



فصلنامه علوم محیطی، دوره بیستم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱

۸۱-۹۸

مقاله پژوهشی

پایش آلودگی هوا با استفاده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ (مطالعه موردی: شهرهای بزرگ صنعتی ایران)

محمد امین قنادی*، متین شهری و امیر رضا مرادی

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

قنادی، م.ا.، م. شهری و ار. مرادی. ۱۴۰۱. پایش آلودگی هوا با استفاده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ (مطالعه موردی: شهرهای بزرگ صنعتی ایران). فصلنامه علوم محیطی. ۲۰(۲): ۸۱-۹۸.

سابقه و هدف: یکی از اساسی‌ترین مشکل‌های امروز دنیا، بحث آلودگی هوا و اثرهای آن بر سلامت انسان است. کشور در حال توسعه ایران هم از این امر جدا نمی‌باشد. وجود آلاینده‌هایی همچون دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ذرات معلق (آئروسول‌ها) افزون بر تأثیرهای مخرب جدی بر سلامتی انسان، سبب آسیب به پوشش گیاهی و بروز تغییرات اقلیمی جهانی می‌شود، بنابراین لزوم پایش جامع آلاینده‌ها و به تبع آن اتخاذ تصمیم‌های صحیح مدیریتی جهت مقابله با این بحران ضروری به نظر می‌رسد. یکی از ابزارهای قدرتمند در پایش آلودگی هوا، روش‌های مبتنی بر سنجش از دور می‌باشد. سنتینل-۵^۱ آخرین پروژه سازمان فضایی اتحادیه اروپا (با همکاری کشور هلند) می‌باشد که با استفاده از سنجنده (TROPOMI) تصاویری در باندهای طیفی متنوع اخذ می‌کند و ابزاری مناسب جهت پایش بسیاری از آلاینده‌های هوا محسوب می‌گردد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، پایشی جامع براساس مقادیر برخی از مهمترین آلاینده‌های هوا از جمله دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ذرات معلق، با استفاده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ صورت گرفته است. در این پژوهش، از تعداد بالایی تصویر سطح سه که از طریق موتور گوگل ارث^۲ فراخوانی شده‌اند، استفاده شده است. صحت پایش صورت گرفته با استفاده از ایستگاه‌های ثبت آلاینده‌های زمینی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج و بحث: نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که مقادیر پایش با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۵ حداقل ۷۸٪ با مقادیر پایش شده توسط ایستگاه‌های زمینی همبستگی دارد. بنابراین می‌توان از پتانسیل بالای تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ در مطالعات کلان مدیریتی با هدف کاهش آلاینده‌های هوا استفاده نمود. پایش صورت گرفته بوسیله تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۹، تهران آلوده‌ترین هوا را به لحاظ مجموع گازهای مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق (گرد و غبار) داشته است. همچنین زنجان کمترین میزان آلودگی را در مقایسه با سایر شهرهای مورد مطالعه داشته است. در سال ۲۰۲۰، باز هم تهران به‌عنوان آلوده‌ترین شهر ایران شناخته می‌شود. در این سال نیز هوای زنجان در قیاس با سایر شهرستان‌های مورد مطالعه وضعیت بهتری داشته

* Corresponding Author: Email Address. m.ghannadi@arakut.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1026>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.2.13.4>

است. مشاهده می‌شود که کرج و کرمانشاه در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ افزایش آلودگی هوای قابل توجهی داشته‌اند. از دیگر نتایج مهم این تحقیق این است که در مجموع میزان آلودگی هوا در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ با روندی کاهشی مواجه شده است که شاید یکی از مهمترین دلایل‌های، تأثیرگذاری همه‌گیری ویروس کرونا در سال ۲۰۲۰ و کاهش نسبی (و البته اندک) فعالیت‌های صنعتی و کاهش ترافیک خودروها باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از تصاویر سنجنده (TROPOMI) که بر روی ماهواره سنتینل-۵ نصب شده است، به‌عنوان داده‌ای جامع، در دسترس و با دقت قابل قبول به صورت سیستماتیک آلاینده‌های هوای شهرهای کشور را پایش نمود و با قرار دادن نتایج آن در اختیار سایر محققان و یا مسئولین اجرایی در جهت تصمیم‌گیری‌های مناسب در مدیریت کلان شهرها به آنها یاری نمود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، تصویرهای سنتینل-۵، سنجنده (TROPOMI)، شهرهای صنعتی ایران.

مقدمه

به‌طور کلی، انواع مختلفی از آلاینده‌ها در جو وجود دارد که اثرهای جدی آن‌ها بر کیفیت هوا، محیط زیست، سلامتی انسان و اقلیم به یکی از مهمترین نگرانی‌های قرن ۲۱ تبدیل گردیده است. مهمترین آلاینده‌های هوا، دی اکسید گوگرد (SO_2)، دی اکسید کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ازن (O_3)، متان (CH_4)، کربن‌های آلی ناپایدار، کلروفلوئورکربن‌ها (CFC) و ذرات معلق^۴ یا همان آئروسول‌ها^۵ می‌باشند (Saxena and Naik, 2018).

آلاینده‌های اولیه هوا به‌طور مستقیم از یک فرآیند طبیعی یا انسانی ناشی می‌شوند، مانند خاکستر ناشی از فوران آتشفشان، گاز مونوکسیدکربن خارج شده از آگروز وسایل نقلیه موتوری و یا دی اکسید گوگرد آزاد شده از صنایع. به آلاینده‌های هوا مانند ازن که در اثر واکنش‌های شیمیایی مختلف در هوا تشکیل می‌شوند، آلاینده‌های ثانویه هوا گفته می‌شود (Saxena and Naik, 2018). در کنار منابع انتشار آلاینده‌ها، آب و هوای منطقه‌ای و توپوگرافی نیز که در انتقال و پراکندگی آلاینده‌ها و تحولات شیمیایی مؤثر هستند، نقشی اساسی در آلودگی هوا ایفا می‌کنند (Tiwari et al., 2014). در ادامه به‌طور خلاصه برخی آلاینده‌های اصلی هوا که مربوط به سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و آب و هوا می‌باشد و همچنین منابع انتشار آن‌ها، بیان خواهد شد.

امروزه آلودگی هوا یکی از اصلی‌ترین و مهمترین مشکل‌های کره زمین به شمار می‌رود و نقش عمده‌ای در تغییرات جهانی اقلیم و مرگ‌های زودهنگام در سراسر جهان دارد. بنابر گزارش سازمان بهداشت جهانی، آلودگی هوا یکی از بزرگترین قاتلان جهان محسوب می‌شود که منجر به وقوع سالانه حدود ۳ میلیون مرگ در سراسر جهان می‌شود (Lelieveld et al., 2015). در این میان، بیش از نیمی از مرگ و میرها در کشورهای در حال توسعه (بیش از نیم میلیون فقط در کشور هند) اتفاق می‌افتد (Ghude et al., 2016, Chowdhury and Dey, 2016). این حال، آلودگی هوا در برخی از کشورهای پیشرفته صنعتی (به‌عنوان نمونه ایالات متحده) نیز سبب مرگ زودهنگام می‌شود (Caiazzo et al., 2013). عامل‌هایی همچون رشد جمعیت و پیرو آن افزایش خودرو و همچنین افزایش روند صنعتی‌شدن و تقاضای انرژی مربوط به آن در این کشورها منجر به افزایش روند آلودگی در بسیاری از کلان‌شهرهای کشورهای صنعتی گردیده است. بنابراین اندازه‌گیری دقیق آلاینده‌های هوا با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی برای تعیین چگونگی توزیع و اثرگذاری آن‌ها و همچنین، ارائه راهکارهایی برای مدیران در سطح محلی، ملی و بین‌المللی امری ضروری محسوب می‌شود (Saxena and Naik, 2018).

تولید می‌شود و کمابیش دو سوم انتشار مونوکسید کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی است. از جمله این موارد می‌توان به سوزاندن بقایای محصول‌های زراعی، احتراق سوخت فسیلی و اکسیداسیون متان اشاره نمود (Saxena and Naik, 2018). به دلیل طول عمر به نسبت کوتاه، مونوکسید کربن در تروپوسفر مخلوط نمی‌شود. با این وجود، انتشار مونوکسید کربن در جو می‌تواند بر طول عمر متان و تولید دی‌اکسید کربن و ازن تروپوسفری مؤثر واقع شود و از این رو تأثیر مهمی بر تغییرات جهانی اقلیم دارد.

ذرات معلق، ذرات ریز معلق در جو هستند که اندازه آن‌ها از چند صد میکرومتر تا نانومتر متغیر است. آن‌ها از طریق تبدیل ذرات به گاز از منابع طبیعی (به‌عنوان نمونه طوفان‌های گرد و غبار) و یا منابع انسانی (حمل و نقل و صنعت) به جو منتقل می‌شوند. ذرات معلق یا آئروسول‌ها یکی از انواع مهم آلودگی هوا به شمار می‌روند که اثرهای کوتاه مدت و همچنین طولانی مدت بر سلامت انسان دارند. برای نمونه می‌توان به بیماری‌های قلبی عروقی، ریوی و پوستی اشاره نمود که گاهی منجر به مرگ زودرس نیز می‌شود (Saxena and Naik, 2018). پایش ذرات معلق در سراسر جهان از اهمیت بالایی برخوردار است و بسیاری از آژانس‌های حفاظت از محیط زیست در تلاش هستند تا نظارت و ارزیابی مستمر آلودگی هوا را از طریق ایستگاه‌های زمینی انجام دهند. ذرات معلق همچنین اثرهای قابل توجهی بر اقلیم زمین دارند که این مهم از طریق پراکندگی و یا جذب تابش خورشید رخ می‌دهد (Tiwari et al., 2015).

در میان روش‌های مختلف پایش آلودگی هوا، استفاده از ابزارها و فن‌آوری‌های مبتنی بر سنسور از دور به دلیل ماهیت تولید داده‌های پیوسته زمانی و مکانی اهمیت بیشتری دارد. در این روش‌ها، اطلاعات مربوط به آلاینده‌های هوا از طریق تابش‌های الکترومغناطیسی منتقل می‌شود و اطلاعات آلاینده‌های هوا با وضوح مکانی

ذغال سنگ، نفت و تعدادی از سوخت‌های ناخالص، حاوی گوگرد و همچنین ترکیبات آلی مختلف هستند. منبع اصلی انسانی انتشار گاز دی‌اکسید گوگرد، وجود گوگرد در سوخت‌های فسیلی است که پس از احتراق آزاد می‌شود. مقادیر به نسبت کمی گوگرد نیز از آتش سوزی جنگل‌ها، خاک‌ها و پوشش گیاهی خارج می‌شود (Saxena and Naik, 2018). نیروگاه‌های ذغال سنگ بزرگترین منابع دی‌اکسید گوگرد در جهان هستند که موجب تولید دود و باران اسیدی می‌شوند که منجر به بروز بیماری‌های ریوی و تنفسی می‌شود (Greenberg et al., 2016).

در بین آلاینده‌های مختلف موجود در اتمسفر، اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان یکی از مهمترین آلاینده‌ها و گازهای سمی مطرح هستند (Park et al., 2020, Dickerson et al., 2019). سالانه میلیون‌ها تن دی‌اکسید نیتروژن و اکسید نیتروژن در اثر فعالیت‌های انسانی بویژه مصرف سوخت‌های فسیلی در دماهای بالا تولید می‌شود. دی‌اکسید نیتروژن در ترکیب با هوای مرطوب، تولید اسید نیتریک می‌کند که موجب پوسیدگی شدید فلزها می‌گردد. همچنین در غلظت‌های بالا موجب ایجاد مه‌دود شده و میدان دید را به شدت کاهش می‌دهد (Park et al., 2020). اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان "گازهای گلخانه‌ای غیرمستقیم" نیز شناخته می‌شوند، زیرا از طریق صاعقه، به تروپوسفر بالایی وارد می‌شود (Grewe et al., 2016, Finney et al., 2012) و با تولید ازن نقش مهمی در گرم شدن کره زمین ایفا می‌کنند (Finney et al., 2016, Grewe et al., 2012). این عامل‌ها اثرهای نامطلوبی بر سیستم تنفسی انسان گذاشته و همچنین در رشد گیاهان تأثیرهای منفی زیادی خواهند گذاشت (Kim et al., 2006, Kampa and Castanas, 2008).

مونوکسید کربن یکی از رایج‌ترین گازهای آلوده کننده هوا و البته از سمی‌ترین آن‌هاست. مونوکسید کربن یک گاز بسیار خطرناک است و به‌طور عمده از سوختن ناقص کربن

دریافت نمود (Lorente *et al.*, 2019). مروری بر مطالعات گذشته نیز نشان می‌دهد که تصویرهای سنتینل-۵ به منظور پایش دی اکسید گوگرد (Hedelt *et al.*, 2019, Wang *et al.*, 2020, Theys *et al.*, 2019), مونوکسید کربن (Safarianzengir *et al.*, 2020, Schneising *et al.*, 2019), فرمالدهید (Vigouroux *et al.*, 2020, Sun *et al.*, 2020, Virghileanu *et al.*, 2021, al., 2021), اوزون (Quesada-Ruiz *et al.*, 2020, Zhao *et al.*, 2021), متان (Lorente *et al.*, 2021, Schneising *et al.*, 2019), ذرات معلق (Broomandi *et al.*, 2020, Li *et al.*, 2020, Lorente *et al.*, 2015), مونوکسید نیتروژن (Tiwari *et al.*, 2015), و همچنین دی اکسید نیتروژن (Shikwambana *et al.*, 2020, Omrani *et al.*, 2020, Virghileanu *et al.*, 2020, Ialongo *et al.*, 2020a, Koukouli *et al.*, 2021) در مطالعات محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به اهمیت پایش آلودگی هوا و اهمیت بررسی آن در کلان‌شهرهای صنعتی و همچنین توانمندی سیستم‌های مبتنی بر سنسور از دور و ماهواره سنتینل-۵، در این پژوهش، ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی از کشور ایران به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. متأسفانه بسیاری از شهرهای ایران به‌طور معمول در رتبه‌بندی آلوده‌ترین شهرهای جهان قرار دارند. بنابراین، مسئله پایش این آلاینده‌ها و در ادامه تصمیم‌های صحیح مدیریتی برای کاهش آن‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، در این پژوهش، هدف، ارزیابی قابلیت سنسور (TROPOMI) ماهواره سنتینل-۵ در پایش آلودگی هوا و همچنین بررسی روند تغییرات آلاینده‌ها در شهرهای بزرگ و صنعتی ایران در دو سال اخیر می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند ابزاری مناسب جهت ارائه راهکارهایی برای مدیران در سطح‌های مختلف فراهم کند. در ادامه، ابتدا منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده معرفی شده است، سپس نتایج پایش صورت

زمانی و همچنین اندازه‌گیری پروفیل قائم قابل ثبت شدن خواهند بود (Saxena and Naik, 2018). پایش آلاینده‌های هوا و گازهای کمیاب به کمک سنسور از دور ماهواره‌ای، بستر مناسبی را برای درک اوضاع فعلی کیفیت هوا و تغییرات آب و هوایی آینده در مقیاس جهانی فراهم می‌کند. از طرف دیگر، دقت هرچه بیشتر در پایش آلاینده‌ها به دلیل ملاحظات مختلف از جمله ترکیبات شیمیایی، طول عمر، منابع انتشار و نظایر آن‌ها نیز دارای اهمیتی قابل توجه است (Saxena and Naik, 2018).

از میان ماهواره‌هایی که امکان ثبت داده‌های مرتبط با آلودگی را فراهم می‌کنند، ماهواره سنتینل-۵ و سنسور سوار بر آن (TROPOMI) از قابلیت بالایی در تصویربرداری و پایش تعداد زیادی از گازهای کمیاب مانند ازن، فرمالدئید، دی اکسید گوگرد، متان، مونوکسیدکربن، آئروسول و همچنین دی اکسید نیتروژن برخوردار می‌باشد (Magro *et al.*, 2021, Lorente *et al.*, 2021, Vigouroux *et al.*, 2020, Prunet *et al.*, 2020, Ialongo *et al.*, 2020b, Theys *et al.*, 2019, Theys *et al.*, 2017, Lorente *et al.*, 2019). یکی از مهمترین مزایای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۵ در پایش آلودگی، مشاهدات با وسعت بالا و جهانی در یک لحظه مشخص از سطح زمین است که می‌تواند در بررسی توزیع مکانی آلاینده‌ها مؤثر باشد. البته استفاده از تصاویر سنتینل-۵ در پایش آلاینده‌ها محدودیت‌هایی نیز دارد که مهمترین آن‌ها تعداد مشاهدات پایین در طول روز و همچنین وجود ابر در برخی از مشاهدات می‌باشد. با توجه به اینکه آلاینده‌ها به سرعت در اتمسفر پخش می‌شوند بنابراین با استفاده از این تصویرها نمی‌توان با دقت بسیار بالایی پایش انجام داد (Virghileanu *et al.*, 2020). گاهی اوقات اثرهای آلودگی بر سلامت انسان براساس اطلاعات غیرمستقیم از آلاینده‌ها مدل‌سازی می‌شود و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این در حالی است که می‌توان با سنسورهای همچون (TROPOMI) اطلاعات را به‌صورت مستقیم

ایران می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت شهرهای مورد مطالعه بر روی نقشه ایران مشخص شده است. همچنین در جدول ۱ لیست شهرهای مورد مطالعه و برخی ویژگی‌های خاص آن‌ها نشان داده شده است. میزان غلظت آلاینده‌های دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ذرات معلق برای ۲۰ شهر بیان شده در جدول ۱ به ازای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ پایش خواهد گردید.

گرفته مورد بحث واقع می‌شود و در انتها مطالب این پژوهش مورد جمع‌بندی واقع می‌گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه جهت پایش آلاینده‌های هوا بوسیله تصویرهای ماهواره سنتینل-۵، ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی



شکل ۱- موقعیت شهرهای مورد مطالعه روی نقشه ایران
Fig. 1- Location of the studied cities on the map of Iran

جدول ۱- برخی از شهرهای بزرگ و صنعتی ایران و معرفی بزرگترین صنایع آن‌ها

Table 1. Some of Iran's largest and most industrial cities, as well as the launch of their most important industries

شهر City	طول و عرض جغرافیایی (درجه) Longitude and latitude (°)	مساحت تقریبی (کیلومتر مربع) Approximate area	جمعیت تقریبی (هزار نفر) Approximate population (10 ³)	برخی از مهمترین صنایع Some of the most important industries
اراک Arak	(49.70, 34.10)	110	520	نیروگاه حرارتی شازند، پتروشیمی پالایشگاه شازند، آلومینیوم‌سازی و ماشین‌سازی Shazand thermal power plant, Shazand petrochemical refinery, IRALCO and Machinesazi

ادامه جدول ۱- برخی از شهرهای بزرگ و صنعتی ایران و معرفی بزرگترین صنایع آن‌ها
 Table 1. Cont. Some of Iran's largest and most industrial cities, as well as the launch of their most important industries

شهر City	طول و عرض جغرافیایی (درجه) Longitude and latitude (°)	مساحت تقریبی (کیلومتر مربع) Approximate area	جمعیت تقریبی (هزار نفر) Approximate population (10 ³)	برخی از مهمترین صنایع Some of the most important industries
تهران Tehran	(54.10, 35.90)	750	8600	پالایشگاه نفت تهران، کارخانه‌های خودروسازی، سیمان، تجهیزات الکتریکی، نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند و نیروگاه گازی رودشور Tehran oil refinery, automobile, cement, and electrical equipment factories, Damavand combined cycle power plant and Rudshur gas power plant
اصفهان Isfahan	(51.65, 32.00)	550	3000	فولاد مبارکه، ذوب آهن، هواپیماسازی ایران، پالایش نفت اصفهان و نیروگاه حرارتی اصفهان Mobarakeh steel, Iron smelter, Iran aircraft Manufacturing, Isfahan oil refinery and Isfahan thermal power plant
تبریز Tabriz	(46.30, 38.10)	250	1600	تراکتورسازی، ماشین‌سازی، پتروشیمی تبریز، پالایشگاه تبریز، شرکت نفت پاسارگاد و نیروگاه حرارتی - گازی تبریز Tabriz tractor manufacturing, Tabriz Machinesazi manufacturing, Tabriz petrochemical industry, Tabriz oil refinery, Pasargad oil company and Tabriz thermal-gas power plant
ارومیه Urmia	(45.40, 37.35)	105	800	پتروشیمی، نیروگاه سیکل ترکیبی ارومیه و فولاد ارومیه Urmia Petrochemical industry, Urmia combined cycle power plant and Urmia steel
کرمان Kerman	(57.50, 30.30)	240	800	مس شهید باهنر، زغال سنگ کرمان، نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان و سیمان کرمان Shahid Bahonar copper, Kerman coal mine, Kerman combined cycle power plant and Kerman cement
همدان Hamedan	(48.50, 34.80)	65	650	قطعه‌سازی سینا، صنایع موکت همدان، کارخانه شیشه همدان و نیروگاه شهید مفتاح segmentation parts manufacturing, Hamedan carpet industries, Hamedan glass factory and Shahid Mofateh power plant
کرج Karaj	(50.95, 36.80)	220	1600	نیروگاه سیکل ترکیبی و گازی شهید منتظر قائم و صنایع کوچک Shahid Montazer Qaem combined cycle and gas power plant and small industries
قم Qom	(50.85, 34.65)	285	1200	صنایع کوچک و کارگاه‌های آجرسازی Small industries and brick factories
اهواز Ahvaz	(48.85, 31.35)	185	1200	نیروگاه حرارتی رامین اهواز، نیروگاه سیکل ترکیبی خرمشهر و فولاد خوزستان Ramin thermal power plant, Khorramshahr combined cycle power plant and Khuzestan steel
شیراز Shiraz	(52.55, 29.35)	240	1900	نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، نیروگاه گازی حافظ، پتروشیمی شیراز Fars combined cycle power plant, Hafez gas power plant, Shiraz petrochemical
خرم آباد Khorramabad	(48.60, 33.80)	65	380	پتروشیمی لرستان Lorestan petrochemical industry
مشهد Mashhad	(59.55, 36.35)	350	3100	نیروگاه گازی فردوسی، نیروگاه حرارتی طوس، صنایع کانی غیرفلزی و صنایع نساجی و چرم Ferdowsi gas power plant, Tus thermal power plant, non-metallic mineral industries, textile and leather industries
قزوین Qazvin	(50.00, 36.15)	65	405	نیروگاه حرارتی و سیکل ترکیبی شهید رجایی و صنایع کوچک Shahid Rajae thermal and combined cycle power plant and small industries

ادامه جدول ۱- برخی از شهرهای بزرگ و صنعتی ایران و معرفی بزرگترین صنایع آن‌ها
Table 1. Cont. Some of Iran's largest and most industrial cities, as well as the launch of their most important industries

شهر City	طول و عرض جغرافیایی (درجه) Longitude and latitude (°)	مساحت تقریبی (کیلومتر مربع) Approximate area	جمعیت تقریبی (هزار نفر) Approximate population (10 ³)	برخی از مهمترین صنایع Some of the most important industries
کرمانشاه Kermanshah	(47.05, 34.30)	95	950	پتروشیمی کرمانشاه و نیروگاه سیکل ترکیبی کرمانشاه Kermanshah petrochemical industry and Kermanshah combined cycle power plant
رشت Rasht	(49.60, 37.30)	180	680	نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان، صنعت نساجی و صنایع کوچک Gilan combined cycle power plant, textile industry and small industries
بندرعباس Bandar abbas	(56.30, 27.20)	70	530	پالایشگاه نفت بندرعباس، نیروگاه خلیج فارس، نیروگاه حرارتی بندرعباس، نیروگاه گازی خلیج فارس، فولاد و آلومینیوم المهدی Bandar Abbas oil refinery, Persian Gulf power plant, Bandar Abbas thermal power plant, Persian Gulf gas power plant, Almahdi Steel and Almahdi Aluminum
زاهدان Zahedan	(60.50, 29.30)	310	675	صنایع کوچک Small industries
یزد Yazd	(54.35, 32.00)	110	530	کارخانه یزدباف، کابل‌سازی شهید قندی، فولاد آلیاژی ایران و گروه پیشگامان کویر YazdBaf factory, Shahid Ghandi corporation complex, Iran alloy steel and Pishgaman Kavir group
زنجان Zanjan	(48.50, 36.65)	156	470	سرب و روی زنجان و پتروشیمی زنجان Zanjan lead and zinc and Zanjan petrochemicals

داده‌های مورد مطالعه

به‌منظور پایش غلظت آلاینده‌ها در این مقاله از تصویرهای سطح سه (L3) سنجنده (TROPOMI) ماهواره سنتینل-۵ استفاده شده است (developer) <https:// developer .s.google.com /earth-engine /datasets/ catalog>. ماهواره سنتینل-۵ به‌عنوان اولین ماهواره مأموریت کوپرنیکوس (Copernicus) و یکی از ابزارهای قدرتمند در زمینه پایش اتمسفر می‌باشد. این ماهواره دارای یک طیف سنج به نام (TROPOMI) بوده که تابش (Radiance) اشعه ماورا بنفش زمین را در طیفی بالا اندازه‌گیری می‌کند. از جمله هدف‌های سنتینل-۵، اطمینان از تداوم و پیوستگی داده‌های بین مشاهده‌های مأموریت‌های قبلی (OMI)، (GOME-2)، (SCIAMACHY) و (Envisat) مشاهده‌های آینده توسط سنتینل-۵ می‌باشد (de Vries et al., 2016). (TROPOMI) به‌صورت روزانه، با قدرت تفکیک مکانی ۷ کیلومتر × ۳.۵ کیلومتر از اتمسفر زمین تصویربرداری می‌کند که ۱۳ برابر بهتر از (OMI) است

(Shikwambana et al., 2020). تصاویر به‌دست آمده از (TROPOMI) دارای ۸ باند می‌باشد که چندین محدوده طیفی فرابنفش (UV)، نزدیک به مادون قرمز (NIR) و مادون قرمز با طول موج کوتاه^۶ را پوشش می‌دهد (Lorente et al., 2019). سنجنده (TROPOMI) قابلیت بالایی در تصویربرداری و پایش تعداد زیادی از آلاینده‌ها دارد. تصاویر این آلاینده‌ها را می‌توان با سه حالت مختلف در حالت زمان کمابیش آنی^۷، حالت آفلاین و حالت پردازش مجدد^۸ دریافت نمود. داده‌های حالت تقریباً آنی، در مدت ۳ ساعت پس از اخذ اطلاعات و داده‌ها آفلاین و پردازش مجدد چند روز پس از تصویربرداری در دسترس هستند (Shikwambana et al., 2020). در این پژوهش، از تعداد بالایی تصویر سطح سه که از طریق موتور گوگل ارث فراخوانی شده‌اند، استفاده شده است. در مطالعات با موضوع پایش کیفیت هوا در سایر نقاط دنیا از موتور گوگل ارث نیز استفاده شده است (Ghasempour et al., 2021). باندهای تصویری مورد استفاده در این مطالعه جهت استخراج آلاینده‌های مختلف در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

جدول ۲- باندهای مورد استفاده از تصاویر سنجنده (TROPOMI) ماهواره سنتینل-۵ در پایش آلاینده‌ها
(<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/>)
Table 2. Bands used by Sentinel-5 satellite image sensor (TROPOMI) in monitoring pollutants

حداقل و حداکثر مقادیر Max/Min values	توضیحات باند مورد استفاده Description	آلاینده Pollutant
-25 / .39	سنجه‌ای برای اندازه‌گیری میزان ذرات معلق در هوا با استفاده از جفت موج با طول موج-های ۳۸۸/۳۵۴ A measure of the prevalence of aerosols in the atmosphere, using the 354/388 wavelength pair.	سنجه جذب آئروسول Absorbing aerosol index
-0.0006 / 0.0096	غلظت ستون عمودی تروپوسفری با واحد mol/m ² Tropospheric vertical column of NO ₂ (mol/m ²)	دی اکسید نیتروژن NO ₂
-48 / .24	غلظت ستون عمودی در سطح زمین با واحد mol/m ² محاسبه شده با استفاده از تکنیک (DOAS) SO ₂ vertical column density at ground level, calculated using the DOAS technique	دی اکسید گوگرد SO ₂
-279 / .4.64	غلظت ستون یکپارچه‌شده عمودی با واحد mol/m ² Vertically integrated CO column density	مونوکسید کربن CO

نتایج و بحث

نیروگاه حرارتی رامین است. این نیروگاه تولید کننده ۴۲٪ برق خوزستان و ۶٪ از برق کل کشور است. ظرفیت تولید این نیروگاه ۱۹۰۳ مگاوات است. سوخت اصلی مصرفی این نیروگاه گاز طبیعی و سوخت اضطراری آن مازوت است. بی‌گمان وجود این نیروگاه در حوالی اهواز در بالا بودن میزان گاز دی اکسید گوگرد در این شهرستان بی‌تأثیر نیست. در پایش صورت گرفته، در شهرستان زاهدان کمترین مقدار دی اکسید گوگرد مشاهده شده است. نکته قابل تأمل افزایش میزان این آلاینده در سال ۲۰۲۰ در قیاس با سال ۲۰۱۹ در بیشتر شهرستان‌های مورد مطالعه است. این نشان می‌دهد که به احتمال زیاد نیروگاه‌ها و صنایع در سال ۲۰۲۰ فعالیت بیشتری در مقایسه با سال ۲۰۱۹ داشته‌اند. همانگونه که در نمودار شکل ۴ مشاهده می‌شود، تهران، رشت، بندرعباس و اهواز بالاترین میزان گاز مونوکسید کربن را در میان ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران دارا می‌باشند. در غالب شهرهای ایران میزان گاز مونوکسید کربن در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ بدون تغییر است. یکی از اصلی‌ترین عامل‌های تولید مونوکسید کربن در شهرها، احتراق سوخت خودروها و دود خارج شده از آگزوز آن‌ها می‌باشد. نتایج پایش نشان می‌دهد که احتمالاً میزان حمل و نقل، ترافیک و استفاده از اتومبیل‌ها تفاوت چندانی میان دو سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰

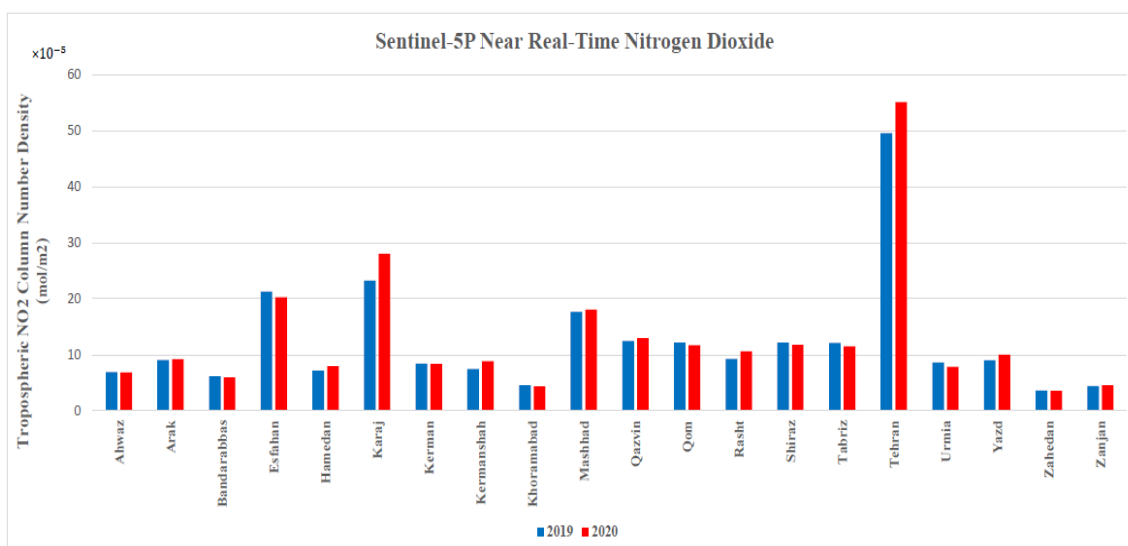
همانگونه که در بخش ۳ توضیح داده شد، در این مطالعه برای پایش آلاینده‌های هوا از تصاویر سنتینل-۵ استفاده شده و این پایش برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در مدت دو سال از ابتدای ۲۰۱۹ میلادی تا انتهای سال ۲۰۲۰ صورت گرفته است. نتایج این پایش در شکل (۲) تا (۵) نشان داده شده است. در نمودارهای مذکور مقادیر غلظت روزانه آلاینده‌ها به مدت یکسال نمایش داده شده است. نمودار شکل ۲ نشان می‌دهد که بیشترین میزان گاز دی اکسید نیتروژن در شهرستان تهران است. همچنین کمترین مقدار این گاز در زاهدان مشاهده شده است. میزان گاز دی اکسید نیتروژن در برخی از شهرها از جمله تهران، کرج، کرمانشاه، رشت و یزد در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ روند افزایشی داشته است. این در حالی است که این روند برای شهرهای اصفهان، شیراز، تبریز و ارومیه روند نزولی دارد. همچنین در بسیاری از شهرهای ایران این روند کمابیش بدون تغییر است. بیشترین میزان گاز دی اکسید گوگرد متعلق به شهرستان اهواز است (نمودار شکل ۳). یکی از اصلی‌ترین منابع تولید دی اکسید گوگرد، نیروگاه‌های حرارتی می‌باشند. در اطراف اهواز چندین نیروگاه تولید برق وجود دارد. یکی از نیروگاه فوق بحرانی در ایران و یکی از بزرگترین آن‌ها

تعیین گردید. نتایج این مقایسه در شکل ۶ و ۷ به ترتیب برای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ میلادی نمایش داده شده است.

در سال ۲۰۱۹، تهران آلوده‌ترین هوا را به لحاظ مجموع گازهای مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق (گرد و غبار) داشته است. همچنین زنجان کمترین میزان آلودگی را در مقایسه با سایر شهرستان‌های مورد مطالعه داشته است. در سال ۲۰۲۰، باز هم تهران به‌عنوان آلوده‌ترین شهر ایران شناخته می‌شود. در این سال نیز هوای زنجان در قیاس با سایر شهرستان‌های مورد مطالعه وضعیت بهتری داشته است. با مقایسه نمودارهای شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که کرج و کرمانشاه در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ افزایش آلودگی هوای قابل توجهی داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در مجموع میزان آلودگی هوا در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ با روندی کاهشی مواجه شده است که شاید یکی از مهمترین دلایل‌های، تأثیرگذاری همه‌گیری ویروس کرونا در سال ۲۰۲۰ و کاهش نسبی (و البته اندک) فعالیت‌های صنعتی و کاهش ترافیک خودروها می‌باشد.

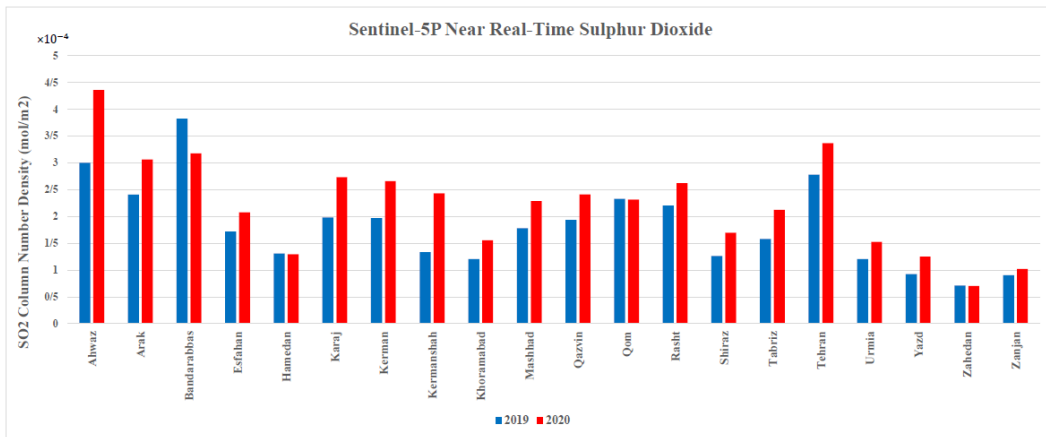
وجود ندارد. نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که بیشترین میزان ذرات معلق متعلق به شهرستان زاهدان است. همچنین کمترین مقدار آن مربوط به شهرستان قزوین است. سنجه ذرات معلق در سال ۲۰۲۰ در قیاس ۲۰۱۹ برای تمام شهرستان‌های مورد مطالعه روندی کاهشی داشته است. میزان گاز دی‌اکسید نیتروژن در برخی از شهرها از جمله تهران، کرج، کرمانشاه، رشت و یزد در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با سال ۲۰۱۹ روند افزایشی داشته است. بیشترین کاهش نیز متعلق به زاهدان می‌باشد.

سنجه کیفیت هوا (AQI) یک سنجه مهم برای نمایش جامع وضعیت آلودگی هوا است که با سلامت انسان در ارتباط است. این سنجه غلظت چند آلاینده را به یک شکل عددی واحد ساده می‌کند. این واحد اغلب در نمایش وضعیت کیفی هوا در ایستگاه‌های زمینی پایش آلاینده‌ها در بسیاری از کشورهای دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد (Li et al., 2019). در اینجا و به‌منظور مقایسه کلی میان کیفیت هوای همه شهرستان‌های مورد مطالعه به ازای هر چهار عامل آلاینده، تمام غلظت‌های اندازه‌گیری شده بالا توسط ماهواره سنتینل-۵ به‌طور یکسان نرمال گردید و جمع غلظت هر چهار آلاینده با وزن یکسان لحاظ و به‌صورت یک سنجه واحد



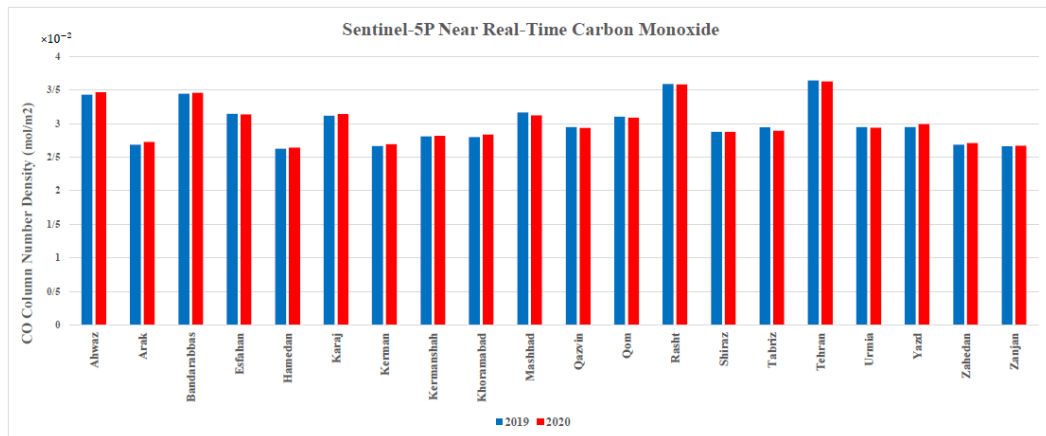
شکل ۲- پایش غلظت گاز دی‌اکسید نیتروژن برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با استفاده از سنجنده ماهواره سنتینل-۵ (TROPOMI)

Fig. 2- Monitoring the concentration of nitrogen dioxide for 20 large and industrial cities of Iran in 2019 and 2020 using the sensor (TROPOMI) of Sentinel-5 satellite



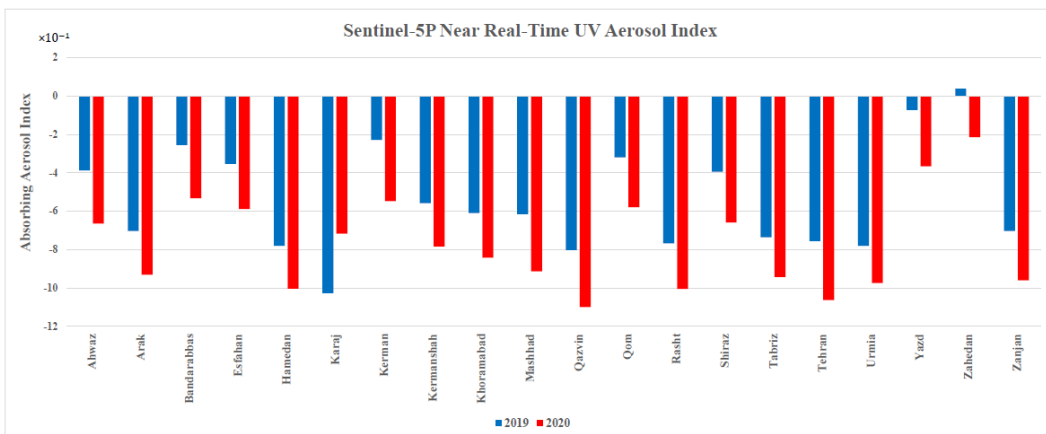
شکل ۳- پایش غلظت گاز دی اکسید گوگرد برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با استفاده از سنجنده ماهواره سنتینل-۵ (TROPOMI)

Fig. 3- Monitoring the concentration of sulfur dioxide for 20 large and industrial cities of Iran in 2019 and 2020 using the sensor (TROPOMI) of Sentinel-5 satellite



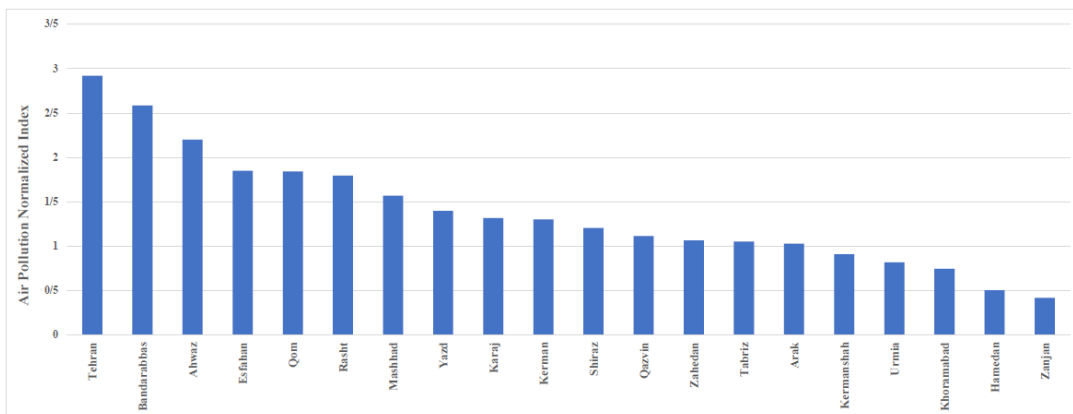
شکل ۴- پایش غلظت گاز مونوکسید کربن برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با استفاده از سنجنده ماهواره سنتینل-۵ (TROPOMI)

Fig. 4- Monitoring the concentration of carbon monoxide for 20 large and industrial cities of Iran in 2019 and 2020 using the sensor (TROPOMI) of Sentinel-5 satellite

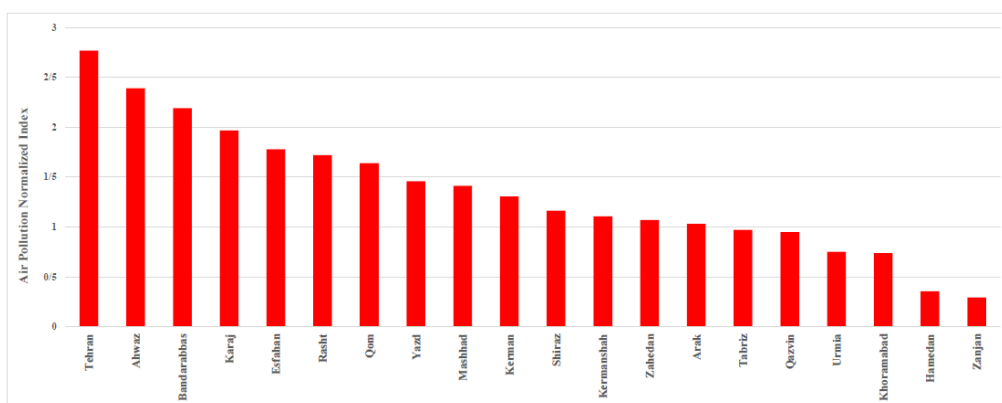


شکل ۵- پایش غلظت ذرات معلق برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با استفاده از سنجنده ماهواره سنتینل-۵ (TROPOMI)

Fig. 5- Monitoring the concentration of aerosols for 20 large and industrial cities of Iran in 2019 and 2020 using the sensor (TROPOMI) of Sentinel-5 satellite



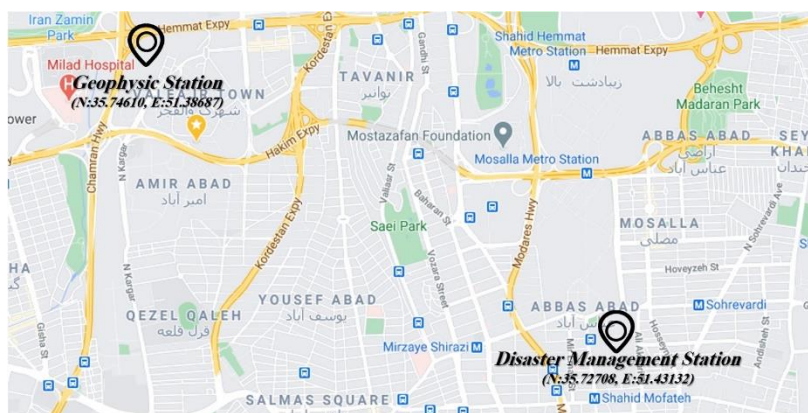
شکل ۶- مقایسه سطح آلودگی هوای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال ۲۰۱۹ میلادی
 Fig. 6- Comparison of air pollution level in 20 large and industrial cities of Iran in 2019



شکل ۷- مقایسه سطح آلودگی هوای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال ۲۰۲۰ میلادی
 Fig. 7- Comparison of air pollution level in 20 large and industrial cities of Iran in 2020

سنتینل-۵ مقایسه گردید. از داده‌های دو ایستگاه زمینی ثبت آلاینده ژئوفیزیک و ستاد مدیریت بحران در شهر تهران استفاده شد (<https://aqms.doe.ir/Home/AQI>). موقعیت مکانی این دو ایستگاه در شکل ۸ نشان داده شده است.

به‌منظور صحت سنجی نتایج به‌دست آمده در این مطالعه با استفاده از تصاویر سنجنده (TROPOMI) ماهواره سنتینل-۵، دو ایستگاه زمینی ثبت آلاینده‌ها در تهران انتخاب و نتایج پایش صورت گرفته به‌وسیله این دو ایستگاه با پایش ماهواره‌ای آلاینده‌ها با تصویرهای



شکل ۸- موقعیت مکانی ایستگاه‌های زمینی ثبت آلاینده‌های هوا ژئوفیزیک و ستاد مدیریت بحران واقع در شهر تهران
 Fig. 8- Location of Tehran geophysics air pollution ground-based stations and Tehran disaster mitigation and management organization ground-based stations

در رابطه (۱)، (L') سنجه کیفیت هوای اندازه گیری شده مربوط به هریک از آلاینده‌های CO ، NO_2 ، SO_2 و Aerosols توسط ایستگاه‌های زمینی ثبت میزان آلودگی هوا و (L'') مشاهدات صورت گرفته به وسیله تصاویر ماهواره سنتینل-۵ می‌باشد. در این رابطه (R) ضریب همبستگی خطی میان ایستگاه‌های زمینی ثبت میزان آلودگی هوا و تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ می‌باشد. نتایج خلاصه شده در **Error! Reference source not found.** صحت پایش‌های صورت گرفته با استفاده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ را تأیید می‌کند.

جدول ۳- ضریب همبستگی خطی نرمال شده میان مشاهده‌های زمینی و تصویرهای ماهواره‌ای سنتینل-۵
Table 3. The normalized linear correlation coefficient between ground observations and Sentinel-5 satellite imagery

Aerosols	CO	NO ₂	SO ₂	Station
-	0.80	0.78	0.81	ژئوفیزیک Geophysics
0.81	0.86	0.88	0.94	ستاد مدیریت بحران Disaster mitigation

باشد.

نتیجه‌گیری

آلودگی هوا امروزه یکی از مهمترین چالش‌ها در ایران به شمار می‌رود و همچنین نقش عمده‌ای در تغییرات اقلیم کشور ایفا می‌کند. عامل‌هایی همچون رشد جمعیت و پیرو آن افزایش خودرو و همچنین وجود صنایع متنوع (و اغلب قدیمی) و تقاضای انرژی مربوط به آن در ایران منجر به افزایش روند آلودگی در بسیاری از کلان‌شهرهای کشور گردیده است. بنابراین اندازه‌گیری دقیق آلاینده‌های هوا با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا برای تعیین چگونگی توزیع و اثرگذاری آن‌ها و همچنین، ارائه راهکارهایی برای مدیران در سطح استانی و ملی امری ضروری محسوب می‌شود. استفاده از ابزارها و فن‌آوری‌های مبتنی بر سنجش از دور به دلیل ماهیت تولید داده‌های پیوسته زمانی و مکانی از اهمیت بالایی برخوردار است. ماهواره سنتینل-۵ و سنجده سوار بر آن (TROPOMI) از قابلیت

آلاینده‌های (NO_2) ، (SO_2) و (CO) توسط هر دو ایستگاه زمینی و آلاینده ذرات معلق با استفاده از داده‌های ایستگاه زمینی ستاد مدیریت بحران (غلظت آلاینده PM_{10}) مورد پایش واقع گردید. جهت انجام مقایسه، میان نتایج پایش زمینی و ماهواره‌ای به ازای دو هفته ابتدای ماه‌های آوریل، جولای و اکتبر سال ۲۰۲۰ میلادی و ژانویه ۲۰۲۱ میلادی (معادل با ماه‌های فروردین، تیر، مهر و دی ماه ۱۳۹۹)، ضریب همبستگی خطی (رابطه ۱) نتایج محاسبه شد و نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است.

$$R = \frac{Cov(L', L'')}{\sqrt{var(L')var(L'')}} \quad (1)$$

از آنجایی که در بازه زمانی مورد مطالعه، ایستگاه زمینی ژئوفیزیک مشاهده‌هایی از سنجه آلاینده PM_{10} نداشته است، بنابراین در جدول ۳ مقداری برای ضریب همبستگی خطی به ازای آن وجود ندارد.

در این مطالعه نقش سنجش از دور ماهواره‌ای در پایش کیفیت هوا مشخص می‌شود. جدول ۳ نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ دارای اعتمادپذیری کافی می‌باشد و از این رو می‌توان از این ابزار در پایش و مدیریت مستمر کیفیت هوا در کشور بهره برد. با توسعه سامانه‌های پردازش ابری قدرتمند مانند موتور گوگل ارث می‌توان از خدمات رایگان این سامانه در پردازش‌های سنگین استفاده نمود. از طرفی با توجه به تراکم پایین و گاهی توزیع نامناسب ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوا، استفاده از تصویرهای رایگان سنتینل-۵ در رصد تغییرات غلظت آلاینده‌ها در تمام نقاط کشور می‌تواند سودمند

آلاینده‌ها در شهر تهران استفاده شده است. میان مقادیر به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با مقادیر زمینی حداقل ۷۸٪ همبستگی وجود دارد. بنابراین می‌توان با اعتمادپذیری کافی از پتانسیل تصاویرهای ماهواره سنتینل-۵ در پایش جامع هوای کشور استفاده نمود و از نتایج آن در بحث مدیریت و کاهش آلاینده‌های هوا در سطح کشور بهره برد.

سیاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوریان کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ((۹۹۰۳۰۴۱۴)) انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

¹ Sentinel-5

² TROPOspheric Monitoring Instrument

³ Google Earth Engine

⁴ Particulate matter

⁵ Aerosols

⁶ SWIR

⁷ Near Real Time

⁸ Reprocessing

Bromandi, P., Karaca, F., Nikfal, A., Jahanbakhshi, A., Tamjidi, M. and Kim, J.R., 2020. Impact of COVID-19 event on the air quality in Iran. *Aerosol and Air Quality Research*. 20, 1793-1804.

Caiazzo, F., Ashok, A., Waitz, I.A., Yim, S.H. and Barrett, S.R., 2013. Air pollution and early deaths in the United States. Part I: Quantifying the impact of major sectors in 2005. *Atmospheric Environment*. 79, 198-208.

Chowdhury, S. and Dey, S., 2016. Cause-specific premature death from ambient PM_{2.5} exposure in India: Estimate adjusted for baseline mortality. *Environment International*. 91, 283-290.

De Vries, J., Voors, R., Ording, B., Dingjan, J., Veefkind, P., Ludewig, A., Kleipool, Q.,

بالایی در تصویربرداری و پایش تعداد زیادی از گازهای کمیاب و همچنین ذرات معلق برخوردار است. در این پژوهش، قابلیت سنجنده (TROPOMI) ماهواره سنتینل-۵ در پایش آلودگی هوا ارزیابی شده است و همچنین بررسی روند تغییرات برخی آلاینده‌ها در شهرهای بزرگ و صنعتی ایران در دو سال اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران، میزان چهار آلاینده دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ذرات معلق (آئروسول‌ها) در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ مورد پایش واقع شده است. پایش صورت گرفته نشان می‌دهد که، شهر تهران آلوده-ترین شهر ایران در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بوده است. همچنین میزان آلاینده‌ها در سال ۲۰۲۰ اندکی در مقایسه با سال ۲۰۱۹ کاهش داشته است که شاید اصلی-ترین دلیل آن را می‌توان شیوع ویروس کرونا در سال ۲۰۲۰ و کاهش فعالیت‌های انسانی و البته صنعتی دانست. جهت ارزیابی صحت پایش صورت گرفته با تصویرهای ماهوره سنتینل-۵، از دو ایستگاه‌های زمینی ثبت

منابع

Hoogeveen, R. and Aben, I., 2016. TROPOMI on ESA's Sentinel 5p ready for launch and use. In *Proceedings 4th International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2016)*, 12 August, Paphos, Cyprus. p. 96880B-1- 96880B-12

Dickerson, R.R., Anderson, D.C. and Ren, X., 2019. On the use of data from commercial NO_x analyzers for air pollution studies. *Atmospheric Environment*. 214, 116873.

Filippini, T., Rothman, K.J., Goffi, A., Ferarri, F., Maffei, G., Orsini, N. and Vinceti, M., 2020. Satellite-detected tropospheric nitrogen dioxide and spread of SARS-CoV-2 infection in Northern Italy. *Science of the Total Environment*. 739, 140278.

- Finney, D.L., Doherty, R.M., Wild, O., Young, P.J. and Butler, A., 2016. Response of lightning NO_x emissions and ozone production to climate change: Insights from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 5492-5500.
- Ghasempour, F., Sekertekin, A. and Kutoglu, S. H., 2021. Google Earth Engine based spatio-temporal analysis of air pollutants before and during the first wave COVID-19 outbreak over Turkey via remote sensing. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128599.
- Ghude, S.D., Chate, D.M., Jena, C., Beig, G., Kumar, R., Barth, M.C., Pfister, G.G., Fadnavis, S. and Pithani, P., 2016. Premature mortality in India due to PM_{2.5} and ozone exposure. *Geophysical Research Letters*, 43(9), 4650-4658.
- Greenberg, N., Carel, R.S., Derazne, E., Bibi, H., Shpriz, M., Tzur, D. and Portnov, B.A., 2016. Different effects of long-term exposures to SO₂ and NO₂ air pollutants on asthma severity in young adults. *Journal of toxicology and environmental health, Part A*, 79(8), 342-351.
- Grewe, V., Dahlmann, K., Matthes, S. and Steinbrecht, W., 2012. Attributing ozone to NO_x emissions: Implications for climate mitigation measures. *Atmospheric environment*, 59, 102-107.
- Hedelt, P., Efremenko, D.S., Loyola, D.G., Spurr, R. and Clarisse, L., 2019. Sulfur dioxide layer height retrieval from Sentinel-5 Precursor/TROPOMI using FP_ILM. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10), 5503-5517.
- Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J. and Douros, J., 2020. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ product with ground-based observations in Helsinki and first societal applications. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 4-8 May, p. 9963.
- Kampa, M. and Castanas, E., 2008. Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367.
- Kim, S.W., Heckel, A., McKeen, S.A., Frost, G.J., Hsie, E.Y., Trainer, M.K., Richter, A., Burrows, J.P., Peckham, S.E. and Grell, G.A., 2006. Satellite-observed US power plant NO_x emission reductions and their impact on air quality. *Geophysical Research Letters*, 33(22).
- Koukouli, M.-E., Skoulidou, I., Karavias, A., Parcharidis, I., Balis, D., Manders, A., Segers, A., Eskes, H. and Van Geffen, J., 2021. Sudden changes in nitrogen dioxide emissions over Greece due to lockdown after the outbreak of COVID-19. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 1759-1774.
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A., 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371.
- Li, H., Wang, J., Li, R. and Lu, H., 2019. Novel analysis-forecast system based on multi-objective optimization for air quality index. *Journal of cleaner production*, 208, 1365-1383.
- Li, W., Thomas, R., El-Askary, H., Piechota, T., Struppa, D. and Ghaffar, K. A. A., 2020. Investigating the significance of aerosols in determining the coronavirus fatality rate among three European Countries. *Earth Systems and Environment*, 4, 513-522.
- Lorente, A., Boersma, K.F., Eskes, H.J., Veeffkind, J.P., Van Geffen, J.H.G.M., De Zeeuw, M.B., van der Gon, H.D., Beirle, S. and Krol, M.C., 2019. Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI.

Scientific reports, 9(1), 1-10.

Omrani, H., Omrani, B., Parmentier, B. and Helbich, M., 2020. Spatio-temporal data on the air pollutant nitrogen dioxide derived from Sentinel satellite for France. *Data in brief*, 28, 105089.

Park, J., Shin, M., Lee, J. and Lee, J., 2021. Estimating the effectiveness of vehicle emission regulations for reducing NO_x from light-duty vehicles in Korea using on-road measurements. *Science of The Total Environment*, 767, 144250.

Prunet, P., Lezeaux, O., Camy-Peyeret, C. and Thevenon, H., 2020. Analysis of the NO₂ tropospheric product from S5P TROPOMI for monitoring pollution at city scale. *City and Environment Interactions*, 8, 100051.

Quesada-Ruiz, S., Attié, J.L., Lahoz, W.A., Abida, R., Ricaud, P., Amraoui, L.E., Zbinden, R., Piacentini, A., Joly, M., Eskes, H. and Segers, A., 2020. Benefit of ozone observations from Sentinel-5P and future Sentinel-4 missions on tropospheric composition. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 131-152.

Safarianzengir, V., Sobhani, B., Yazdani, M.H. and Kianian, M., 2020. Monitoring, analysis and spatial and temporal zoning of air pollution (carbon monoxide) using Sentinel-5 satellite data for health management in Iran, located in the Middle East. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 13, 709-719.

Saxena, P. and Naik, V. eds., 2018. *Air pollution: sources, impacts and controls. Methods for the measurement of air pollutions.* CABI, Nosworthy, Wallingford, Oxfordshire, OX108DE, UK, 55-78.

Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Borsdorff, T., Deutscher, N. M., Feist, D. G., Griffith, D. W. and Hase, F., 2019. A scientific algorithm to

simultaneously retrieve carbon monoxide and methane from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 6771-6802.

Shikwambana, L., Mhangara, P. and Mbatha, N., 2020. Trend analysis and first time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5 P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102130.

Sun, W., Zhu, L., De Smedt, I., Bai, B., Pu, D., Chen, Y., Shu, L., Wang, D., Fu, T. M. and Wang, X., 2021. Global significant changes in formaldehyde (HCHO) columns observed from space at the early stage of the COVID-19 pandemic. *Geophysical Research Letters*, 48, 2e020GL091265.

Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., Pedernana, M., Arellano, S., Galle, B., Fernandez, D. and Carlito, C.J.M., 2019. Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.

Tiwari, S., Bisht, D.S., Srivastava, A.K., Pipal, A.S., Taneja, A., Srivastava, M.K. and Attri, S.D., 2014. Variability in atmospheric particulates and meteorological effects on their mass concentrations over Delhi, India. *Atmospheric Research*, 145, 45-56.

Tiwari, S., Srivastava, A.K., Singh, A.K. and Singh, S., 2015. Identification of aerosol types over Indo-Gangetic Basin: implications to optical properties and associated radiative forcing. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(16), 12246-12260.

Vigouroux, C., Langerock, B., Bauer Aquino, C.A., Blumenstock, T., Cheng, Z., De Mazière, M.,

De Smedt, I., Grutter, M., Hannigan, J.W., Jones, N. and Kivi, R., 2020. TROPOMI–Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(7), 3751-3767.

Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B.A., Nistor, C. and Dobre, R., 2020. Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), 3575.

Wang, L., Li, M., Yu, S., Chen, X., Li, Z., Zhang, Y., Jiang, L., Xia, Y., Li, J. and Liu, W., 2020. Unexpected rise of ozone in urban and rural areas, and sulfur dioxide in rural areas during the coronavirus city lockdown in Hangzhou, China: implications for air quality. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1713-1723.

Zhao, F., Liu, C., Cai, Z., Liu, X., Bak, J., Kim, J., Hu, Q., Xia, C., Zhang, C. and Sun, Y., 2021. Ozone profile retrievals from TROPOMI: Implication for the variation of tropospheric ozone during the outbreak of COVID-19 in China. *Science of The Total Environment*, 764, 142886.

Available online at:
<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog>

Available online at: <https://aqms.doe.ir/Home/AQI>





Environmental Sciences Vol.20 / No.2 / Summer 2022

81-98

Original Article

Air pollution monitoring using Sentinel-5 (Case study: big industrial cities of Iran)

Mohammad Amin Ghannadi, * Matin Shahri and Amirreza Moradi

Department of Geoscience Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Received: 2021.03.06 Accepted: 2022.02.08

Ghannadi, M.A., Shahri, M. and Moradi, A., 2022. Air pollution monitoring using Sentinel-5 (Case study: big industrial cities of Iran). *Environmental Sciences*. 20(2): 81-98.

Introduction: Air pollution and its negative effects on human health have become a major issue around the world, especially in developing countries and Iran. Contaminants such as nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide, and aerosols, in addition to having significant negative health consequences, cause to damage vegetation and contribute to global climate change. Therefore, the comprehensive monitoring of pollutants and, consequently, appropriate management decisions to address the issue is required. Remote sensing methods, especially Sentinel-5, the European Space Agency's most recent project (in collaboration with the Netherlands), which allows for the capture of images in various spectral bands using a TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) sensor, are recognized as a useful tool for monitoring various types of air pollutants.

Material and methods: In this analysis, the most significant air contaminants such as nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide, and aerosol were monitored using Sentinel-5 satellite images for 20 major industrial cities in Iran in 2019 and 2020. A large number of level-3 images collected from Google Earth Engine were used in this research. Ground-based stations were used to verify the monitoring process.

Results and discussion: The results show that monitoring values obtained using Sentinel-5 satellite images are at least 78 percent correlated with ground-based station values. As a result, it has been demonstrated that Sentinel-5 satellite images can be successfully used in management studies with the aim of reducing air pollution. Based on the results, it can also be inferred that, Tehran and Zanzan are respectively the most and the least polluted city in terms of total carbon monoxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and dust in 2019. The

Corresponding Author: *Email Address.* m.ghannadi@arakut.ac.ir*
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1026>
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.2.13.4>

same is true for 2020. It is also clear that air pollution levels in Karaj and Kermanshah increased significantly in 2020 compared to 2019. Another significant finding is that, in general, air pollution levels in 2020 are lower than in 2019. One significant explanation may be the effect of the Covid-19 pandemic in 2020, which resulted in a decrease in industrial activity and reduced traffic and congestion on the roads.

Conclusion: In general, the results of this research showed that it is possible to systematically monitor the air pollutants using images captured by TROPOMI sensor on the Sentinel-5 satellite with acceptable accuracy. The results of this study can help researchers and urban managers for appropriate management in metropolitan areas.

Keywords: Air pollution, Sentinel-5 Images, TROPOMI, Industrial cities of Iran.