بررسی میزان تغییرات آلاینده‌های هوا در دوره انتشار ویروس کووید-۱۹ در ایران با استفاده از اطلاعات ماهواره سنتینل۵

سیاوش شامی[۱]، مهدی خوش لهجه آذر[۲]، زهرا قربانی[۳]، آرمین مقیمی*[۴]، علی محمدزاده[۵]، سیده سمانه ثابت قدم[۶]

[۱] کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
siavashshami@email.kntu.ac.ir

[۲] کارشناس ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
m.khoshlahjeh.azar@gmail.com

[۳] کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان
zahra.gh@znu.ac.ir

[۴] دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
moghimi.armin@gmail.com

[۵] دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
almoh2@gmail.com

[۶] استادیار گروه آموزشی فیزیک فضا - موسسه ژئوفیزیک - دانشگاه تهران
ssabet@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۹، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۹)

چکیده

یکی از چالش‌های اقتصادی که کشورهای در حال توسعه با آن روبرو هستند، هزینه‌های صرف شده برای مقابله با آلودگی هوا و بهبود کیفیت آن است. از طرف دیگر علاوه بر هزینه، سلامتی افراد جامعه و بیماری‌های موجود نیز ارتباط مستقیمی با کیفیت هوا دارند. از این‌رو بررسی و تحلیل تغییرات آلاینده‌های هوا شامل دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن و ازن می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای تحلیل کیفیت هوا در اختیار متخصصین قرار دهد. وجود سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا به منظور مطالعه کاربردهای متنوع، متخصصین این حوزه را قادر به مطالعه اغلب پدیده‌های محیطی کرده است. در پژوهش حاضر تغییرات زمانی و مکانی میزان آلاینده‌های جوی با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۵ در فروردین ماه ۱۳۹۹ همزمان با انتشار ویروس کووید-۱۹ برای کشور ایران تعیین شده و با مقادیر دوره مشابه در سال ۹۸ مقایسه شده است. انتشار ویروس کووید-۱۹ در این بازه، پیامدهای متنوعی داشت که منجر به کاهش فعالیت کارخانه‌ها و همچنین کاهش تردد وسایل نقلیه گردید. در این پژوهش، به منظور بررسی تاثیر عوامل مذکور، تغییرات زمانی و توزیع مکانی آلاینده‌هایی نظیر هواویزها، دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن و ازن در فاصله بین این دو زمان تجزیه و تحلیل شدند. نتایج کمی و کیفی، نشان‌دهنده بهبود کیفیت هوا در فروردین ۱۳۹۹ نسبت به ماه مشابه سال قبل می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، میزان غلظت دی اکسید نیتروژن کل ستون جو و دی‌اکسید نیتروژن موجود در وردسپهر که ارتباط مستقیمی با حمل و نقل و فعالیت‌های انسانی دارد، کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: کووید-۱۹، کیفیت هوا، آلاینده‌های هوا، ماهواره سنتینل-۵

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

امروزه آلودگی هوا به یکی از معضلات اصلی کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است. از پیامدهای آلودگی هوا آثار زیان‌بار و مخرب آن بر روی سلامت انسان‌ها است که موجب کاهش طول عمر و کاهش بهره‌وری در محیط‌های کاری است. آلودگی هوا بسته به غلظت مواد شیمیایی آثار مخربی در دراز مدت و کوتاه مدت دارد. از طرفی مدت زمان در معرض بودن موجودات زنده نیز جزو فاکتورهای بسیار مهم بر روی تاثیرپذیری از آلودگی است (Brauer, 2010). تحت تاثیر قرار گرفتن سلامت بشر، منجر به افزایش هزینه‌های درمانی و همچنین افزایش فشار کاری بر پزشکان می‌شود و در بلندمدت موجب خستگی و فرسودگی کادر درمان خواهد شد. بنابراین آسیب‌های ناشی از این پدیده هم از جنبه‌ی انسانی-فرهنگی و هم از جنبه‌ی اقتصادی دارای اهمیت فراوان است (Kermani et al., 2017).

لازم به ذکر است که سلامت افراد مهم‌ترین عامل توجه محققان است به‌طوری که موسسه بین المللی تحقیقات سرطان از آلودگی هوا به عنوان سرطان‌زای قطعی انسانی نام برده است (WHO, 2013). همچنین بر طبق اطلاعات سازمان بهداشت جهانی، ۴/۶ میلیون مرگ سالانه در اثر بیماری‌های کاملاً مرتبط با آلودگی هوا ثبت می‌شود (Cohen et al, 2017). آلاینده‌های جوی از نظر چشمه تولید آن‌ها به دو دسته آلاینده‌های اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. آلاینده‌های اولیه مستقیماً از چشمه تولید تولید توسط دودکش‌ها و اگزوزها وارد جو می‌شوند. از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های اولیه جو می‌توان به دی‌اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن اشاره کرد. آلاینده‌های ثانویه عمدتاً به دلیل برهم کنش شیمیایی یک آلاینده اولیه با بخار آب ایجاد می‌شوند (Arya, 1999) و از جمله آلاینده‌های ثانویه می‌توان به آلاینده‌ی ازن اشاره کرد.

روش سنجش از دور از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای برای پایش کمیت‌های مختلف از جمله پایش آلودگی استفاده می‌کند. داده‌های ماهواره‌ای به دلیل رایگان و قابل دسترس بودن و قدرت تفکیک مکانی بالا و پوشش محدوده وسیع از منطقه مطالعاتی برای پیش‌بینی و اعلام هشدار در زمینه کیفیت هوا در میان مدت و بلند مدت قابل استفاده هستند (Xian, 2015). از سوی دیگر ماهواره‌ها با گردش به دور زمین و پایش منطقه یکسان در زمان‌های مختلف این امکان را فراهم می‌کنند که بتوان در زمان‌ها و بازه‌های زمانی مختلف اقدام به مطالعه کرد. مطالعات بلند مدت آلاینده‌ها از نظر ارائه اطلاعات دقیق به مدیران به منظور توسعه استراتژی‌های مهار بحران آلودگی هوا، اهمیت دارند. از جمله جدیدترین ماهواره‌های قابل استفاده برای پایش آلودگی هوا، ماهواره سنتینل-۵ از سری ماهواره‌های پروژه کاپرنیکوس سازمان فضایی اروپا است که از زمان پرتاب در سال ۲۰۱۷ داده‌های قابل اعتماد و کارایی را برای مطالعه هواویزهای جو[۱]، دی اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن و ازن فراهم کرده است. از این‌رو با پردازش داده‌های حاصل از این ماهواره می‌توان اطلاعات بسیار ارزشمندی از آلاینده‌های هوا به دست آورد(Theys et al., 2017).

ویروس کووید-۱۹ که از اواخر سال ۲۰۱۹ میلادی از ووهان چین انتشار یافت و پس از چندی کل جهان را در بر گرفت تاثیر مستقیمی روی تغییر آلاینده‌های جوی داشت (Huang et al., 2020). دی‌اکسید کربن در دراز مدت روی بیماری‌هایی مانند فشار خون، دیابت، و بیماری‌های قلبی و عروقی تاثیرگذار است (Ogen, 2020). تحقیقات نشان می‌دهد شاخص مرگ و میر ناشی از کووید-۱۹ در مناطق دارای مقادیر بالای دی‌اکسید کربن در دراز مدت رابطه مستقیم دارد (Mehta et al., 2020) بدین‌صورت که شاخص مرگ و میر در آن مناطق به دلیل بیماری‌های زمینه‌ای بیشتر است (Shin et al., 2020). همچنین در کشور چین نیز میزان مرگ و میر ناشی از ابتلای به ویروس کووید-۱۹ با گاز دی‌اکسید کربن رابطه مستقیم دارد بدین صورت که هر شهری که دارای آلودگی بالاتری در طول زمان بوده، مرگ و میر بالاتری نیز داشته است (Pansini and Fornacca, 2020). علت این امر را می‌توان بیماری‌های زمینه‌ای ناشی از آلودگی بلند مدت دانست. همچنین در اغلب نقاط دنیا در اثر محدودیت‌های ترافیکی و کاهش فعالیت کارخانه‌ها مقدار آلودگی هوا در مقایسه با ماه‌های اخیر قبل از انتشار ویروس کووید-۱۹ کاهش یافته است (Bauwens et al., 2020). سایر تحقیقات در این زمینه می‌توان به بررسی تاثیر انتشار ویروس کووید-۱۹ بر روی آلودگی چین (Fan et al., 2020)، تاثیر آن بر روی عوامل

۱ Aerosol Optical Depth

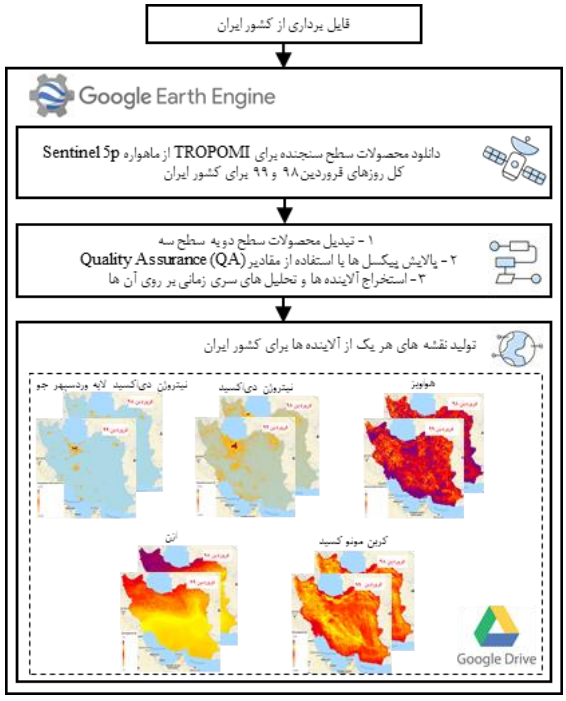
زیست محیطی کل جهان (Lal et al., 2020) ، بهبود وضعیت آلاینده‌های ثانویه در چین (Huang et al., 2020) ، تاثیر ویروس کرونا بر آلودگی دی‌اکسید کربن در کلان‌شهرهای دنیا (Bauwens et al., 2020) اشاره کرد. همچنین، Ghahremanloo و همکارانش در سال ۲۰۲۰، به منظور بررسی تاثیر قرنطینه بر سطح آلودگی هوا در شرق آسیا (سئول، توکیو و ووهان) در فوریه ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ از تصاویرماهواره‌ای Sentinel-5P و Himawari-8 استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سطوح آلایندگی در فوریه ۲۰۱۹ همزمان با اعمال قرنطینه در شرق آسیا به طور چشمگیری کاهش یافته به خصوص در ووهان چین که منشا بیماری به شمار می رفت.

انتشار ویروس کووید-۱۹ در کشور ایران از بهمن ماه سال ۹۸، مسئولین کشور را بر آن داشت تا بسیاری از مشاغل را تعطیل کرده و کاهش رفت و آمد برای افراد جامعه به منظور کاهش بیماری را اعمال نمایند. به این ترتیب با اعمال محدودیت‌های در سطح کلان کار کارخانه‌ها کاهش یافت و برخی به کلی تعطیل شد و همچنین حمل و نقل عمومی به کمترین میزان خود در سال‌های اخیر رسید. از آنجایی که آلاینده‌های هوا تحت تاثیر دود ناشی از سوخت و ساز کارخانه‌ها و وسایل حمل و نقل می‌باشند، پیش‌بینی می‌شود که آلاینده‌ها در ایام انتشار کووید-۱۹ یعنی ماه‌های بهمن و اسفند ۹۸ و فروردین ۹۹ همزمان با اتخاذ تدابیر لازم برای مقابله با ویروس کووید-۱۹ و اقدامات قرنطینه کاهش پیدا کرده باشد. در این راستا، سازمان فضایی ایران[۱]، و تعدادی از استارت آپ‌های زیر مجموعه آن نظیر سنجش و دانش نصیر[۲]، تیزنگر[۳]، فضاکاو[۴] به پایش ماهواره‌ای آلاینده ها با استفاده از تصاویرماهواره ای در کشور ایران پرداخته اند. با وجود تحقیقات انجام شده در این راستا، گزارش‌های ارایه شده به صورت کوتاه در وبسایت‌ها و نشریه های خبری اعلام شده است بطوریکه که عملاً جنبه خبری داشته و سازو کار بدست آوردن نتایج در آن‌ها به خوبی بیان نشده است. بنابراین لزوم ارایه یک پژوهش جامع در راستای استفاده از داده‌های سنجش از دور در زمینه بررسی تاثیر قرنطینه خانگی در دوره‌ی بروز بیماری کرونا به شدت احساس می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه با بهره‌گیری از پتانسیل داده‌های ماهواره‌ای سنتینل – ۵ و همچنین محاسبات در سامانه برخط گوگل ارث انجین، پژوهش جامعی در مورد تغییرات آلاینده‌های هوا در فروردین ۹۹ نسبت به ماه مشابه سال قبل به منظور رصد تحولات وضعیت آلایندگی در کشور ایران، انجام شد تا برآورد صحیحی از میزان آلاینده ها در سراسر ایران داشته باشیم که به ندرت در تحقیقات پیشین به آن پرداخته شده است. انتظار می‌رود این پژوهش، نقش کاهش فعالیت‌های بشری در تغییر آلاینده‌های جوی در کشور ایران را با داده های سنجش از دور نشان دهد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- داده ها

در پژوهش حاضر توزیع زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا بر روی گستره ایران در ماه‌های فروردین ۹۸ و ۹۹ با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۵ در سامانه گوگل ارث انجین مطابق با فلوچارت شکل ۱ محاسبه گردید.

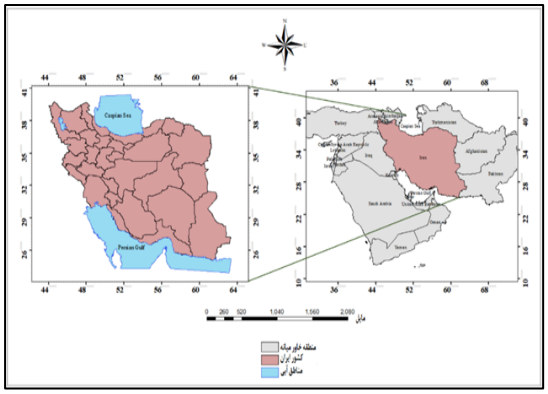


شکل ۱- روند تولید نقشه های آلاینده های جوی با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین

محدوده‌ی مطالعاتی در ۲۵ درجه و سه دقیقه الی ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و پنج دقیقه

۱ https://isa.ir
۲ http://isa.ir/s/mfanhv
۳ http://tiznegar.com/d
۴ https://fazakav.com

الی ۶۳ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۲).



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه (کشور ایران)

ماهواره سنتینل-۵ توسط سازمان فضایی اروپا به دنبال برنامه خود که نظارت بر محیط زیست و آنالیز آلاینده‌های هوا در کل کره زمین را دنبال می‌کرد، در ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷ میلادی به فضا پرتاب شده‌است. از ماموریت‌های این ماهواره می‌توان به پایش آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن و ازن اشاره کرد. سنجنده‌ای که برای پایش آلاینده‌های هوا در این ماهواره استفاده می‌شود Tropomi[۱] است که ابزاری برای پایش وردسپهر است (Loyola et al., 2018). تمام مجموعه داده‌های این سنجنده به دو صورت NRTI[۲] (سریع) و OFFL[۳] (برون خط) ارائه می‌شود. داده‌های سریع و آنی مساحت کمتری را نسبت به حالت برون‌خط پوشش می‌دهند، اما سریع‌تر از آن در اختیار کاربران قرار می‌گیرند. داده‌های اصلی Sentinel 5P در سطح دو و براساس زمان و نه با طول و عرض جغرافیایی، اندازه-گیری می‌شوند (Galli et al., 2012). اما برای وارد کردن این اطلاعات به سامانه پردازش داده‌های ماهواره‌ای (گوگل ارث انجین) نیازمند به تبدیل این داده‌ها به سطح سه می‌باشد. برای اینکه امکان وارد کردن داده ها به سامانه پردازش داده وجود داشته باشد، هر محصول Sentinel 5P سطح دو به سطح سه تبدیل می‌شود. تبدیل به سطح سه توسط ابزار harpconvertبا استفاده از عمل bin_spatial انجام می‌شود (Gorelick, 2013). داده‌های اصلی برای حذف پیکسل‌هایی با مقادیر Quality Assurance (QA)[۴] کمتر از ۸۰ درصد برای هواویزها، ۷۵ درصد برای دی اکسید نیتروژن و ۵۰ درصد سایر داده‌ها فیلتر می‌شوند. شاخص هواویز با یک جفت اندازه‌گیری در طول موج های ۳۵۴ و ۳۸۸ نانومتر محاسبه می‌شود (Butz et al., 2012).

در مطالعه حاضر شاخص هواویز با داده‌های ماهواره سنتینل-۵ با استفاده از طول موج ۳۴۰ و ۳۸۰ نانومتر محاسبه می‌شود. سیستم پردازش دی اکسید نیتروژن مبتنی بر الگوریتم بکار رفته در محصول DOMINO-2 و مجموعه داده پردازش شده EU QA4ECV NO2 از ماهواره OMI[۵] است. این سیستم مدل‌سازی بازیابی-جذب با استفاده از مدل ۳ بعدی حمل و نقل شیمیایی TM5-MP در وضوح ۱×۱ درجه انجام می‌دهد و همچنین سنجنده TROPOMI[۶] ماهواره سنتینل-۵ مونوکسید کربن را در محدوده طیفی ۲/۳ میکرون از طیف امواج مادون قرمز مشاهده می‌کند.

برای سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵ دو الگوریتم وجود دارد که ازن کلی را ارائه می‌دهد که برای محصولات آفلاین مدلGODFIT در پروژه‌های Copernicus C3S استفاده می‌شود. داده‌های مورد استفاده در مقاله حاضر شامل داده‌های چند طیفی سنجنده Tropomi ماهواره سنتینل-۵ از غلظت آلاینده-های هوا از جمله هواویزها، دی اکسید نیتروژن، مونوکسیدکربن و ازن می‌باشد. این داده‌ها دارای تفکیک مکانی ۰/۰۱ درجه هستند و چگالی ستونی میزان آلاینده-ها بر حسب mol/m^2 تخمین شده‌است (Google Earth Engine catalog). داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و اطلاعات مرتبط با آن در جدول ۱ خلاصه شده-است. در این مطالعه کلیه پردازش‌ها و نقشه‌های بدست آمده از تغییرات آلاینده‌ها و نمودار سری زمانی آن‌ها در محیط سامانه گوگل ارث انجین مورد پردازش قرار گرفته است (Google Earth Engine catalog).

۱ TROPOspheric Monitoring Instrument
۲ Near Real-Time
۳ Offline

۴ بیانگر حداقل‌های استاندارد کیفیت در فرایند تولید مقادیر پیکسل در باند های تصویر مورد نظر است
۵ Ozone Monitoring Instrument (OMI)
۶ Tropospheric monitoring instrument

جدول ۱: اطلاعات داده‌های سنجنده Tropomi

نام داده	واحد	کمترین	بیشترین	قدرت تفکیک مکانی
O3_column_number_density	$\frac{mol}{m^2}$	0.025	0.3048	0.01 arc degrees
NO2_column_number_density	$\frac{mol}{m^2}$	-0.0005	0.0192	0.01 arc degrees
tropospheric_NO2_column_number_density	$\frac{mol}{m^2}$	-0.000537	0.0192044	0.01 arc degrees
CO_column_number_density	$\frac{mol}{m^2}$	-34.43	5.71	0.01 arc degrees
absorbing_aerosol_index	$\frac{mol}{m^2}$	-21	39	0.01 arc degrees

۲-۲- روش کار

با در دسترس بودن سری تصاویر لندست در سال ۲۰۰۸، گوگل تمام مجموعه داده‌ها را بایگانی کرد و آنها را برای استفاده از منبع آزاد سازماندهی کرد (Gorelick et al., 2017). به دنبال آن سامانه رایگان و متن باز گوگل ارث انجین از سال ۲۰۰۸ به صورت سامانه ابری و برخط برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای راه‌اندازی شد. این سامانه کلیه داده‌های رایگان ماهواره‌های مختلف نظیر لندست و سنتینل را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. مزیت استفاده از این سیستم این است که نیازی به بارگیری داده‌ها نیست و داده‌ها برای استفاده در این سیستم در دسترس است (Amani et al., 2020). علاوه بر این، در مواردی که حجم داده‌ها زیاد است، دیگر نیازی به سیستم پردازنده قوی نبوده و سیستم در کمتر از چند دقیقه کلیه داده‌های موجود را فراخوانی و پردازش می‌کند، به عبارتی داده‌هایی با حجم بالا (اَبَر داده) را در کمترین زمان پردازش می‌کند (شکل ۲).

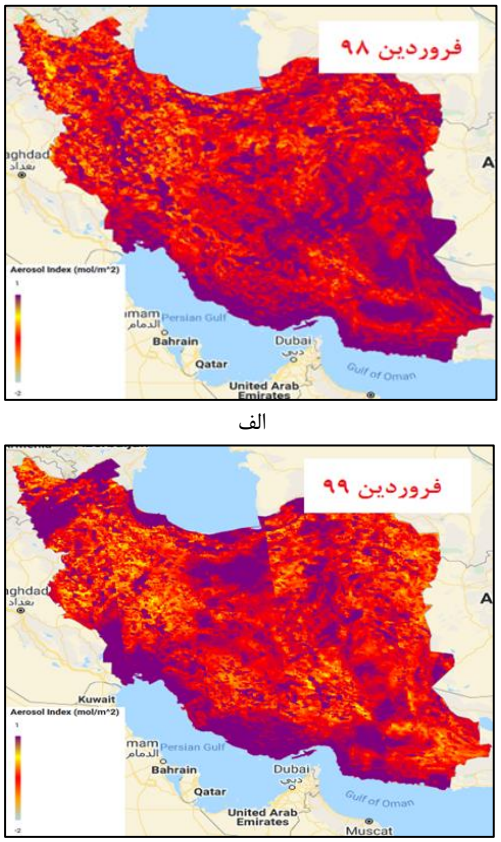
تحقیقات در مورد محیط‌زیست جهانی نیاز به ابزارهای جدید پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها دارد که می‌توانند داده‌های متنوعی از موقعیت مکانی، سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات مکانی موجود در مقیاس جهانی را یکپارچه‌سازی کند (Yu and Peng, 2012). این سیستم انواع مختلفی از داده‌های ماهواره‌ای را که به طور گسترده استفاده می‌شود را پشتیبانی می‌کند. مجموعه داده‌های موجود حاوی اطلاعاتی از سایر ماهواره‌های سنجش از دوری نظیر ماهواره های تصویربرداری اپتیک و راداری، آب و هوایی، تهیه مدل‌های ارتفاعی رقومی و داده‌های محیطی است (Kumar and Onisimo, 2018). مزیت قابل توجه گوگل ارث انجین تصاویری است که به عنوان یک مجموعه ارائه می‌شوند (Gorelick et al., 2017, Amani et al., 2020). مجموعه‌ها قابلیت فیلتر شدن سریع و مرتب‌سازی را داشته که امکان جستجو در میان میلیون‌ها تصویر را برای کاربران آسان می‌کند (Hui et al., 2008). یکی دیگر از مهم‌ترین مزیت‌های گوگل ارث انجین پردازش‌های سری زمانی است. در مقاله حاضر، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل–۵ در سامانه برخط گوگل ارث انجین، مقادیر آلاینده‌های جوی شامل مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن و ازن در گستره ایران برای ماه فروردین سالهای ۹۸ و ۹۹ تعیین و مقایسه می‌شود.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- شاخص هواویز

شاخص هواویز بیانگر میزان جذب هواویز در جو است و میزان جذب هواویزهای در ناحیه فرابنفش طیف تابش را نشان می‌دهد. این شاخص حاصل محاسبه اختلاف بین نرخ تابش طیفی جذب‌شده با استفاده از مشاهدات و محاسبات مدل است (Torres et al., 2007). مقادیر مثبت شاخص هواویز نشان‌دهنده جذب هواویز و مقادیر منفی نشان‌دهنده عدم جذب توسط هواویزهاست. هواویزهای دود و گرد و غبار، هواویزهای جاذب به شمار می‌روند. مقادیر نزدیک به صفر بیانگر کمینه هواویز با دیگر اثرات هواویزی مانند اثر ابر، آلبیدوی سطح، رنگ اقیانوس‌ها یا انعکاس از سطح اقیانوس می‌باشد (Hammer et al., 2016). چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نقشه تغییرات بدست آمده میزان هواویز در فروردین ۹۹ برای گستره‌ی کل کشور، نسبت به مدت مشابه سال قبل (فروردین ۹۸) کمتر شده است افزایش رنگ قرمز و زرد در نقشه فروردین ماه ۹۹ حاکی از این موضوع است. این

تغییرات به وضوح در جنوب شرق، جنوب و نواحی مرکزی کشور مشاهده می‌شود. کاهش رنگ بنفش (که نشانگر وجود هواویز بالا است) در این مناطق از نقشه ، نشانگر کاهش میزان هواویز است. برخلاف مناطق ذکر شده، میزان هواویز در شمال‌غرب و محدوده استان تهران دارای مقادیر بالاتری نسبت به فروردین سال ۹۸ است.

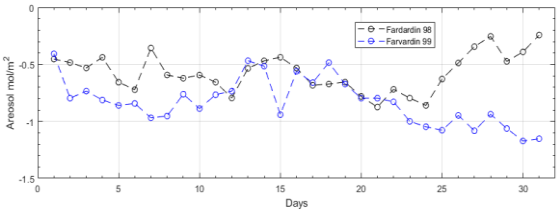


الف

ب

شکل ۳- نقشه تغییرات هواویز هوا مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل–۵ در الف) فروردین ۹۸ و ب) فروردین ۹۹

با وجود کاهش و یا افزایش میزان هواویز در بخش‌هایی از کشور، بررسی سری‌زمانی میزان هواویز در فروردین ۹۹ (نمودار آبی رنگ)، به وضوح نشان‌دهنده کاهش میزان هواویز در فروردین ۹۹ (نمودار سبز رنگ) نسبت به مدت مشابه سال قبل در کل کشور ایران است، به‌طوری که مقدار نمودار سری‌زمانی در نیمه دوم فروردین ۹۹ به ۱/۶- mol/m^2 نیز نزدیک شده است، در حالی‌که میزان هواویز در فروردین ۹۸ نزدیک صفر بوده و در اکثر روزهای فروردین ماه ۹۸ نزدیک به ۱- mol/m^2 است. سری زمانی هواویز را می‌توان به دو بخش مربوط به نیمه اول ماه فروردین و بخش مربوط به نیمه دوم فروردین تقسیم کرد. در نیمه اول که از روز اول فرودین تا حدود ۱۴ام می‌باشد رفتار شاخص هواویز حدوداً یکسانی را مشاهده می‌کنیم. اما در بخش دوم جدایی دو نمودار مشهود است این امر ممکن است به دلیل کاهش سطح ترددها و کاهش کار کارخانه‌ها در فروردین ماه ۹۹ باشد. در حالیکه متناسباً در سال ۹۸ اینگونه نبوده است و بعد از تعطیلات رسمی کشور دوباره فعالیت‌های صنعتی شروع شده است.

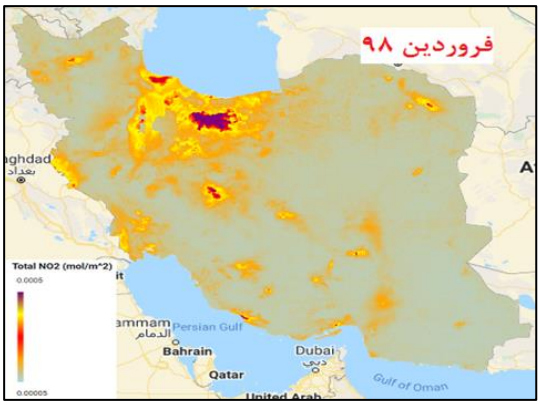


شکل ۴- سری زمانی تغییرات هواویز هوا مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل–۵در فروردین ۹۸ و ۹۹

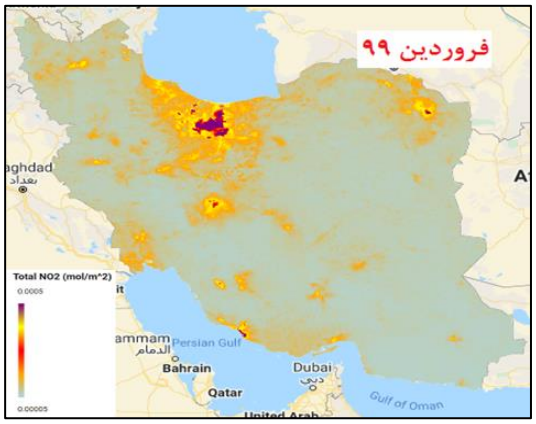
۳-۲- دی‌اکسید نیتروژن

در میان اکسیدهای نیتروژن شناخته شده موجود در هوای محیط، دی‌اکسید نیتروژن از مهم‌ترین آلوده کننده‌های هوا به شمار می‌رود (Ogen, 2020). دی‌اکسید نیتروژن به صورت طبیعی و انسانی ایجاد می‌شود. با وجود اینکه منابع تولیدکننده آن بطور طبیعی چندین برابر منابع انسانی است، ولی در نواحی شهری به دلیل فعالیت‌های انسانی نظیر استفاده از وسیله‌های نقلیه از غلظت بالایی برخوردار است (He et al., 2020).

به طور کلی می توان گفت، توزیع مکانی میزان دی‌اکسید نیتروژن بیانگر بالا بودن میزان این گاز در نواحی کلان‌شهرها و شهرهای پرجمعیت است (شکل ۵). با بررسی موقعیت مکانی این گاز می‌توان شهرهای تهران، مشهد، اصفهان و تبریز را جزو آلوده‌ترین شهرها در اثر دی‌اکسید نیتروژن دانست. با مقایسه توزیع مکانی دی اکسید نیتروژن مربوط به فروردین ماه سال ۹۹ و ۹۸ می‌توان به این نکته پی برد که میزان این گاز در فروردین ماه ۹۹ کاهش یافته است. کاهش میزان رنگ بنفش که نشانگر میزان بالای گاز دی‌اکسید نیتروژن است، در شهرهای مشهد، تبریز و اصفهان نشانگر این موضوع است. همچنین الگوی این گاز در محدوده‌ی استان تهران تغییر کرده و در فروردین ماه سال ۹۹ نسبت به ماه مشابه سال قبل کاهش یافته است.



الف

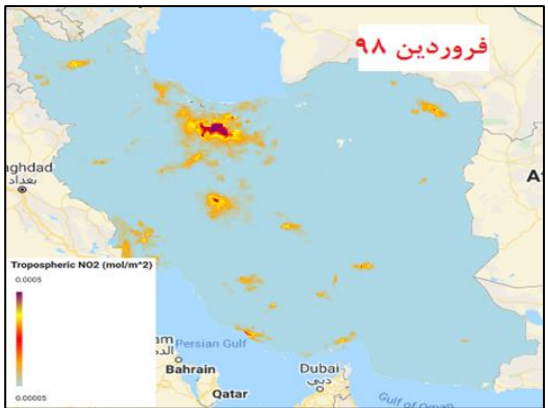


ب

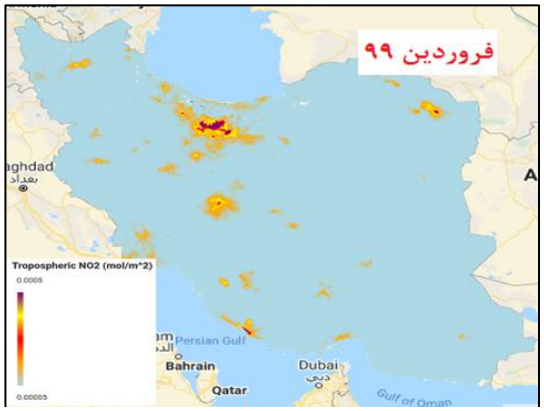
شکل ۵- نقشه تغییرات کل نیتروژن دی‌اکسید هوا مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل–۵ در الف) فروردین ۹۸ و ب) فروردین ۹۹

همچنین بررسی میزان دی‌اکسید نیتروژن لایه وردسپهر جو که در فاصله ۱۵ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد، مشخص می‌کند که ضمن تایید بالا بودن میزان این گاز در اطراف شهرهای صنعتی مانند تهران و اصفهان، میزان آن در فروردین ۹۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل روند کاملاً کاهشی داشته است (شکل ۶).

مقایسه سری زمانی تغییرات کلی دی اکسید نیتروژن (شکل ۷ (الف)) و تغییرات آن در لایه وردسپهر جو (شکل ۷ (ب)) در فروردین ۹۹ با نمودارهای سری زمانی بدست آمده از مدت مشابه سال قبل، نشان می‌دهد در هر دو سری زمانی میزان دی اکسید نیتروژن (نمودار آبی) کمتر از میزان آن در مدت زمان مشابه سال گذشته است (نمودار سبز) و با توجه به شکل ۷ (الف))، اکثراً مقادیر بین ۰/۰۰۰۰۴ تا ۰/۰۰۰۰۶ mol/m^2 بوده در حالی که نمودار سال قبل به دفعات از میزان ۰/۰۰۰۰۶ mol/m^2 فراتر رفته است.

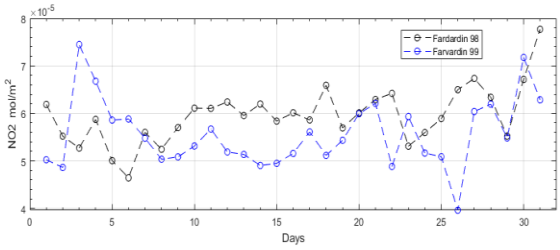


الف

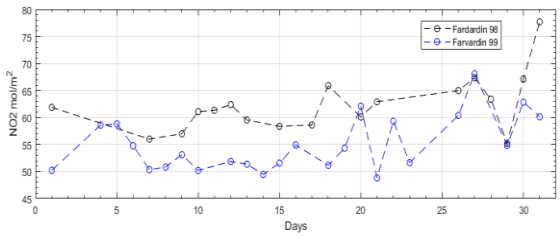


ب

شکل ۶- نقشه تغییرات نیتروژن دی‌اکسید لایه وردسپهر جو مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ در الف) فروردین ۹۸ و ب) فروردین ۹۹



(الف)

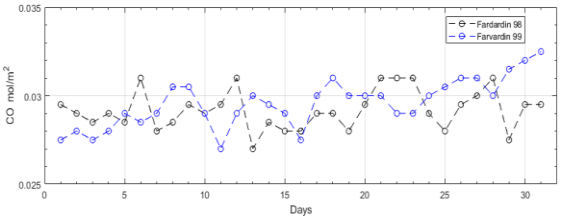


(ب)

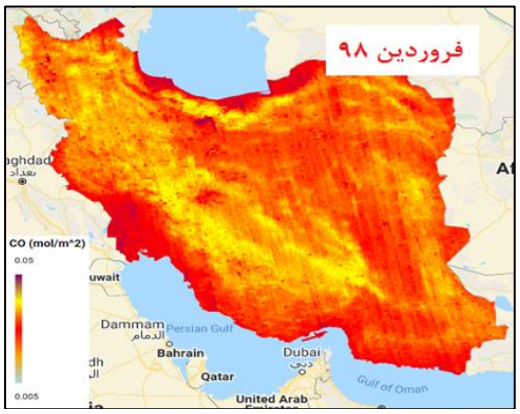
شکل ۶- نمودار سری زمانی تغییرات کل الف) دی‌اکسید نیتروژن هوا و ب) نیتروژن دی‌اکسید لایه وردسپهر مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ در فروردین ۹۸ و ۹۹

۳-۳- مونوکسید کربن

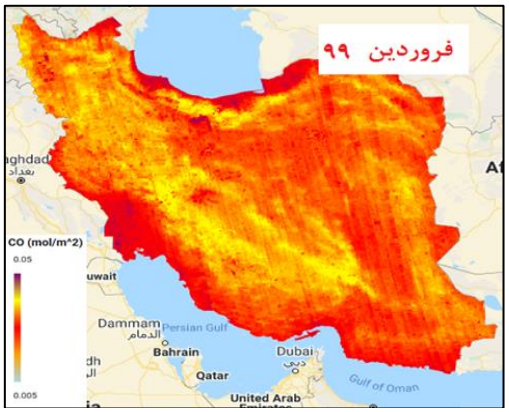
یکی دیگر از آلاینده‌های هوا، مونوکسید کربن است که بیشتر از سوخت‌های حاوی کربن مانند نفت و گاز طبیعی است. در بررسی میزان این گاز در منطقه ایران در زمان انتشار کووید-۱۹، تغییرات خاصی در ماه‌های فروردین ۹۸ و ۹۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل رخ نداده است (شکل ۸). بطوری‌که بررسی سری زمانی نیز نشانگر این موضوع است و تغییرات مونوکسید کربن به طور تقریبی در فروردین هر دو سال در حدود ۰/۰۲۵ تا ۰/۳۵ mol/m^2 بوده است (شکل ۹).



شکل ۹- سری زمانی تغییرات مونو کسید کربن مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل–۵ در فروردین ۹۸ و ۹۹



الف

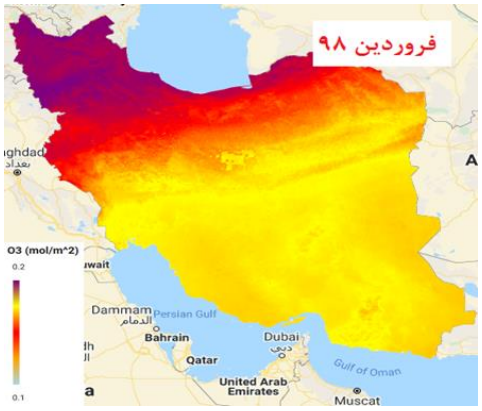


ب

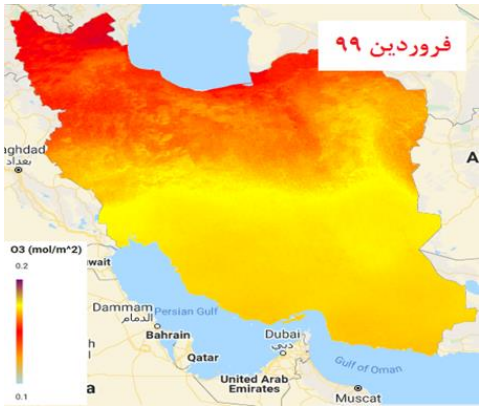
شکل ۸- نقشه تغییرات کربن مونو کسید، مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل–۵ در الف) فروردین ۹۸ و ب) فروردین ۹۹

۳-۴- ازن

ازن گازی با اکسید کنندگی بالا است که مانع از ورود پرتوهای فرابنفش می‌شود. بررسی نقشه تغییرات ازن در فروردین ۹۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل، نشان می‌دهد که شرایط محیطی وضعیت بهتری پیدا کرده است. به طوری که رنگ بنفش در قسمت‌های شمالی و شمال غرب کاملاً از بین رفته و مقدار آن کمتر شده است. در حالیکه در قسمت‌های شرقی، رنگ زرد جای خود را به رنگ قرمز داده است و این نشانگر کاهش میزان ازن است. در بخش‌های جنوب و جنوب شرق و غرب نیز روند تغییرات در فروردین ۹۸ و ۹۹ ثابت است (شکل ۱۰).



الف

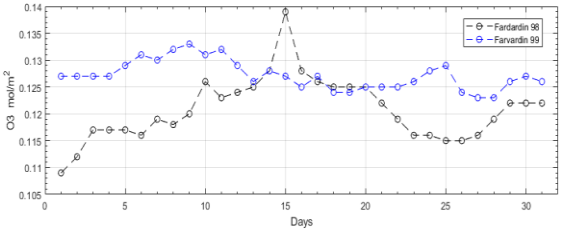


ب

شکل ۱۰- نقشه تغییرات ازن مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل–۵ در الف) فروردین ۹۸ و ب) فروردین ۹۹

همچنین بررسی نمودار سری زمانی ازن در کل ایران نشان‌دهنده تغییرات کاملاً محسوس در فروردین ۹۹ (نمودار آبی) نسبت به مدت مشابه سال قبل (نمودار سبز) است. به طوری که نمودار سال دوم بیشتر در بازه ۰/۱۲ تا ۰/۱۴ mol/m^2 است، در حالی که سال قبل در بازه ۰/۱ تا ۰/۱۲ mol/m^2 بوده است و افزایش ۰/۰۲ mol/m^2 را

در زمان انتشار کووید-۱۹ نشان می‌دهد. علاوه بر این، میزان ازن ارتباط نزدیکی با دی‌اکسید نیتروژن دارد و کاهش میزان این گاز در کشور ایران در فروردین ۹۹ نسبت به فروردین ۹۸ گواهی بر بهبود کیفیت آب و هوایی از لحاظ وجود ازن موجود در جو دارد شکل (۱۱).



شکل ۱۱- سری زمانی تغییرات ازن جو مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ در فروردین ۹۸ و ۹۹

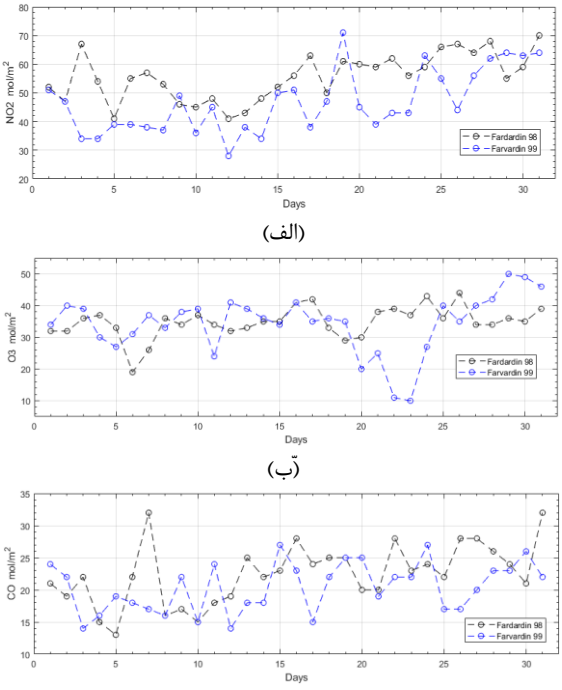
۴- ارزیابی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا میزان هواویز هوا در ماه‌های فروردین ۹۸ و ۹۹ با داده‌های ماهواره سنتینل-۵ در محیط برخط سامانه گوگل ارثانجین محاسبه شد. بررسی سری‌زمانی میزان هواویز در ایران طی این دو ماه نشان دهنده‌ی کاهش میزان هواویز در فروردین ۹۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل است، به طوری که نمودار سری زمانی در فروردین ۹۹ به ۱/۶- نیز نزدیک شده است، در حالی‌که میزان هواویز در فروردین ۹۸ نزدیک به صفر بوده. سپس در ادامه میزان آلاینده‌های هوا نظیر دی‌اکسید نیتروژن ، مونوکسید کربن و ازن محاسبه شد. در نواحی شهری به دلیل فعالیت‌های انسانی نظیر استفاده از وسیله-های نقلیه دی‌اکسید نیتروژن از غلظت بالایی برخوردار است. بررسی نقشه‌های بدست آمده نیز نشانگر بالا بودن میزان این گاز در نزدیکی شهرهای بزرگ و پر جمعیت است، بطوری که در نزدیکی شهرهای تهران، مشهد، اصفهان و تبریز بیشترین میزان را دارا می‌باشد.

بررسی میزان دی‌اکسید نیتروژن کلی و دی‌اکسید نیتروژن در لایه وردسپهر نیز نشان از کاهش میزان آن در فروردین ماه ۹۹ دارد. در ادامه میزان مونوکسید کربن هوا برای منطقه ایران محاسبه و تغییرات بدست‌آمده مقایسه شد. نقشه تغییرات بدست‌آمده و نمودار سری‌زمانی مشخص می‌کند که میزان مونوکسید کربن که ارتباط مستقیمی با سوخت حاصل از نفت و گاز طبیعی دارد در زمان انتشار کووید-۱۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل تغییرات چندانی نداشته است و تقریباً ثابت است. در نهایت تغییرات ازن گازی با اکسید کنندگی بالا، نشان از بهبود وضعیت آن در فروردین ۹۹ نسبت مشابه سال قبل را دارد، به طوری که افزایش ۰/۰۲ mol/m^2 را در فروردین ۹۹ تجربه کرده است. طبق نتایج به دست آمده بیماری کووید -۱۹ به طور کاملاً متضاد با دیدگاه عمومی، ممکن است باعث کاهش مرگ و میر ناشی از آلودگی هوا شود. تحقیقات دیگر در زمینه کاهش مرگ و میر ناشی از کاهش آلودگی هوا دلیلی برا این مدعا است (Chen and Bloon, 2019; Neira et al., 2018; Dutheil et al., 2020).

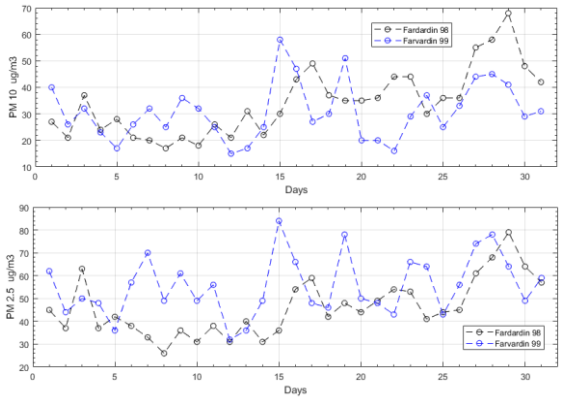
در ادامه برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از داده-های ماهواره سنتینل-۵ از اطلاعات ایستگاه‌های کنترل کیفیت هوای استان تهران به عنوان پرجمعیت‌ترین و بزرگترین شهر آلوده ایران استفاده شد. از میانگین کل ایستگاه‌های موجود در شهر تهران، میزان غلظت دی اکسید نیتروژن ، مونوکسید کربن و ازن برای ماه فروردین در سال‌های ۹۸ و ۹۹ محاسبه و سری زمانی آن‌ها رسم شد. در هر یک از نمودارهای سری زمانی، رفتار بدست آمده، کاهش غلظت این آلاینده‌ها در فروردین ۹۹ نسبت به مدت مشابه در سال ۹۸ را نشان می‌دهد. از میانگین کل ایستگاه‌های موجود در شهر تهران، میزان غلظت دی اکسید نیتروژن ، مونوکسید کربن و ازن برای ماه فروردین در سال‌های ۹۸ و ۹۹ محاسبه و سری زمانی آن‌ها رسم شد. در هر یک از نمودارهای سری زمانی، رفتار بدست آمده، کاهش غلظت این آلاینده‌ها در فروردین ۹۹ نسبت به مدت مشابه در سال ۹۸ را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱- موقعیت ایستگاه‌های کنترل کیفیت هوای استان تهران



شکل ۱۳- سری زمانی الف) غلظت دی اکسید نیتروژن ، ب) مونوکسید کربن و ج) ازن مستخرج از ایستگاه‌های کنترل کیفیت هوای استان تهران در فروردین ۹۸ و ۹۹

در ادامه غلظت PM2.5 و PM10 برای شهر تهران در بازه زمانی فروردین ۹۸ و ۹۹ محاسبه و سری‌زمانی آن‌ها نیز رسم شد. ذرات PM2.5 که قطر آنها ۲/۵ میکرون یا کمتر است. منشا تولید آن‌ها سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز و زغالسنگ و همچنین رفت و آمد وسایل نقلیه است. میزان ذرات PM2.5 در هوا بر حسب میکروگرم در متر مکعب هوا به طور میانگین در ۲۴ ساعت اندازه‌گیری می‌شود. و علت اصلی کاهش میدان دید یا تاری هوا ناشی از آلودگی هوا در شهرهای بزرگ است. ذرات PM10 ۲/۵ تا ۱۰ میکرونی نیز ناشی از دود و غبار کارخانه‌ها، کشاورزی و حمل و نقل جاده‌ها و غیره است که مدت طولانی‌تری در هوا باقی می‌مانند (روزها یا هفته‌ها) و تا مسافت طولانی‌تری نیز حرکت می‌کنند و هر دو ذره سرطان زا هستند. میزان PM2.5 و PM10 به همراه آلاینده‌هایی نظیر ازن، دی اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن برای محاسبه شاخص کیفیت هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد(Schwartz et al., 2002). بررسی نمودارهای سری زمانی نشان می‌دهد که میزان PM2.5 در فروردین ۹۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل افزایش پیدا کرده است. به این ترتیب آلاینده‌های حاصل از نفت و گاز و حمل و نقل شهری در این مدت بیشتر شده است که این موضوع یعنی آلودگی ناشی از حمل و نقل شهری و سوخت حاصل از نفت و گاز طبیعی در بررسی میزان مونوکسید کربن نیز تایید شده است. اما نمودار سری زمانی PM10 نشان می‌دهد میزان آن در فروردین ۹۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل کاهش پیدا نموده و دود غبار ناشی از کارخانه‌ها و حمل و نقل جاده‌ای کمتر شده است.



شکل ۱۴- سری زمانی غلظت الف) PM2.5 و ب) PM10 مستخرج از ایستگاه‌های کنترل کیفیت هوای استان تهران در فروردین ۹۸ و ۹۹در فروردین ۹۸ و ۹۹

به این ترتیب، در فروردین ماه ۹۹ کاهش آلاینده‌های هوا که بیشتر مربوط به کاهش آلودگی‌های ناشی از کارخانه‌ها و حمل و نقل جاده‌ای بوده سبب بهبود کیفیت هوا در ایران شده‌است. در حالیکه که آلودگی ناشی از سوخت نفت و گاز طبیعی و حمل و نقل شهری وضعیت بهتری کسب نکرده است. همچنین پیشنهاد می‌شود که روند بررسی و پایش تغییرات آلاینده‌های جوی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای که هزینه کمتر و سرعت کار بالاتری نسبت به بقیه روش‌ها داشته، و پوشش منطقه‌ای وسیع دارند در کشور ایران به ویژه شهرهای بزرگ و پرجمعیت به منظور کنترل و بهبود آلاینده‌های هوا که بهبود کیفیت هوا را به دنبال دارد، به صورت مرتب و پیوسته انجام پذیرد.

مراجع

[1] Arya, S. Pal. Air pollution meteorology and dispersion. Vol. 6. New York: Oxford University Press, 1999.

[2] Bauwens, M., S. Compernolle, T. Stavrakou, J-F. Müller, J. van Gent, H. Eskes, P. F. Levelt et al. "Impact of coronavirus outbreak on NO2 pollution assessed using TROPOMI and OMI observations." Geophysical Research Letters: e2020GL087978.

[3] Brauer, Michael. "How much, how long, what, and where: air pollution exposure assessment for epidemiologic studies of respiratory disease." Proceedings of the American Thoracic Society 7, no. 2 (2010): 111-115.

[4] Butz, A., André Galli, O. Hasekamp, J. Landgraf, P. Tol, and I. Aben. "TROPOMI aboard Sentinel-5 Precursor: Prospective performance of CH4 retrievals for aerosol and cirrus loaded atmospheres." Remote sensing of environment 120 (2012): 267-276.

[5] Chen, Simiao, and David E. Bloom. "The macroeconomic burden of noncommunicable diseases associated with air pollution in China." PloS one 14, no. 4 (2019).

[6] Cohen, Aaron J., Michael Brauer, Richard Burnett, H. Ross Anderson, Joseph Frostad, Kara Estep, Kalpana Balakrishnan et al. "Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015." The Lancet 389, no. 10082 (2017): 1907-1918.

[7] Demuzere, Matthias, and Nicole PM van Lipzig. "A new method to estimate air-quality levels using a synoptic-regression approach. Part I: Present-day O3 and PM10 analysis." Atmospheric Environment 44, no. 10 (2010): 1341-1355.

[8] Dutheil, Frédéric, Julien S. Baker, and Valentin Navel. "COVID-19 as a factor influencing air pollution?." Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987) (2020).

[9] Fan, Cheng, Ying Li, Jie Guang, Zhengqiang Li, Abdelrazek Elnashar, Mona Allam, and Gerrit de Leeuw. "The Impact of the Control Measures during the COVID-19 Outbreak on Air Pollution in China." Remote Sensing 12, no. 10 (2020): 1613.

[10] Galli, André, A. Butz, R. A. Scheepmaker, O. Hasekamp, J. Landgraf, P. Tol, D. Wunch et al. "CH4, CO, and H2O spectroscopy for the Sentinel-5 Precursor mission: an assessment with the Total Carbon Column Observing Network measurements." (2012): 1387.

[11] Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, and Rebecca Moore. "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone." Remote sensing of Environment 202 (2017): 18-27.

[12] Hammer, Melanie S., Randall V. Martin, Aaron van Donkelaar, Virginie Buchard, Omar Torres, David A. Ridley, and Robert JD Spurr. "Interpreting the ultraviolet aerosol index observed with the OMI satellite instrument to understand absorption by organic aerosols: implications for atmospheric oxidation and direct radiative effects." (2016).

[13] He, Mike Z., Patrick L. Kinney, Tiantian Li, Chen Chen, Qinghua Sun, Jie Ban, Jiaonan Wang, Siliang Liu, Jeff Goldsmith, and Marianthi-Anna Kioumourtzoglou. "Short-and intermediate-term exposure to NO2 and mortality: a multi-county analysis in China." Environmental Pollution 261 (2020): 114165.

[14] Huang, Chaolin, Yeming Wang, Xingwang Li, Lili Ren, Jianping Zhao, Yi Hu, Li Zhang et al. "Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China." The lancet 395, no. 10223 (2020): 497-506.

[15] Huang, Xin, Aijun Ding, Jian Gao, Bo Zheng, Derong Zhou, Ximeng Qi, Rong Tang et al. "Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China." (2020).

[16] Hui, Fengming, Bing Xu, Huabing Huang, Qian Yu, and Peng Gong. "Modelling spatial-temporal change of Poyang Lake using multitemporal Landsat imagery." International Journal of Remote Sensing 29, no. 20 (2008): 5767-5784.

[17] Kermani, Majid, A. Jonidi Jaffar, M. Dowlati, and Roshanak Rezaei Kalantari. "Number of total mortality, cardiovascular mortality and Chronic Obstructive Pulmonary Disease due to exposure with Nitrogen dioxide in Tehran during 2005-2014." The Journal of Urmia University of Medical Sciences 28, no. 4 (2017): 22.

[18] Kumar, Lalit, and Onisimo Mutanga. "Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential." Remote Sensing 10, no. 10 (2018): 1509.

[19] Lal, Preet, Amit Kumar, Shubham Kumar, Sheetal Kumari, Purabi Saikia, Arun Dayanandan, Dibyendu Adhikari, and M. L. Khan. "The dark cloud with a silver lining: Assessing the impact of the SARS COVID-19 pandemic on the global environment." Science of The Total Environment (2020): 139297.

[20] Liu, Fei, Aaron Page, Sarah A. Strode, Yasuko Yoshida, Sungyeon Choi, Bo Zheng, Lok N. Lamsal et al. "Abrupt declines in tropospheric nitrogen dioxide over China after the outbreak of COVID-19." arXiv preprint arXiv:2004.06542 (2020).

[21] Loyola, Diego G., Sebastián Gimeno García, Ronny Lutz, Athina Argyrouli, Fabian Romahn, Robert JD Spurr, Mattia Pedergnana, Adrian Doicu, Víctor Molina García, and Olena Schüssler. "The operational cloud retrieval algorithms from TROPOMI on board Sentinel-5 Precursor." Atmospheric Measurement Techniques 11, no. 1 (2018).

[22] Mehta, Puja, Daniel F. McAuley, Michael Brown, Emilie Sanchez, Rachel S. Tattersall, and Jessica J. Manson. "COVID-19: consider cytokine storm syndromes and immunosuppression." The Lancet 395, no. 10229 (2020): 1033-1034.

[23] Neira, Maria, Annette Prüss-Ustün, and Pierpaolo Mudu. "Reduce air pollution to beat NCDs: from recognition to action." Lancet (London, England) 392, no. 10154 (2018): 1178-1179.

[24] Ogen, Yaron. "Assessing nitrogen dioxide (NO2) levels as a contributing factor to the coronavirus (COVID-19) fatality rate." Science of The Total Environment (2020): 138605.

[25] Pansini, Riccardo, and Davide Fornacca. "COVID-19 higher induced mortality in Chinese regions with lower air quality." DOI 10, no. 2020.04: 04-20053595.

[26] Sebald, Ludwig, Renate Treffeisen, Eberhard Reimer, and Thomas Hies. "Spectral analysis of air pollutants. Part 2: ozone time series." Atmospheric Environment 34, no. 21 (2000): 3503-3509.

[27] Schwartz, Joel, Francine Laden, and Antonella Zanobetti. "The concentration-response relation between PM (2.5) and daily deaths." Environmental health perspectives 110, no. 10 (2002): 1025-1029.

[28] Shin, Saeha, Li Bai, Tor H. Oiamo, Richard T. Burnett, Scott Weichenthal, Michael Jerrett, Jeffrey C. Kwong et al. "Association between road traffic noise and incidence of diabetes mellitus and hypertension in Toronto, Canada: a population-based cohort study." Journal of the American Heart Association 9, no. 6 (2020): e013021.

[29] Theys, Nicolas, Isabelle De Smedt, Huan Yu, Thomas Danckaert, Jeroen van Gent, Christoph Hörmann, Thomas Wagner et al. "Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: algorithm theoretical basis." Atmospheric Measurement Techniques 10, no. 1 (2017).

[30] Wang, Yinsong, Yajie Zou, Kristian Henrickson, Yinhai Wang, Jinjun Tang, and Byung-Jung Park. "Google Earth elevation data extraction and accuracy assessment for transportation applications." PloS one 12, no. 4 (2017): e0175756.

[31] World Health Organization. "Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths." IARC Sci Publ 161 (2013).

[32] Xian, George Z. Remote sensing applications for the urban environment. Vol. 12. CRC Press, 2015.

[33] Yu, Le, and Peng Gong. "Google Earth as a virtual globe tool for Earth science applications at the global scale: progress and perspectives." International Journal of Remote Sensing 33, no. 12 (2012): 3966-3986.

[34] Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., ... & Wu, Q. (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.