

Assessment of Spatiotemporal Changes of NO₂ Using TROPOMI Sensor in Khuzestan Province, Iran

Kazem Rangzan¹, **Mostafa Kabolizadeh²**, **Shahin Mohammadi³**

Original Article

Abstract

Background: Khuzestan province is one of the largest industrial provinces in Iran, with high air pollution. One of the main air pollutants is nitrogen dioxide (NO₂) in the atmosphere, which is linked to several epidemiological and environmental effects. Thus, spatial and temporal monitoring of NO₂ is crucial for land managers. So, the aim of this study was the spatiotemporal evaluation of NO₂ in Khuzestan Province, Iran, using Sentinel 5 (TROPOMI).

Methods: Initially, the amount of tropospheric NO₂ concentration was estimated in each month. In the next step, using ArcMap software, the monthly average of tropospheric NO₂ was extracted from 12 months. Moreover, the location of 100 important air pollutant industries in the Khuzestan Province was extracted using Google Earth image. Thus, using the monthly average NO₂ concentrations and the location of the cities and industries, the monthly average pollution of this pollutant was extracted for the cities and industries. Finally, the cities and industries of air pollution in Khuzestan Province were prioritized based on of tropospheric NO₂ concentration.

Findings: The maximum concentrations of this gas was in Bavi, Ahvaz, Abadan, and Mahshahr cities; and respectively, this gas had the lowest values of NO₂ in Izeh, Lali, and Baghmalek cities. Moreover, in the cold months of the year, Khorramshahr and Mahshahr had higher concentrations of NO₂ in comparison to the warm months of the year. The results of the spatial analysis revealed that the highest concentration of NO₂ was in the Farabi Petrochemical Company, Khuzestan Steel Company, Ghadir, and Razi Petrochemicals, respectively.

Conclusion: According to the findings of this study, it can be deduced the influence of local emission sources of NO₂ in Khuzestan Province is related to population density, high traffic of motor vehicles, and industrial activities.

Keywords: Air pollutions; Particulate matters; Time series; Sentinel 5; Iran

Citation: Rangzan K, Kabolizadeh M, Mohammadi S. **Assessment of Spatiotemporal Changes of NO₂ Using TROPOMI Sensor in Khuzestan Province, Iran.** J Health Syst Res 2021; 17(2): 87-96.

1- Associate Professor, Department of Remote Sensing and Geographical Information System (GIS), Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and Geographical Information System (GIS), Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- PhD Student, Department of Remote Sensing and Geographical Information System (GIS), Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Corresponding Author: Kazem Rangzan; Associate Professor, Department of Remote Sensing and Geographical Information System (GIS), Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; Email: kazemrangzan@scu.ac.ir

بررسی زمانی - مکانی آلودگی دی‌اکسید نیتروژن در استان خوزستان با استفاده از سنجنده TROPOMI

کاظم رنگزن¹، مصطفی کابلی‌زاده²، شاهین محمدی³

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: استان خوزستان یکی از بزرگ‌ترین استان‌های صنعتی ایران با آلاینده‌های زیاد در هوا می‌باشد. یکی از آلاینده‌های اصلی هوا، دی‌اکسید نیتروژن (Nitrogen dioxide یا NO₂) است که بررسی آن در سطح استان برای مدیران و برنامه‌ریزان، می‌تواند بسیار حایز اهمیت باشد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مکانی - زمانی آلاینده NO₂ در استان خوزستان با استفاده از ماهواره سنتینل 5 [سنجنده TROPOMI] انجام شد.

روش‌ها: ابتدا مقدار غلظت آلودگی NO₂ تروپوسفری در هر ماه برآورد گردید. در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار ArcMap، میانگین ماهانه از غلظت این آلاینده برای استان خوزستان به دست آمد. از طرف دیگر، موقعیت ۱۰۰ صنعت مهم آلاینده هوا در استان خوزستان با استفاده از نقشه‌های Google Earth تهیه شد. در نهایت، شهرها و صنایع استان خوزستان به ترتیب میزان غلظت آلودگی NO₂ تروپوسفری اولویت‌بندی گردید.

یافته‌ها: مقادیر بیشینه غلظت NO₂ به ترتیب در شهرهای باوی، اهواز، آبادان و ماهشهر مشاهده گردید. تراکم این گاز در شهرهای ایذه، لالی و باغ‌ملک کمترین مقادیر را به خود اختصاص داد. در ماه‌های سرد سال، غلظت این آلاینده در شهرهای خرمشهر و بندر ماهشهر بیشتر از ماه‌های گرم سال بود. همچنین، نتایج تجزیه و تحلیل آلودگی این آلاینده در صنایع نشان داد که بیشترین غلظت آن در صنایع پتروشیمی فارابی مشاهده گردید و در اولویت‌های بعدی، می‌توان به صنایع فولاد خوزستان و پتروشیمی غدیر و رازی اشاره نمود.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش، چنین می‌توان استنباط نمود که مناطق با غلظت بالای NO₂ در استان خوزستان، مربوط به شهرهایی با تراکم جمعیت زیاد و فعالیت‌های صنعتی است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا؛ ذرات معلق؛ سری‌های زمانی؛ سنتینل 5؛ ایران

ارجاع: رنگزن کاظم، کابلی‌زاده مصطفی، محمدی شاهین. بررسی زمانی - مکانی آلودگی دی‌اکسید نیتروژن در استان خوزستان با استفاده از سنجنده TROPOMI.

مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۴۰۰؛ ۱۷ (۲): ۹۶-۸۷

تاریخ چاپ: ۱۴۰۰/۴/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۱۹

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

آلاینده‌ها، بر افزایش میزان مرگ و میر و بروز سرطان‌ها باشد (۵). طبق گزارش‌های سازمان جهانی بهداشت، سالانه حدود ۷ میلیون نفر در اثر بیماری‌های مربوط به آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند (۶). مهم‌ترین آلاینده‌های هوا شامل کربن مونوکسید، ازن، اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق می‌باشد. بر اساس نتایج تحقیقات، کلیه آلاینده‌های هوا (جامد، مایع و گاز) از جمله دی‌اکسید گوگرد، ازن، ذرات معلق، کربن مونوکسید و اکسید نیتروژن از جمله خطرات جدی سلامت انسان به حساب می‌آیند (۷). دی‌اکسید نیتروژن (Nitrogen dioxide یا NO₂)، یکی از شاخص‌های آلودگی هوا به شمار می‌رود که گازی مرئی با رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز و بویی تند است و بیشترین غلظت را در بین اکسیدهای نیتروژن در هوای آزاد دارد (۸). سیستم‌های گرمایشی، وسایل نقلیه موتوری، نیروگاه‌ها، برق ناشی از تخلیه الکتریکی رعد و برق ابرها و گسیل ناشی از خاک و آتش‌سوزی جنگل‌ها، از جمله مهم‌ترین منابع NO₂ به شمار می‌روند (۹).

مقدمه

آلاینده‌های شیمیایی خطرناک توسط تعدادی از فعالیت‌های طبیعی و مصنوعی تولید و وارد محیط زیست می‌شوند و در نهایت، موجب بروز اثرات نا مطلوبی بر سلامتی افراد جامعه و محیط زیست خواهند شد. امروز بسیاری از شهرهای بزرگ دنیا به خصوص شهرهای صنعتی، با مشکلات زیست محیطی مواجه هستند که در رأس آن‌ها وضعیت نامطلوب کیفیت هوا است (۱). این شهرها با رشد بی‌رویه جمعیت، فعالیت‌های صنعتی، تراکم وسایل نقلیه و عوامل جغرافیایی مانند تغییرات آب و هوایی و تغییر الگوی جوی، وارونگی دمایی و توپوگرافی، روز به روز بیشتر در معرض آلودگی قرار می‌گیرند (۲). بر اساس مطالعات انجام شده در رابطه با آلاینده‌های هوا، بین میزان غلظت آلاینده‌ها و بسیاری از اثرات سوء بهداشتی همچون مرگ و میر، علائم تنفسی، حمله‌های آسمی و برونشیت حاد، بستری شدن در بیمارستان به دلیل بیماری‌های قلبی و تنفسی و محدود شدن فعالیت‌ها ارتباط مستقیمی وجود دارد (۳، ۴)، اما به نظر می‌رسد مهم‌ترین اثرات بهداشتی این

۱- دانشیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- استادیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

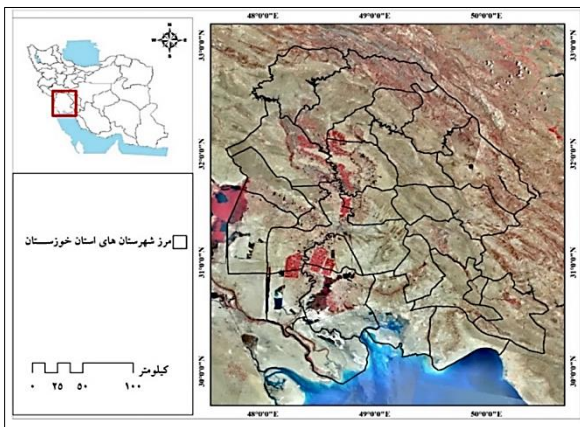
نویسنده مسؤول: کاظم رنگزن؛ دانشیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

Email: kazemrangzan@scu.ac.ir

از استخراج اطلاعات مربوط به این آلاینده، وضعیت مکانی صنایع آلاینده هوا در استان خوزستان نیز استخراج گردید تا ارتباط بین صنایع و این آلاینده مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.

روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: استان خوزستان در عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه، در جنوب غربی کشور ایران واقع شده است (شکل ۱).



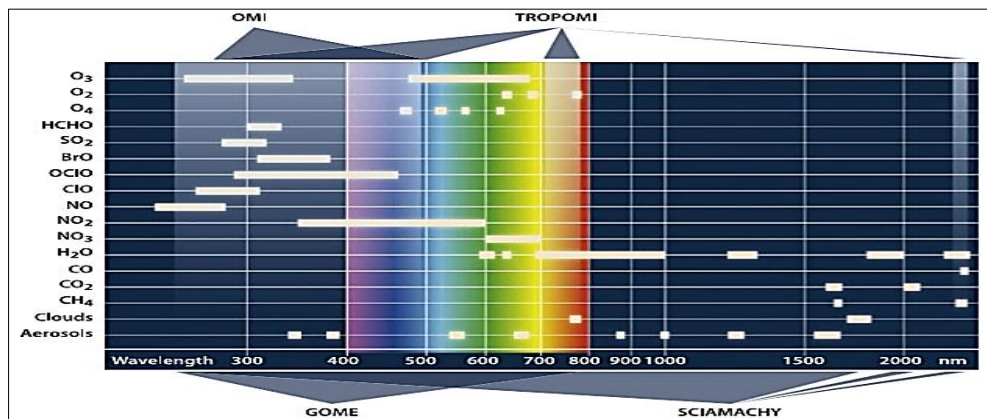
شکل ۱. موقعیت استان خوزستان در کشور

این استان از جهت شمال شرق و مشرق با استان‌های کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال و بختیاری، از جنوب شرق با استان بوشهر، از شمال و شمال غربی به ترتیب با استان‌های لرستان و ایلام و از جنوب با خلیج فارس و از غرب با کشور عراق هم‌مرز می‌باشد. در بین شهرهای خوزستان، بیشترین ارتفاع از سطح دریا را شهر ایذه با ۷۶۰ متر و کمترین ارتفاع را شهر هندیجان با ۲ متر دارد. این استان در زمینه تولید محصولات پتروشیمی و شیمیایی در کشور با توان تولید فعلی ۲۰ میلیون تن در سال، مقام اول را به خود اختصاص داده است. استعدادها و پتانسیل‌های منحصر به فرد استان خوزستان و موقعیت استراتژیک آن، باعث ایجاد سرمایه‌گذاری‌های بزرگی در این استان شده است. در این میان، ۶۰ درصد از سرمایه‌گذاری مربوط به بخش صنعت این استان در شهر ماهشهر به دلیل وجود صنایع پتروشیمی و ۳۰ درصد نیز در شهر اهواز به دلیل کشت صنعت‌ها و طرح‌های بزرگ فولاد و ۱۰ درصد باقی‌مانده در سایر شهرستان‌های استان می‌باشد.

روش کار: ابزار پایش تروپوسفر (TROPOMI) در تاریخ ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷ بر روی ماهواره سنتینل ۵ از مجموعه برنامه فضایی کوپرنیکوس به فضا پرتاب شد. این دستگاه با هندسه تصویربرداری Pushbroom، اتمسفر زمین را در سه محدوده فرابنفش و مرئی (UV یا Ultraviolet) (۲۷۰ تا ۴۹۵ نانومتر)، مادون قرمز نزدیک (Near-infrared یا NIR) (۶۷۵ تا ۷۷۵ نانومتر) و مادون قرمز کوتاه (Short-wavelength-infrared یا SWIR) (۲۳۰۵ تا ۲۳۸۵ نانومتر) تصویربرداری می‌کند (شکل ۲). در **Error! Reference source not found.** مشخصات کامل این سه ناحیه طیفی ارایه شده است (۲۴).

به منظور بررسی آلاینده‌های هوا، دو روش مرسوم اندازه‌گیری زمینی و ماهواره‌ای وجود دارد. پژوهش‌های زیادی در رابطه با اندازه‌گیری زمینی آلاینده‌ها در داخل و خارج کشور انجام شده است (۱۱، ۱۰)، اما اندازه‌گیری زمینی آلاینده‌ها به دلیل هزینه بالا دستگاه‌های اندازه‌گیری و عدم پیوستگی آن، برای بررسی مکانی-زمانی مناسب نمی‌باشد؛ در حالی که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان آلاینده‌ها را به صورت مکانی و زمانی و با هزینه کم در سطح وسیع بررسی نمود. در فن‌آوری سنسجش از دور، این امکان وجود دارد تا توزیع مکانی ذرات معلق در هوا ارزیابی شود و بدون شک این تکنیک یک فرصت منحصر به فرد برای استخراج آلاینده‌ها فراهم می‌نماید (۱۲). تاکنون در اتمسفر مقدار NO_2 با استفاده از سنسجدهای مختلفی همچون Measurements of Pollution In The Troposphere SCanning Imaging Absorption spectroMeter for (MOPITT) (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) (SCIAMACHY) Atmospheric Cartography (TROPOMI) TROPOspheric Monitoring Instrument اندازه‌گیری شده است. در این میان، مطالعات زیادی به منظور بررسی آلاینده‌های هوا با استفاده از سنسجش از دور در دو دهه اخیر انجام شده است که به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. برخی از محققان به ارزیابی محصولات سنسجده Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) به منظور آشکارسازی توده‌های گرد و غبار در استان خوزستان پرداختند و نتیجه‌گیری کردند که محصولات این سنسجده می‌تواند برای مدل‌سازی گرد و غبار مفید واقع شود (۱۶). در پژوهش دیگری به منظور ارزیابی NO_2 در کشور چین، از داده‌های سنسجدهای SCIAMACHY، Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) و Ozone Monitoring Instrument (OMI) استفاده شد و کاربرد مؤثر این داده‌ها در ارزیابی آلودگی هوا مورد تأیید قرار گرفت (۱۷، ۱۸). محققانی در ایالات متحده آمریکا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سنسجده OMI، روند NO_2 را طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار دادند (۱۹). به منظور بررسی NO_2 در کشورهای در حال توسعه و آگاهی از وضعیت این آلاینده در سطح جهان، مطالعاتی با استفاده از سنسجدهای SCIAMACHY و GOME انجام گرفت و نتایج آن نشان داد که مقدار NO_2 در کشورهای در حال توسعه در حال افزایش می‌باشد. این محققان بیان کردند که اصلی‌ترین عامل در افزایش این آلاینده به ویژه در کشورهای خاورمیانه، مصرف سوخت فسیلی بوده است (۲۰).

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که در کشورها و شهرهای مختلف در داخل و خارج کشور، آلاینده‌های هوا با استفاده از سنسجش از دور بررسی شده‌اند، اما پژوهشی که آلاینده‌های هوا را با استفاده از این تکنیک‌ها و داده‌ها برای استان خوزستان ثبت کرده باشد، بسیار اندک و در صورت وجود، در رابطه با مدل‌سازی گرد و غبار بوده است (۲۱-۲۳، ۱۶). خوزستان یکی از بزرگ‌ترین استان‌های صنعتی کشور است که آلاینده‌های هوا مانند NO_2 در آن به مراتب زیاد می‌باشد، اما سندی که این آلاینده را برای استان خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بررسی نماید، یافت نشد. با این حال، آگاهی از نحوه توزیع این آلاینده در سطح استان برای مدیران و برنامه‌ریزان حوزه سلامت و برنامه‌ریزی شهری، می‌تواند بسیار حایز اهمیت باشد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مکانی-زمانی آلاینده NO_2 در استان خوزستان انجام گرفت. پس



شکل ۲. دامنه طیفی در بخش‌های مختلف TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) در مقایسه با SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY)، Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) و Ozone Monitoring Instrument (OMI) (۲۴)

مدت یک سال تهیه و جمع‌آوری شد. بر این اساس، برای هر ماه یک تصویر و در مجموع، ۱۲ تصویر پردازش گردید که تاریخ و سایر مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که واحد داده‌های تهیه شده بر حسب مول بر مترمربع می‌باشد.

پردازش و محصولات: پس از اخذ تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز، باید پردازش‌هایی بر روی این محصولات اعمال گردد تا برای تجزیه و تحلیل و خروجی گرفتن آماده شود. بدین منظور، تمامی این تصاویر داخل نرم‌افزار SNAP نسخه ۷ فراخوانی شد. در حالت اولیه، این تصاویر فاقد اطلاعات مختصاتی می‌باشند. بنابراین، باید با استفاده از ابزار Attach Pixel Geocoding در نرم‌افزار SNAP، اطلاعات مختصات برای آن‌ها تعریف گردد. در مرحله بعد، لازم است که سیستم مختصات مناسبی برای لایه‌ها تعریف شود. بنابراین، با استفاده از ابزار Reprojection، سیستم مختصات لایه‌ها به WGS 1984 تغییر یافت. این لایه‌ها با فرمت TIFF ذخیره گردید و برای تحلیل‌های بعدی و خروجی گرفتن از لایه‌ها به نرم‌افزار ArcMap انتقال یافت. همچنین، یک لایه میانگین ماهانه آلودگی NO₂ با استفاده از داده‌های ماهانه این آلاینده در ماه‌های مختلف (جدول ۲) به وسیله ابزار محاسبات سلولی ArcMap تهیه گردید. لازم به ذکر است که تمامی لایه‌ها در عدد ۱۰^{-۵} ضرب شد. بنابراین، برای تبدیل مقادیر به واحد مول بر مترمربع، باید لایه‌ها در عدد ۱۰^{-۵} شوند. پس از تخمین مقدار متوسط ماهانه این آلاینده برای استان خوزستان، متوسط آلودگی NO₂ در سطح هر شهر با استفاده از نرم‌افزار ArcMap نیز به دست آمد. در نهایت، شهرهای استان بر اساس میزان آلودگی این آلاینده اولویت‌بندی شدند.

از طریق ناحیه اول می‌توان O₃ (ازن)، SO₂ (دی‌اکسید گوگرد)، و NO₂ و HCHO (فرمالدئید) را برآورد نمود. از مزایای این سنجنده می‌توان به قدرت تفکیک مکانی بالا، پوشش جهانی روزانه و نسبت سیگنال به نویز بالا اشاره کرد (۲۴). این ماهواره در حال حاضر جدیدترین ماهواره به منظور پایش آلودگی می‌باشد که می‌تواند اطلاعات به‌روز را در اختیار کاربران قرار دهد و از سایر حسگرهای مشابه OMI و SCIAMACHY با تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر برای کسب و ضبط اطلاعات استفاده می‌کند. سنجنده TROPOMI از لحاظ قدرت تفکیک طیفی، مکانی و زمانی نسبت به سنجنده‌های قبلی عملکرد بهتری دارد (۲۴). بنابراین، در مطالعه حاضر، از این سنجنده جهت پایش آلودگی استفاده گردید. اگرچه استفاده از حسگرهای نصب شده بر روی بالون و هواپیما به منظور اعتبارسنجی این سنجنده هم می‌تواند مفید باشد (۲۵)، اما داده‌ای برای این ارزیابی در استان در دسترس نیست. لازم به ذکر است که تحقیقاتی در سطح جهانی، مناسب بودن برآورد این سنجنده در تخمین آلاینده‌های جوی را برای کشور ایران تأیید کرده‌اند (۲۶، ۱۵) و همچنین، داده‌های این سنجنده همبستگی بیش از ۷۵ درصد را با مشاهدات واقعی نشان داده‌اند (۲۸، ۲۷).

یکی از اهداف اصلی این ماهواره، اندازه‌گیری غلظت NO₂ (یکی از آلاینده‌های اصلی جو) (۲۹) در جو بود که با استفاده از باندهای ۳ و ۴ و در بخش فرابنفش و مرئی اندازه‌گیری می‌شود (۲۴). در مطالعه حاضر، داده‌های سنجنده TROPOMI و محصول ستون NO₂ در تروپوسفر، از سایت پایگاه داده آژانس فضایی اروپا از تاریخ ۳ شهریور سال ۱۳۹۷ تا ۲ مرداد سال ۱۳۹۸ به

جدول ۱. مشخصات باندهای طیفی TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) (۲۴)

آشکارساز	UV	UV	UVIS	NIR	NIR	SWIR
باند	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دامنه طیفی	۲۳۰-۲۰۰	۲۰۰-۲۲۰	۳۱۰-۴۰۰	۴۰۰-۵۰۰	۶۷۵-۷۲۵	۲۲۸۵-۲۳۰۰
قدرت تفکیک طیفی (نانومتر)	۱/۰۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۲۵
قدرت تفکیک مکانی	۲۸*۲۱	۷*۷	۷*۷	۷*۷	۷*۷	۷*۷

UV: Ultraviolet; UVIS: Ultraviolet Imaging Spectrograph; NIR: Near-infrared; SWIR: Short-wavelength-infrared

جدول ۲. مشخصات تصاویر مورد استفاده در تحقیق حاضر

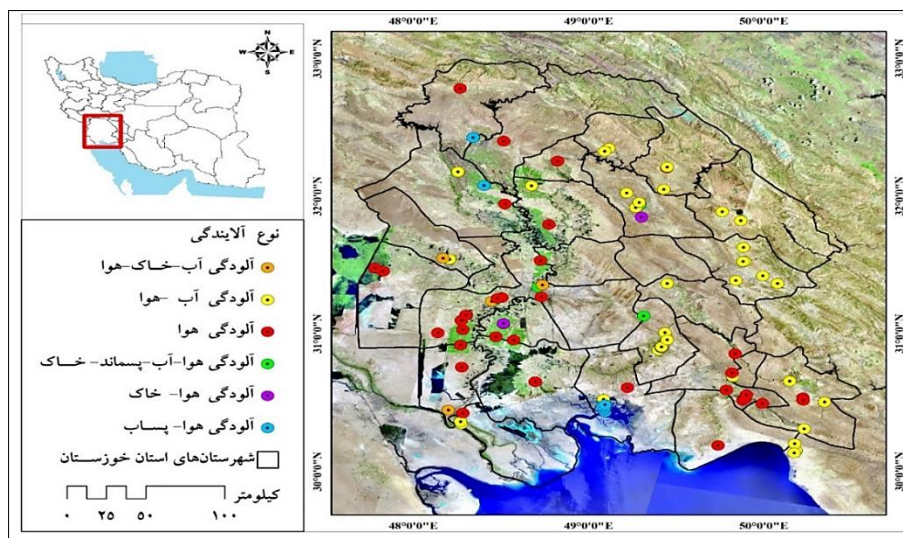
شماره	تاریخ تصویر	زمان برداشت	شماره مدار تصویر	حجم تصویر (مگابایت)
۱	۳ شهریور ۱۳۹۷	۰۹:۰۱:۵۹	۴۴۸۳	۳۱۰
۲	۳ مهر ۱۳۹۷	۰۹:۱۸:۱۱	۴۹۲۳	۳۲۵
۳	۳ آبان ۱۳۹۷	۰۸:۳۰:۳۸	۵۳۴۸	۳۲۰
۴	۳ آذر ۱۳۹۷	۰۸:۲۷:۲۷	۵۷۸۸	۳۰۵
۵	۳ دی ۱۳۹۷	۰۹:۰۴:۰۱	۶۲۱۴	۳۱۷
۶	۳ بهمن ۱۳۹۷	۰۹:۰۴:۴۰	۶۶۵۴	۳۲۰
۷	۵ اسفند ۱۳۹۷	۰۸:۲۲:۳۳	۷۰۷۹	۳۱۸
۸	۶ فروردین ۱۳۹۸	۰۹:۰۳:۵۳	۷۵۰۵	۳۳۶
۹	۶ اردیبهشت ۱۳۹۸	۰۸:۲۲:۴۴	۷۹۴۵	۳۳۷
۱۰	۴ خرداد ۱۳۹۸	۰۸:۴۴:۲۱	۸۳۵۶	۳۳۸
۱۱	۴ تیر ۱۳۹۸	۰۹:۰۴:۱۹	۷۹۹۶	۳۴۰
۱۲	۲ مرداد ۱۳۹۸	۰۹:۲۲:۲۸	۹۲۰۷	۳۳۹

TROPOMI، مقدار NO₂ در هر ماه با طول بازه زمانی یک ساله برای کل استان خوزستان تهیه گردید که نتایج آن در شکل ۴ آمده است. همان گونه که از نتایج مشخص است، در تمامی ماهها حدود سه شهر اصلی «اهواز، خرمشهر و ماهشهر» بیشترین مقدار آلودگی را داشت. بیشترین مقدار آلودگی هوا در ماههای سرد سال مشاهده گردید. با مراجعه با شکلها می توان پی برد که در استان خوزستان هنگام شروع گرما از مقدار این آلاینده کاسته می شود؛ به طوری که کاهش غلظت این آلاینده در هنگام شروع گرما در بعضی از شهرها با آلودگی بالا مانند ماهشهر و خرمشهر کاملاً محسوس است؛ چرا که این شهرها صنایع بیشتری در خود جای داده اند. همچنین، نتایج نشان داد که مقدار آلودگی در بخش های شمالی و دامنه های رشته کوه زاگرس به مراتب کمتر از سایر نواحی می باشد. همچنین، در شکل ۵ میانگین ماهانه تغییرات مکانی NO₂ ارائه شده که از میانگین ماههای سال های ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ به دست آمده است.

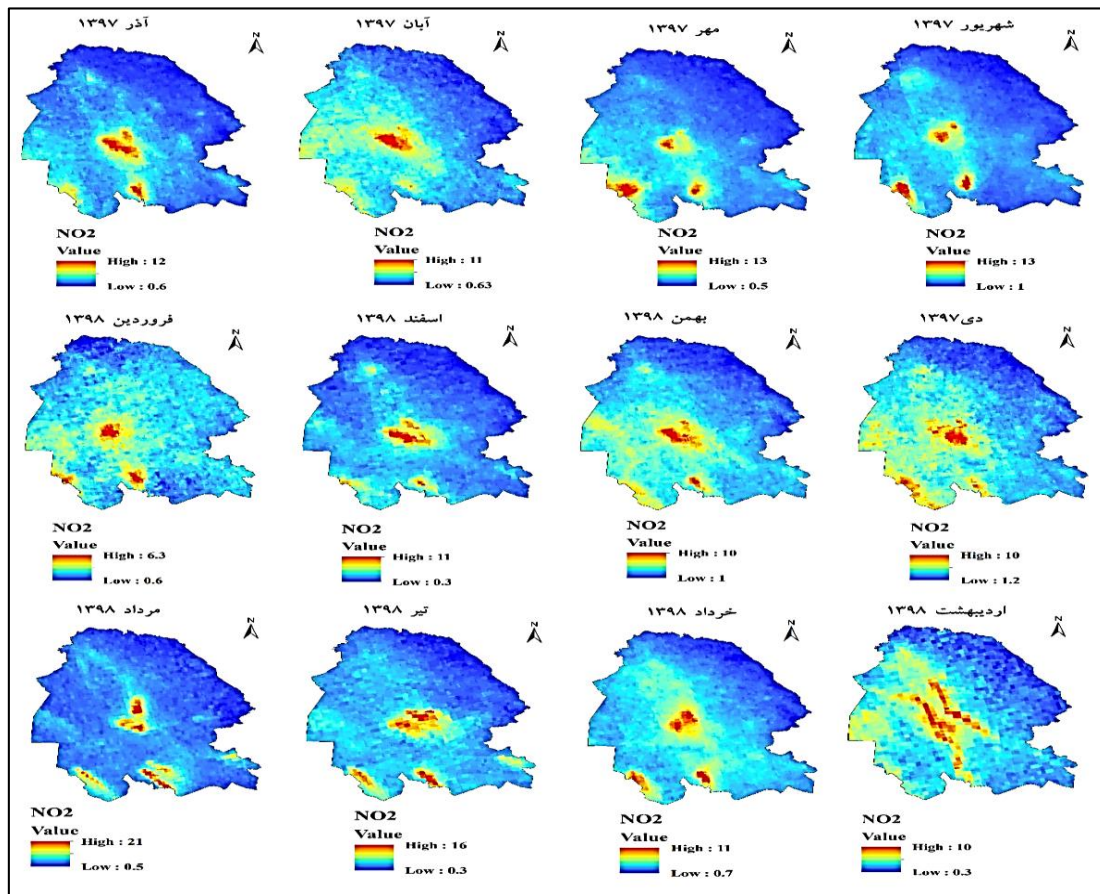
صنایع آلاینده هوا در استان خوزستان: برای ارزیابی صنایع در مطالعه حاضر، موقعیت مربوط به ۱۰۰ صنایع مهم آلاینده هوای استان با استفاده از تصاویر Google Earth و Open Street Map (OSM) استخراج شد و پس از آن به نرم افزار ArcMap انتقال یافت و سپس اطلاعات توصیفی به آن اضافه گردید. با توجه به نوع صنایع، تمامی صنایع آلاینده هوا در شش گروه قرار داده شد که موقعیت مکانی این صنایع در شکل ۳ ارائه شده است. سپس با استفاده از لایه میانگین NO₂ و موقعیت صنایع، مقدار متوسط آلودگی ماهانه این آلاینده برای هر کدام از صنایع استخراج شد و نتایج به دست آمده مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

یافته ها

در تحقیق حاضر، با استفاده از محصولات ماهواره سنتینل ۵ و سنجنده



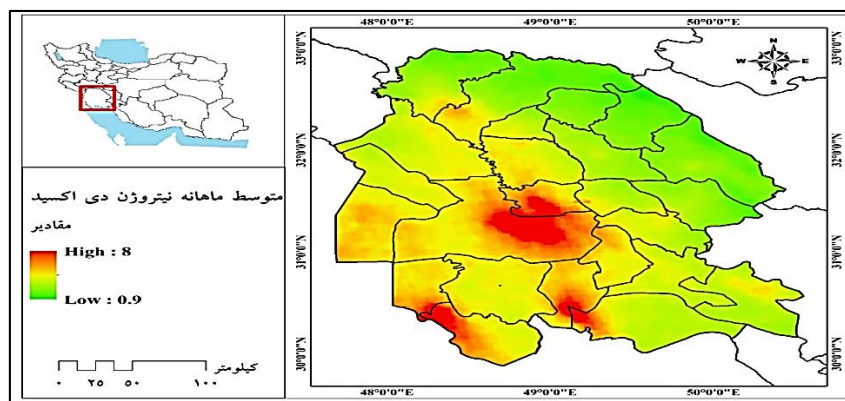
شکل ۳. موقعیت مکانی صنایع آلاینده استان خوزستان



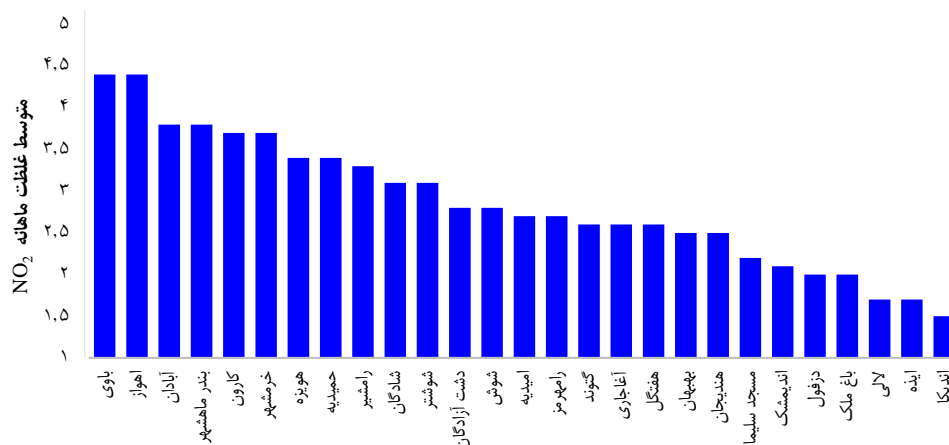
شکل ۴. تغییرات مکانی- زمانی مقدار NO₂ در استان خوزستان با استفاده از سنجنده TROPOMI در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ بر حسب مول بر مترمربع $\times 10^{-5}$

استان در شکل ۷ نشان داده شده است. بیشترین میزان غلظت این آلاینده در ماه‌های دی و بهمن فصل زمستان بوده است. پس از این مرحله، به دلیل این که سطح اتمسفر دوباره شروع به گرم شدن می‌کند، غلظت این آلاینده کاهش می‌یابد.

در شکل ۶ نمودار تغییرات غلظت گاز NO₂ برای هر شهرستان ارایه شده است. بر این اساس، آلوده‌ترین شهرهای استان به ترتیب باوی، اهواز، آبادان و ماهشهر و پاک‌ترین شهرهای استان نیز ایزه، لالی و باغ‌ملک بود. نتایج حاصل از تغییرات زمانی در مقیاس ماهانه برای این گاز در سطح کل



شکل ۵. متوسط تغییرات مکانی ماهانه NO₂ در سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ بر حسب مول بر مترمربع $\times 10^{-5}$



شکل ۶. متوسط غلظت آلاینده شهرستان‌های استان خوزستان بر حسب مول بر مترمربع × ۱۰^{-۵}

استان خوزستان طی سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشینه فصلی در پاییز و زمستان رخ می‌دهد؛ چرا که در این ماه‌ها دمای هوا به مراتب پایین‌تر از سایر ماه‌ها می‌باشد که این نتایج با یافته‌های پژوهش شاه‌محمدی و همکاران (۳۰) همخوانی داشت. یکی دیگر از عوامل بیشینه غلظت ستون NO₂ تروپوسفری در زمستان، بیشتر بودن طول عمر NO₂ در غیاب نور خورشید می‌باشد (۱۷، ۹). دلیل این امر آن است که برخورد پرتوهای خورشید با این گاز، سبب تجزیه این گاز می‌شود و در نتیجه، غلظت آن کاهش می‌یابد. از آنجا که خرمشهر، آبادان، ماهشهر و اهواز جزء شهرهای صنعتی محسوب می‌شوند، اما به نظر می‌رسد که ترافیک وسایل نقلیه‌ای هم بر افزایش NO₂ تأثیر بسزایی دارد.

به طور کلی می‌توان گفت با توجه به این که در سنجنده TROPOMI نسبت سیگنال به نویز بالا می‌باشد و قدرت تفکیک مکانی آن حدود دو برابر ماهواره OMI بهبود پیدا کرده است، آلودگی هوا با استفاده از این سنجنده حتی در شهرها به خوبی قابل بررسی می‌باشد که بعضی از مطالعات به این نکته اشاره کرده‌اند (۲۶).

به منظور ارتباط مکانی بین غلظت صنایع و غلظت این آلاینده، ابتدا با استفاده از لایه‌های ماهانه، یک لایه متوسط مقدار NO₂ برای کل استان تهیه گردید و سپس متوسط غلظت ستون تروپوسفری این گاز در صنایعی که موقعیت آن‌ها ارایه شده است، به دست آمد و نتیجه آن در جدول ۳ برای ۲۰ صنعتی که بیشترین میزان غلظت را داشته‌اند، آورده شد. با توجه به نتایج به دست آمده، اولین صنعتی که بیشترین غلظت گاز NO₂ در ستون تروپوسفری آن مشاهده گردید، صنعت پتروشیمی فارابی بود و در اولویت‌های دیگر می‌توان صنایع فولاد خوزستان و پتروشیمی غدیر و رازی را نام برد. بر اساس داده‌های جدول ۳، بیشتر صنایعی که میزان آلودگی نیتروژن در لایه تروپوسفر آن زیاد بود، به صنایع پتروشیمی اختصاص داشت.

بحث

مقادیر غلظت ستون NO₂ تروپوسفری در شهرهای پرتراffیک مرکزی، با توجه به ازدحام جمعیت و تردد وسایل نقلیه و فعالیت‌های صنایع متفاوت است. به عنوان نمونه، شکل ۴ تغییرات ماهانه ستون تروپوسفری را برای شهرهای



شکل ۷. تغییرات ماهانه غلظت NO₂ در سطح استان بر حسب مول بر مترمربع × ۱۰^{-۵}

جدول ۳. اسامی ۲۰ صنعت با بیشترین مقدار متوسط NO₂ استخراج شده با سنجنده TROPospheric Monitoring Instrument(TROPOMI) بر حسب مول بر متر مربع × ۱۰^{-۵}

شماره	نام واحد	غلظت NO ₂	شماره	نام واحد	غلظت NO ₂
۱	پتروشیمی فارابی	۷/۷	۱۱	شرکت پالایش نفت آبادان	۶/۲
۲	شرکت صنایع فولاد خوزستان	۷/۴	۱۲	آسفالت عمار راهسازان	۵/۹
۳	پتروشیمی غدیر	۷/۴	۱۳	پتروشیمی بندر امام	۵/۲
۴	پتروشیمی رازی	۷/۲	۱۴	انبارهای ذخیره‌سازی شرکت اقتصاد	۴/۸
۵	شرکت بهره‌برداری نفت و گاز کارون	۶/۹	۱۵	شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مارون	۴/۱
۶	پتروشیمی تندگویان	۶/۹	۱۶	شرکت کشت و صنعت دهخدا	۳/۹
۷	پتروشیمی مارون	۶/۸	۱۷	کارخانه آسفالت شرکت آریا سیویل	۳/۸
۸	شرکت پتروشیمی آبادان	۶/۵	۱۸	کارخانه آسفالت شهرداری اندیمشک	۳/۷
۹	پتروشیمی اروند	۶/۵	۱۹	واحد بهره‌برداری آزادگان شمالی	۳/۶
۱۰	کارخانه قیر خوزستان	۶/۵	۲۰	واحد بهره‌برداری یادآوران	۳/۶

خصوص در شهرهای بزرگ استان، محدودیت شبکه معابر جاده‌ای و استقرار تعداد قابل توجهی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین صنایع کشور بدون در نظر داشتن روش‌ها و برنامه‌های کنترل در راستای توسعه پایدار در آینده نه چندان دور، سبب افزایش حجم عظیم آلاینده‌ها در محیط‌های شهری این استان می‌گردد. بنابراین، به منظور جلوگیری از تخریب محیط زیست در دوره‌های آینده، تهیه طرح‌های کنترل و پیشگیری از انتشار و گسترش آلودگی هوا در شهرهای آلوده استان، امری اجتناب‌ناپذیر و ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف پایش مکانی- زمانی آلودگی ناشی از NO₂ برای استان خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۵ (TROPOMI) طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ انجام گرفت. با توجه به نتایج حاصل شده، می‌توان اینگونه استنباط نمود که مناطق با غلظت بالای NO₂ در استان خوزستان، مربوط به شهرهایی با تراکم جمعیت زیاد، ترافیک بالای وسایل نقلیه موتوری و فعالیت‌های صنعتی است. بنابراین ارایه راهکارهای مدیریتی در زمینه ترافیک شهری به ویژه در منطقه مرکزی شهرها، استفاده از نیروگاه‌های تجدیدپذیر به منظور تولید انرژی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی به خصوص در شهرهای اهواز، آبادان، خرمشهر و ماهشهر، تولید خودروهای مناسب‌تر و پاک‌تر و همچنین، توزیع بنزین با استاندارد بالاتر ضروری به نظر می‌رسد، اما چنین مواردی نیازمند سیاست‌ها و تصمیم‌گیری‌های ملی و منابع مالی زیاد می‌باشد. آلاینده‌هایی مانند NO₂، سهم ناچیزی در آلودگی هوای شهرها دارند. با این حال، اندازه‌گیری و ارزیابی مداوم آن‌ها و ارایه راهکارهای پیشگیرانه همچنان باید ادامه داشته باشد تا رفاه و سلامت ساکنان این مناطق تأمین گردد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسندگان از آژانس فضایی اروپا (European Space Agency یا ESA) و سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکایی (National Aeronautics and Space Administration یا NASA) به جهت در اختیار گذاشتن داده‌های ارزشمند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

لازم به ذکر است که با استفاده از سنجنده TROPOMI، آلودگی NO₂ در شهرهای ماهشهر، آبادان و اهواز به وضوح قابل تشخیص می‌باشد. شرعی‌پور و علی‌اکبری بیدختی در تحقیق خود که به منظور بررسی آلاینده NO₂ با استفاده از ماهواره OMI در سطح کشور انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که اهواز هفتمین شهر آلوده به آلاینده NO₂ در کشور می‌باشد (۹). از طرف دیگر، شهر آبادان و بندر ماهشهر کانون تمرکز صنایع پتروشیمی و مرکز ارتباطات تجاری منطقه و در حال تبدیل شدن به یک کلان شهر می‌باشند. با این حال، همه معایب یک شهر صنعتی را دارند. نتایج پژوهش دیگری در داخل کشور گزارش کرد که شهر اهواز بیشترین آلودگی را بین سایر شهرهای کشور از لحاظ ذرات معلق در جو دارد (۳۱). اداره کل حفاظت محیط زیست استان خوزستان نیز علاوه بر شهر اهواز و آبادان، شهر ماهشهر را نیز در شمار شهرهای آلوده کشور قرار داد (۳۲).

نتایج بررسی حاضر نشان داد، در نواحی که صنایع پتروشیمی وجود دارد، بیشترین میزان آلاینده NO₂ مشاهده می‌شود. از میان این صنایع، اولین صنعتی که بیشترین غلظت این گاز در آن مشاهده شد، صنعت پتروشیمی فارابی با مقدار متوسط ماهانه $7/7 \times 10^{-5}$ مول بر مترمربع بود و در اولویت‌های بعدی صنایع فولاد خوزستان و پتروشیمی غدیر و رازی قرار داشتند که این امر می‌تواند به چند دلیل باشد. ابتدا باید گفت که این صنایع، جزء بزرگ‌ترین صنایع استان خوزستان به شمار می‌روند که در مجاورت هم قرار گرفته‌اند و در تمام فصول سال در حال فعالیت هستند و این امر سبب افزایش میانگین غلظت این آلاینده شده است. همچنین، از آنجایی که این صنایع از سوخت‌هایی همچون نفت و گاز استفاده می‌کنند، سهم زیادی در تولید این آلاینده و آلودگی هوا دارند؛ در حالی که صنایعی مانند صنعت سیمان و یا شن و ماسه سهم بسیار ناچیزی در تولید این آلاینده دارند؛ چراکه این صنایع به میزان کمتری از منابع اصلی تولیدکننده این آلاینده استفاده می‌نمایند. لازم به ذکر است که برای تأیید صحت نتایج به دست آمده، لازم است که بازدید میدانی نیز انجام گیرد. در نهایت، می‌توان گفت این آلاینده علاوه بر مشکلاتی که بر سلامت شهروندان دارد، در غلظت‌های بالا منجر به ایجاد مه‌دود می‌شود و میدان دید را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین، در صورت ترکیب با هوای مرطوب، باعث تولید اسید نیتریک و پوسیدگی فلزات می‌شود. به صورت کلی، می‌توان گفت که گسترش غیر قابل کنترل شهرهای استان، افزایش چشمگیر تعداد وسایل نقلیه به

References

1. Piraino F, Aina R, Palin L, Prato N, Sgorbati S, Santagostino A, et al. Air quality biomonitoring: Assessment of air pollution genotoxicity in the Province of Novara (North Italy) by using *Trifolium repens* L. and molecular markers. *Sci Total Environ* 2006; 372(1): 350-9.
2. Yavari H, Saligheh M. Air pollution inversion levels in Tehran city. *Journal of Geographical Sciences* 2011; 17(20): 89-105. [In Persian].
3. Fallahizadeh S, Zarei MR, Karami N, Foruzan H, Alamdari M, Parseh I. Quantification of health effects of ambient PM10 in Gachsaran City, Iran, in Year 2015, using the AirQ software. *J Health Syst Res* 2018; 14(1): 73-8. [In Persian].
4. Geravandi S, Zalaghi E, Mohammadi MJ, Babaei AA, Yari AR, et al. Exposure to particulate matter of less than 10 microns and its effect on respiratory and cardiovascular diseases in Isfahan, Iran in 2013. *J Health Syst Res* 2015; 11(4): 725-30. [In Persian].
5. Dominici F, Peng RD, Bell ML, Pham L, McDermott A, Zeger SL, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA* 2006; 295(10): 1127-34.
6. World Health Organization. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide: Report on a WHO working group, Bonn, Germany 13-15 January 2003 [Online]. [cited 2003]; Available from: URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107478>
7. Najafpoor A, Joneidi Jafari A, Dousti S. Trend analysis of Air Quality Index criteria pollutants (CO, NO₂, SO₂, PM10 and O₃) concentration changes in Tehran metropolis and its relationship with meteorological data, 2001-2009. *Journal of Health in the Field* 2015; 3(2): 17-26. [In Persian].
8. Tiwary A, Williams I. Air Pollution: Measurement, modelling and mitigation. Boca Raton, FL: CRC Press; 2018.
9. Shariepour Z, Aliakbari Bidokhti A. An investigation on the status of troposphere No₂ over Iran during 2004 to 2012. *Journal of Environmental Studies* 2014; 40(1): 16-8. [In Persian].
10. Verma SS, Desai B. Effect of meteorological conditions on air pollution of Surat city. *Int J Appl Environ Sci* 2008; 3(5): 358-67.
11. Anttila P, Tuovinen JP. Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007. *Atmos Environ* 2010; 44(1): 30-41.
12. Miri P, Rashki AR, Sepehr A. Investigation of temporal and spatial changes of dust indicators in East Khorasan based on satellite data. *Geography and Environmental Hazards* 2017; 6(3): 1-20. [In Persian].
13. Deeter MN, Emmons LK, Francis GL, Edwards DP, Gille JC, Warner JX, et al. Operational carbon monoxide retrieval algorithm and selected results for the MOPITT instrument. *J Geophys Res Atmos* 2003; 108(D14).
14. Gloudemans AM, Schrijver H, Hasekamp O, Aben I. Error analysis for CO and CH₄ total column retrievals from SCIAMACHY 2.3 μm spectra. *Atmos Chem Phys* 2008; 8(2).
15. Borsdorff T, Brugh JA, Pandey S, Hasekamp O, Aben I, Houweling S, et al. Carbon monoxide air pollution on sub-city scales and along arterial roads detected by the Tropospheric Monitoring Instrument. *Atmos Chem Phys* 2019; 19: 3579-88.
16. Rangzan K, Zarasvandi A, Abdolkhani A, Mojaradi B. Modeling of Air Pollution using MODIS Data: Khuzestan Dust storm. *J Adv Appl Geol* 2014; 4(4): 38-45.
17. van der AR, Peters DH, Eskes H, Boersma KF, Van Roozendael M, De Smedt I, et al. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China. *J Geophys Res* 2006; 111(D12317).
18. Liu F, van der RJ, Eskes H, Ding J, Mijling B. Evaluation of modeling NO₂ concentrations driven by satellite-derived and bottom-up emission inventories using in situ measurements over China. *Atmos Chem Phys* 2018; 18: 4171-86.
19. Lamsal LN, Duncan BN, Yoshida Y, Krotkov NA, Pickering KE, Streets DG, et al. U.S. NO₂ trends (2005-2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). *Atmos Environ* 2015; 110: 130-43.
20. Ghude Sachin D., Van dA, Beig G, Fadnavis S, Polade SD. Satellite derived trends in NO₂ over the major global hotspot regions during the past decade and their inter-comparison. *Enviro Poll* 2009; 157(6): 1873-8.
21. Zarasvandi A, Moore F, Nazarpour A. Mineralogy and morphology of dust storms particles in Khuzestan province: XRD and SEM analysis concerning. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 2011; 19(3): 511-8.
22. Daniali M, Karimi N. Spatiotemporal analysis of dust patterns over Mesopotamia and their impact on Khuzestan province, Iran. *Nat Hazards* 2019; 97: 259-81.

23. Arami SA, Ownegh M, Mohammadian Behbahani A, Akbari M, Zarasvandi A. The analysis of dust hazard studies in southwest region of Iran in 22 years (1996-2017). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 2018; 5(1): 39-66.
24. Veefkind JP, Aben I, McMullan K, Forster H, de Vries J, Otter G, et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sens Environ* 2012; 120: 70-83.
25. Tack F, Merlaud A, Meier AC, Vlemmix T, Ruhtz T, Iordache MD, et al. Intercomparison of four airborne imaging DOAS systems for tropospheric NO₂ mapping-the AROMAPEX campaign. *Atmos Meas Tech* 2019; 12: 211-36.
26. Borsdorff T, de Brugh JA, Hu H, Hasekamp O, Sussmann R, Rettinger M. Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage. *Atmos Meas Tech* 2018; 11: 5507-18.
27. Verhoelst T, Compennolle S, Pinardi G, Lambert JC, Eskes HJ, Eichmann KU. Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmos Meas Tech* 2021; 14: 481-510.
28. Wang C, Wang T, Wang P, Rakitin V. Comparison and Validation of TROPOMI and OMI NO₂ Observations over China. *Atmosphere* 2020, 11, 636 2020; 11: 636.
29. van Geffen JH, Eskes HJ, Boersma KF, Veefkind JP. TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO₂ data products [Online]. [cite 2021]; Available from: URL: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-NO2-data-products>
30. Shahmohammadi A, Bayat A, Mashhadizadeh Maleki S. Investigation of behavior and trend of nitrogen dioxide in Tehran using OMI satellite sensor measurements. *Iranian Journal of Astronomy and Astrophysics* 2017; 4(2): 69-78.
31. Kermani M, Gholami M, Aghaei M, Bahrami Asl F, Shamsavani A, Karimzadeh S, et al. Quantification of mortality and hospital admission due to cardiovascular and respiratory disease attributed to pm₁₀ in 7 metropolitans of Iran during 2011-2012. *J Health Syst Res* 2016; 12(2): 132-9. [In Persian].
32. Maroufnejad A, Reis Ghanavati K. The effect of urban management on reducing industrial pollutants in the city of Mahshahr. *Journal of Urban Economics and Management* 2014; 2(6): 19-35. [In Persian].