster, P., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *Journal of Geophysical Research*:

Atmosphere. 118, 5380-5552.

Buchard, V., Silva, A.M., Colarco, P.R., Darmenov, A., Randles, C.A., Govindaraju, R., Torres, O., Campbell, J. and Spurr, R., 2015. Using the OMI aerosol index and absorption aerosol optical depth to evaluate the NASA MERRA Aerosol Reanalysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 15, 5743-5760.

Buchard, V., Silva, A.M., Randles, C.A., Colarco, P., Ferrare, R., Hair, J., Hostetler, C., Tackett, J. and Winker, D., 2016. Evaluation of the surface PM 2.5 in Version 1 of the NASA MERRA Aerosol Reanalysis over the United States. *Atmospheric Environment*. 125, 100-111.

Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Torres, O., Holben, B.N., Duncan, B.N., Martin, R.V., Logan, J.A., Higurashi, A. and Nakajima, T., 2002. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and Sun photometer measurements. *Journal Atmospheric Science*. 59, 461-483.

Colarco, P., Dasilva, A., Chin, M. and Diehl, T., 2010. Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 115, 1-17.

Dubovik, O., Smirnov, A., Holben, B.N., King, M.D., Kaufman, Y.J., Eck, T.F. and Slutsker, I., 2000. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 105, 9791-9806.

Dutkiewicz, V., Alvi, S., Ghauri, B.M., Choudhary, M. and Husain, L., 2009. Black carbon aerosols in urban air in South Asia. *Journal Atmospheric Environment*. 4310, 1737-1744.

Farzad, K., Taheri, A. and Khorsandi, B., 2018. Estimation of health effects due to exposure to carbon black pollution using BenMAP software in Tehran in the second half of 2017 and the first six months of 2018. 7th National Conference on Air and Sound Pollution Management, Tehran, Shahid Beheshti University, Clean Air Scientific Association Iran. P.76.

Hansen, A.D., Rosen, H. and 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.

Hoek, G., Krishnan, R.M. and Beelen, R., 2013. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environ Health*. 12, 43-47.

Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, J. and Nakajima, T., 1998. AERONET a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing Environment*. 66, 1-16.

Inness, A., Inness, A., Ades, M., Agustipanareda, A., Barre, J., Benedictow, A., Blech Schmidt, A.M. and Dominguez, J.J., 2019. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry Physic*. 9, 3515-3556.

Jose, S., and Singh, S., 2018. Long term characteristics of black carbon measurements at an urban location in IGP and the assessment of MERRA-2 black carbon dataset. *American Geophysical Union*. 32, 95-113.

Julia, S., Mark, F., Shichang, K., Michael, S., Qianggong, Z., Junming, G., Yang, L., Margit, S. and Daniel F., 2017. Modulation of snow reflectance and snowmelt from Central Asian glaciers by anthropogenic black carbon. *Scientific*

- Reports. 7, 465-478.
- Julie, C., 2010. Black carbon a significant factor in melting of himalayan glaciers. *Bringing Science Solutions*. 17, 486-510.
- Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K and Sarofim, M.C., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 118, 5380-5552.
- Kaspari, S.D., Painter, T.H., Gysel, M., Skiles, S.M. and Schwikowski, M., 2014. Seasonal and elevational variations of black carbon and dust in snow and ice in the Solu-Khumbu, Nepal and estimated radiative forcings. *Atmospheric Chemistry Physic*. 14, 8089-8103.
- Kaspari, S.D., Schwikowski, M., Gysel, M., Flanner, M.G., Kang, S. and Hou, S., 2011. Recent increase in black carbon concentrations from a Mt. Everest ice core spanning 1860–2000 AD. *Geophysical Research Letter*. 38, 1-6.
- Kristofer, L., Krishna, P.V., Thanh, T. and Nhat, N., 2018. Analysis of air pollution over Hanoi, Vietnam using multi-satellite and MERRA reanalysis datasets. *PLoS ONE. journal Pone*. 13, 1-17.
- Laden, F., Schwartz, J. and Speizer, F.E., 2006. Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard six cities study. *National Library of Medicine*. 173, 667-672.
- Lerato, S., 2019. Long-term observation of global black carbon, organic carbon and smoke using CALIPSO and MERRA-2 data. *Remote Sensing Letters*. 10, 373-380.
- Mckenzie, S. and Thomas, P.m., 2017. Daily evolution in dust and black carbon content snow grain size and snow albedo during snowmelt Rocky Mountains Colorado. *Journal of Glaciology*, 63, 118-132.
- Menon, S., Koch, D., Beig, G., Sahu, S., Fasullo, J. and Orlikowski, D., 2010. Black carbon aerosols and the third polar ice cap, *Atmospheric Chemistry and Physics*. 10, 4559-4571.
- Ming, J., Xiao, C., Cachier, H., Qin, D. and Qin, X., 2009. Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos. *Journal of Atmospheric Research*. 92, 132-154.
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., Bacmeister, J., Song, I.S. and Eichmann, A., 2012. The GEOS-5 atmospheric general circulation model: mean climate and development from MERRA to fortuna; NASA technical report series on global modeling and data assimilation. *Greenbelt*. 117, 28-45.
- Nowottnick, E., Colarco, P., Ferrare, R., Chen, G., Ismail, S., Anderson, B. and Browell, E., 2010. Online simulations of mineral dust aerosol distributions: Comparisons to NAMMA observations and sensitivity to dust emission parameterization. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 115, 1-19.
- Omidvar, K. and Narangi-Fard., 2013. Analysis of similar patterns of Farin days contaminated with suspended particles in Shiraz. *Journal of Geography and Environmental Studies*. 2, 49-62. (In Persian).
- Pope, C.A and Dockery, D.W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 56, 709–742.
- Puett, R.C., Hart, J.E. and Yanosky, J.D., 2009. Chronic fine and coarse particulate exposure, mortality and coronary heart disease in the Nurses'

- Health Study. *Environ Health Perspect.* 117, 1697–1701.
- Putero, D., Landi, T.C., Cristofanelli, P., Marinoni, A., Laj, P. and Duchi, R., 2014. Influence of open vegetation fires on black carbon and ozone variability in the southern Himalayas. *Environmental Pollution.* 184, 597–604.
- Qin, W., Zhang, Y., Chen, J., Yu, Q., Cheng, S., Li, W., Liu, X. and Tian, H., 2019. Variation, sources and historical trend of black carbon in Beijing, China based on ground observation and MERRA-2 reanalysis data. *Environmental Pollution.* 245, 853-863.
- Raispour, K., Fahimi, H., Poorkarim, R., 2020. Analysis of Spatio-temporal Distribution of Surface Wind Speed in Geographical Area of Iran Using MERRA-2 Model. *Journal of Natural Geography.* 13 (48), 89-104. (In Persian).
- Ramanathan, V. and Carmichael, G., 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience.* 1, 221–227.
- Randles, C.A., Dasilva, A., Buchard, V., Colarco, P.R., Darmenov, A.S., Govindaraju, R.C., Smirnov, A., Ferrare, R.A., Hair, J.W. and Shinozuka, Y., 2017. The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980-onward, Part I: System description and data assimilation evaluation. *Journal Climatology.* 30, 6823-6850.
- Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E. and Bosilovich, M.G., 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal Climatology.* 24, 3624–3648.
- Rizza, U., Miglietta, M.M., Mangia, C., Ielpo, P., Morichetti, M., Iachini, C., Virgili, S. and Passerini, G., 2018. Sensitivity of WRF-Chem model to land surface schemes: Assessment in a severe dust outbreak episode in the Central Mediterranean (Apulia Region). *Atmospheric Research.* 201, 168–180.
- Shahbazi, H., Reyhanian, M., Hosseini, V. and 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, 44-56. (In Persian).
- Shariapoor, Z., Akbari-Bidakhti, A., 2014. Spatial distribution study of air pollutants in Tehran for the cold months of 201-2013. *Journal of Environmental Science and Technology.* 16, 149-166. (In Persian).
- Sitnov, S.A., Mokhov, I.I. and Likhosherstova, A.A., 2020. Exploring large-scale black-carbon air pollution over Northern Eurasia in summer 2016 using MERRA-2 reanalysis data. *Atmospheric Research.* 235, 1217-1228.
- Sterle, K.M., McConnell, J.R., Dozier, J., Edwards, R. and Flanner, M.G., 2013. Retention and radiative forcing of black carbon in the Eastern Sierra Nevada snow. *The Cryosphere.* 7, 365-374.
- Taheri, A., Ali-Asghari, P. and Hosseini, V., 2017. Investigating the effect of moving diesel vehicles in Tehran on black carbon pollution. *Quarterly Journal of Engineering Research.* 49, 19-28. (In Persian).
- Taheri, A., Ali-Asghari, P. and Hosseini, V., 2018. Evaluation of black carbon annual measurement data in Tehran and evaluation of particle specifications. 7th National Conference on Air and Sound Pollution Management. Tehran, Shahid Beheshti University, Iranian Clean Air Scientific Association. P.120. (In Persian).
- Virkkula, A., Chi, X., Ding, A., Shen, Y., Nie, W., Qi, X. and Petaja, T., 2015. On the interpretation

of the loading correction of the aethalometer. *Atmospheric Measurement Techniques*. 8, 4415-4427.

Wendl, I.A, Menking, J.A., Farber, R., Gysel, M., Kaspari, S.D., Laborde, M.J. and Schwikowski, M., 2014. Optimized method for black carbon analysis in ice and snow using the single particle soot photometer. *Atmospheric Measurement Techniques*. 7, 2667-2681.

Wu, W.S., Purser, R.J. and Parrish, D.F., 2002. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Monthly Weather Review*. 130, 2905-2916.

Yuan, C ., Mathieu, F., Cen, K. and Xiu-li, L., 2016. Long-term variation of black carbon and PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China with respect to meteorological conditions and governmental

measures. *Environmental Pollution*. 212, 269-278.

Zare, M., 2003. Quantitative and qualitative study of some air pollutants in Yazd city and urban planning to control it. Master's thesis. Yazd University. (In Persian).

Zhang, T., Wooster, M.J, Green, D.C. and Main, B., 2015. New field-based agricultural biomass burning trace gas, PM 2.5 and black carbon emission ratios and factors measured in situ at crop residue fires in Eastern China. *Atmospheric Environment*. 121,22-34.





Environmental Sciences Vol.19 / No.3 / Autumn 2021

99-122

## Long-term monitoring of the concentration of carbon black pollutants in Iran using NASA/MERRA-2 base model data

Koozad Raispour<sup>1\*</sup> and Younes Khosravi

<sup>1</sup> Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

<sup>2</sup> Department of Environment, Faculty of Basic Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 2020.10.28 Accepted: 2021.06.03

**Raispour, K. and Khosravi, Y., 2021.** Long-term monitoring of the concentration of carbon black pollutants in Iran using NASA/MERRA-2 base model data. *Environmental Sciences*. 19(3): 99-122.

**Introduction:** The atmosphere is a dynamic and complex natural gas system whose pollution kills humans more than others. Air pollution occurs when large amounts of suspended particles or harmful substances enter the atmosphere. Suspended particles with a diameter of fewer than 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) are among the most important air pollutants. Black carbon (BC) particles are one of the most important and dangerous components of  $\text{PM}_{2.5}$  suspended particles. The aim of this study was to analyze the behavior and time-space distribution of BC pollutants in Iran using the data of the MERRA-2 base model during a statistical period of 40 years (1980-2019).

**Material and methods:** In this study, black carbon data in NetCDF format with initial monthly and spatial time steps of  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$  were first extracted from the Earth data website. After extracting the data, qualitative control, pre-processing and, processing operations were performed. Then, the calculations were performed on monthly and seasonal matrices (on 740 pixels or networked points) using the facilities that the user's software applications ArcGIS, Grads, and Origin pro provide. In the last step, steps were taken to create raster, vector, charts layers and, information tables and the desired outputs were prepared.

**Results and discussion:** The use of MERRA-2 base model data has provided very good results of the spatio-temporal distribution of BC in Iran. The results of the study showed that the monthly and seasonal differences were significant. In terms of monthly differences, the highest amount of BC was estimated in December and the lowest in June. Among seasons, the highest and lowest levels of BC were related to the winter and summer. Spatially, the highest distribution of BC was observed in the western half of Iran, especially in the metropolises

---

\* Corresponding Author: *Email Address*. Raispour@znu.ac.ir  
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.33941>

of Tehran and Ahvaz. Analysis of the time series of BC concentrations in the Iranian atmosphere showed that the concentration of this pollutant increased during the statistical period and this increase occurred especially from 2000 AD onwards. Also, in the study of meteorological parameters affecting the concentration of BC, the results showed a significant positive correlation between the concentration of BC and air pressure and a significant negative correlation with wind speed.

**Conclusion:** The results showed a clear understanding of the concentration of BC in the Iranian atmosphere. We showed that BC pollution is affected by some meteorological parameters such as air pressure and wind speed. In general, regardless of the mechanisms of development, nature, and emission of this pollutant in different parts of Iran, the behavior of the concentration of this pollutant in the context of time indicates the warning of its danger in large parts of Iran. Therefore, it is necessary to take the necessary management and executive measures to reduce this pollution, especially in metropolitan areas with high concentrations of BC.

**Keywords:** Air pollution, Particulate matter, Temporal-spatial analysis, Black carbon, MERRA-2 model

