

بررسی رفتار و روند دی‌اکسید نیتروژن هوای تهران با استفاده از اندازه‌گیری‌های سنجنده OMI

عاطفه شاه‌محمدی^۱ · علی بیات^۱ · سعید مشهدی‌زاده ملکی^۲
^۱ ایران، زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده فیزیک؛ ۴۵۳۷۱ - ۳۸۷۹۱؛
ایمیل: abayat@znu.ac.ir
^۲ ایران، اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده عمران؛

چکیده. آلودگی هوا از مهم‌ترین مشکلات شهرهای بزرگ جهان در قرن اخیر می‌باشد زیرا سلامت انسان و محیط زیست را به خطر انداخته است. یکی از شاخص‌های آلودگی هوا دی‌اکسید نیتروژن است که به طور مستمر با ابزارهای سنسجش آلودگی از فضا و زمین اندازه‌گیری می‌شود. در این مقاله داده‌های دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده با سنجنده OMI و باد، دمای سطحی و دید افقی ثبت شده در ایستگاه هواشناسی مهرآباد شهر تهران در بازه اندازه‌گیری اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای بررسی رفتار و روند آلودگی هوا استفاده شده است. مقدار میانگین دی‌اکسید نیتروژن در بازه اندازه‌گیری در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب برابر $۱۰^{۱۵} \times ۶/۹۹$ ، $۱۰^{۱۵} \times ۶/۲۲$ ، $۱۰^{۱۵} \times ۱۶/۹۰$ و $۱۰^{۱۵} \times ۱۹/۶۵$ بدست آمد که بیشترین (کمترین) مقدار آن در زمستان (تابستان) اتفاق می‌افتد. همچنین، بیشترین (کمترین) مقدار انحراف معیار در فصل زمستان (تابستان) رخ می‌دهد که برابر $۱۰^{۱۵} \times ۱۴/۸۴$ (بیشترین) است. ضریب همبستگی دی‌اکسید نیتروژن با باد و دما به ترتیب برابر $-۰/۰۴$ و $-۰/۵۹$ است که تاثیر بیشتر دما در تغییرات دی‌اکسید نیتروژن در طول سال را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی دی‌اکسید نیتروژن با دید افقی برابر $-۰/۲۰$ است که نشان‌دهنده کاهش دید افقی با افزایش آلودگی شهری در تهران است. روند دی‌اکسید نیتروژن با استفاده از برازش خطی پس از حذف دوره‌های تناوب سالیانه، شش و چهار ماهه با اعتبار ۹۵ درصد محاسبه شده است. مقدار روند دی‌اکسید نیتروژن در هر سال $۱۰^{۱۴} \times ۵/۷۶$ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، دی‌اکسید نیتروژن، روند، سنجنده OMI، باد، دمای سطحی، دید افقی، شهر تهران

Investigation of Behavior and Trend of Nitrogen Dioxide in Tehran Using OMI Satellite Sensor Measurements

Atefeh Shahmohammadi¹ · Ali Bayat¹ · Saeed Mashhadizadeh Maleki²

¹ Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan;
email: abayat@znu.ac.ir

² Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran;

Abstract. Air pollution is one of the most important problems in the world's major cities in the last century because it endangers human health and the environment. One of the indicators of air pollution is nitrogen dioxide, which is continuously measured by satellite from space and via ground-based instruments. In this paper, the data for nitrogen dioxide was measured by OMI over Tehran. Wind, surface temperature and horizontal visibility were recorded at Mehrabad Meteorological Station during the period from October 2004 to May 2016 to evaluate the behavior and trends of air pollution. The average amount of nitrogen dioxide during the spring, summer, autumn and winter seasons were 6.99×10^{15} , 6.22×10^{15} , 16.90×10^{15} , and 19.65×10^{15}

$\frac{molec}{cm^2}$ with the highest (lowest) value occurring in the winter (summer). Also, the highest (lowest) standard deviation occurred in the winter (summer), which was 14.84×10^{15} (3.73×10^{15}). The correlation coefficient of nitrogen dioxide with wind and temperature were -0.04 and -0.59, respectively, which show a greater effect of temperature on nitrogen dioxide changes. Also, the correlation coefficient of nitrogen dioxide with horizontal visibility was -0.20, which indicates a reduction of horizontal visibility with increasing urban pollution in Tehran. The nitrogen dioxide trend was calculated using linear regression after eliminating four, six, and twelve-month periods with 95% confidence. The trend of nitrogen dioxide was $5.76 \times 10^{14} \frac{molec}{cm^2}$ per year.

Keywords: Air Pollution, Nitrogen Dioxide, Trend, OMI sensor, Wind Surface Temperature, Horizontal Visibility, Tehran

۱ مقدمه

یکی از بزرگترین نگرانی‌ها و مشکلات زیست محیطی در دهه‌های اخیر آلودگی هوا است [۱]. به وجود هر نوع آلاینده در مقدار و مدت زمانی که ممکن است برای زندگی انسان و محیط زیست مضر باشد و کیفیت زندگی را به خطر اندازد آلودگی هوا می‌گویند [۲]. شهرهای بزرگ با رشد بی‌رویه جمعیت، فعالیت‌های صنعتی، تراکم وسایل نقلیه و نیز عوامل جغرافیایی مانند تغییرات آب و هوایی و تغییر الگوی جوی، وارونگی دمایی و توپوگرافی، روز به روز بیشتر در معرض آلودگی هوا قرار می‌گیرند [۳]. آلودگی هوا باعث بیماری‌های قلبی-عروقی، برونشیت، اختلالات تنفسی، سرطان و مرگ زودرس می‌شود [۴]. طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت^۱ سالانه در سراسر جهان حدود هفت میلیون نفر در اثر بیماری‌های مربوط به آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند [۵].

از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا می‌توان به اکسیدهای گوگرد، ازن، اکسیدهای نیتروژن ($NO_x = NO + NO_2$)، مونوکسید کربن و ذرات ریز گرد و غبار اشاره کرد [۶]. دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، یکی از شاخص‌های آلودگی هوا به شمار می‌رود [۷] 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 [۶]. سیستم‌های گرمایشی، وسایل نقلیه موتوری، نیروگاه‌ها، برق ناشی از تخلیه الکتریکی رعد و برق ابرها، گسیل ناشی از خاک و آتش سوزی جنگل‌ها از مهم‌ترین چشمه‌های دی‌اکسید نیتروژن به شمار می‌روند [۸]. شناخت پارامترهای موثر در آلودگی هوا و میزان تاثیر آن‌ها امری ضروری در جهت کنترل میزان آلودگی هوا می‌باشند [۹]. دما، باد و دید افقی پارامترهای جوی و هواشناسی موثر در بررسی آلودگی هوا هستند [۱۰]. در شرایط جوی ساکن غلظت دی‌اکسید نیتروژن در جو افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند که در برخی موارد ایجاد مه-دود کرده و میدان دید را کاهش می‌دهد و موجب گرم شدن زمین می‌شود [۱۱]. دمای هوای محیط با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد، گاهی با افزایش ارتفاع دمای هوا نیز افزایش می‌یابد که به این وضعیت وارونگی دمایی گفته می‌شود [۱۲]. جهت و سرعت باد، وجود رشته کوه‌ها و جهت آن‌ها نسبت به باد غالب از عوامل موثر در وارونگی دمایی هستند. وارونگی دمایی در کلان شهرهایی مانند تهران، اصفهان و تبریز اهمیت بسیاری دارد زیرا در این حالت هوا ساکن است و آلاینده‌های هوا نمی‌توانند پراکنده شوند [۱۳]. هر ساله شهر تهران با شروع سرما با این پدیده روبرو است [۱۴]. محسنی نشان داد که رابطه مستقیمی بین تعداد روزهای وارونگی و میزان آلودگی هوای شهر تهران وجود دارد. همچنین در فصل‌های پاییز و زمستان وارونگی بیشتر اتفاق می‌افتد [۱۵]. صفوی و همکارانش نشان دادند که ویژگی‌های طبیعی شهر تهران در آلودگی آن موثر است و وارونگی دمایی از ویژگی‌های دوره سرد سال است که باعث ایجاد هوای پایدار می‌شود [۱۶]. در این مقاله از داده‌های دما، باد (جهت و اندازه) و دید افقی ایستگاه هواشناسی مهرآباد برای بررسی رفتار آلودگی هوا استفاده شده است.

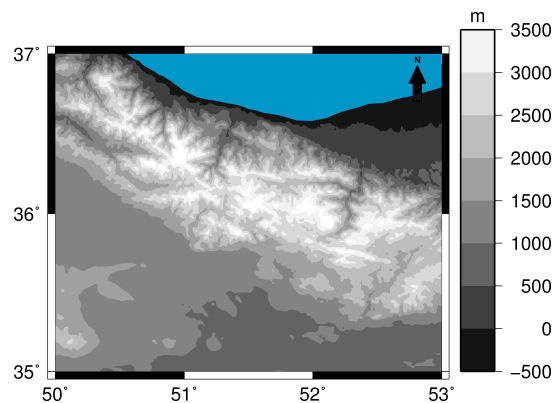
واندر و همکارانش با استفاده از داده‌های ماهواره SCIAMACHY^۲ و GOME^۳ به بررسی روند دی‌اکسید نیتروژن در چین پرداختند و نشان دادند که گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسید نیتروژن در چین در حال افزایش است [۱۷]. لامسال و همکارانش روند دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI^۴ و داده‌های سازمان کیفیت هوا در ایالات متحده را برای بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار دادند. نتایج هر دو اندازه‌گیری ماهواره‌ای و زمینی، روند رو به کاهش دی‌اکسید نیتروژن را بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ نشان داد [۱۸]. قوده و همکارانش نیز با استفاده از داده‌های سنجنده SCIAMACHY و GOME نشان دادند که مقدار دی‌اکسید نیتروژن در کشورهای در حال توسعه در حال افزایش است و عامل مهم در روند افزایش دی‌اکسید نیتروژن در کشورهای خاورمیانه مصرف سوخت فسیلی بوده است [۱۹]. در

^۱ World Health Organization

^۲ Scanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY

^۳ Global Ozone Monitoring Experiment

^۴ Ozone Monitoring Instrument



شکل ۱: توپوگرافی شهر تهران. نوار رنگ ارتفاع بر حسب متر از سطح آب‌های آزاد را نشان می‌دهد.

مقالات ذکر شده در بالا، روند دی‌اکسید نیتروژن به وسیله برازش یک مدل خطی با در نظر گرفتن اجزا فصلی مورد بررسی قرار گرفته است. شرعی‌پور و علی‌اکبری بیدختی همبستگی داده‌های دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI و ایستگاه‌های سنجش آلودگی مستقر در شهر تهران را بررسی کرده‌اند. همچنین آن‌ها با استفاده از رگرسیون خطی بر روی میانگین سالانه دی‌اکسید نیتروژن طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ روند افزایشی آلاینده دی‌اکسید نیتروژن را برای شهر تهران گزارش کرده‌اند [۸].

در مقاله حاضر، روند دی‌اکسید نیتروژن با استفاده از برازش خطی پس از حذف دوره‌های تناوب سالیانه، شش و چهار ماهه بر روی سری زمانی میانگین ماهانه دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI در بازه ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ برای شهر تهران بررسی شده است. همچنین رفتار فصلی دی‌اکسید نیتروژن و همبستگی آن با دما، باد و دید افقی برای درک بهتر تغییرات آلودگی هوا مطالعه شده است. برای دستیابی به اهداف فوق، در بخش ۲ منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. داده‌های سنجنده OMI و داده‌های هواشناسی در بخش ۳ توضیح داده شده‌اند. نتایج میانگین فصلی و آمار دی‌اکسید نیتروژن، دما، باد و دید افقی و نیز همبستگی بین دی‌اکسید نیتروژن و پارامترهای هواشناسی، در بخش ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۵، با استفاده از برازش خطی پس از حذف دوره‌های تناوب سالیانه، شش و چهار ماهه به سری زمانی میانگین ماهانه دی‌اکسید نیتروژن، روند آلودگی هوای تهران محاسبه شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ بیان شده است.

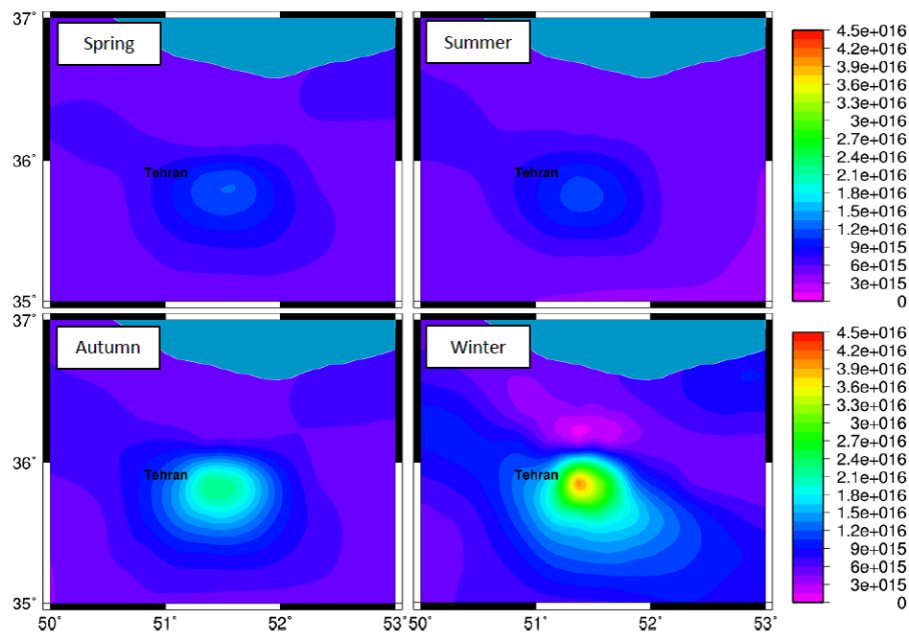
۲ منطقه مورد مطالعه

شهر تهران با جمعیتی حدود هشت میلیون و ششصد و نود و سه هزار و هفتصد و شش [۲۰] در محدوده ۵۱ الی ۵۱/۷ درجه طول جغرافیایی و ۳۵/۵ الی ۳۶ درجه عرض جغرافیایی با مساحتی حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز قرار گرفته است. در شکل ۱ توپوگرافی شهر تهران آورده شده است. نواحی غربی و جنوبی تهران ارتفاع چندانی ندارند و رشته کوه‌های البرز در شمال و شمال شرقی، کوه‌های بی‌بی شهر بانو و ارتفاعات البرز شمالی دیواره شهر را تشکیل می‌دهند و مانع از خروج آلاینده‌های هوا توسط بادهای غربی می‌شوند و این سبب افزایش آلودگی هوا به خصوص در نواحی مرکزی و شرقی می‌شود. ارتفاع تهران از سطح دریا در حدود ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متر است. این اختلاف سطح به علت گستردگی و وسعت زیاد شهر است. توپوگرافی شهر تهران نقش مهمی در افزایش آلودگی هوا و وارونگی دمایی دارد [۲۱].

۳ داده‌ها

ماهواره Aura در یک مدار خورشید آهنگ^۵ قرار دارد و لحظه گذر آن ساعت ۱۳:۴۵ به وقت محلی می‌باشد. در جولای ۲۰۰۴ سنجنده OMI بر روی ماهواره Aura ناسا به منظور داده‌برداری از چند گاز مهم از جمله دی‌اکسید نیتروژن، ازن،

^۵Sun Synchronous Orbit



شکل ۲: میانگین دی‌اکسید نیتروژن به ترتیب برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان از اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر تهران. نوار رنگ برای تمامی شکل‌ها یکسان می‌باشد.

دی‌اکسید کربن، فرمالدئید قرار گرفته است. سیستم تصویر برداری طیفی سنجنده OMI، پراکنش نور خورشید از جو و سطح زمین را در دو محدوده طیفی ۳۸۰ – ۲۷۰ نانومتر و ۵۰۰ – ۳۵۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌کند. تصاویر OMI، به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی 13×24 کیلومتر مربع در سمت‌القدم^۶ گرفته می‌شوند [۲۲]. در این مقاله از داده‌های روزانه دی‌اکسید نیتروژن سنجنده OMI در بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای بررسی آلودگی هوا استفاده شده است. این داده‌ها از سایت <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.htm> بدست آمده است. به منظور بررسی ارتباط آلودگی هوا با پارامترهای هواشناسی، از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه مهرآباد در بازه ذکر شده استفاده شده است. طبق پروتکل سازمان جهانی هواشناسی هر ۳ ساعت یکبار براساس زمان جهانی دما، باد، فشار، رطوبت، دید افقی و تابش خورشیدی توسط ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند [۲۳]. از آنجایی که گذر سنجنده OMI ساعت ۱۳:۴۵ به وقت محلی می‌باشد به همین دلیل از نزدیک‌ترین داده‌های باد، دمای سطحی و دید افقی برای بازه ذکر شده استفاده شده است.

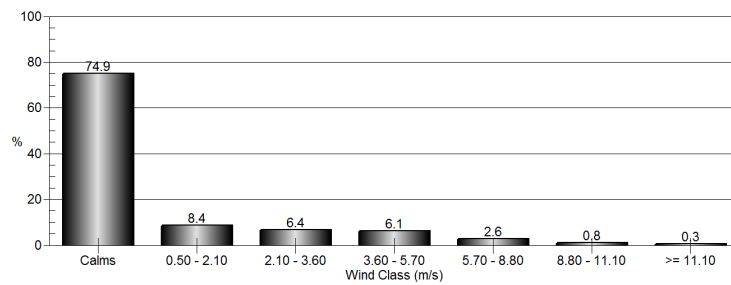
۴ نتایج

۱.۴ بررسی دی‌اکسید نیتروژن، باد، دمای سطحی و دید افقی و همبستگی بین آن‌ها

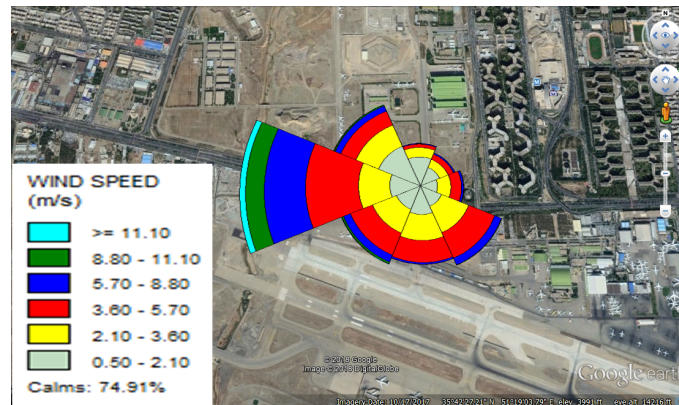
به منظور بررسی آلودگی هوای شهر تهران شاخص دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI بین بازه اندازه‌گیری اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای پیکسل بالاسر شهر تهران استخراج شده است. میانگین دی‌اکسید نیتروژن در بازه اندازه‌گیری برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان برای منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ آورده شده است. بیشترین مقدار دی‌اکسید نیتروژن در دو فصل پاییز و زمستان و کمترین مقدار آن در فصل‌های بهار و تابستان اتفاق می‌افتد.

برای بررسی دقیق‌تر تغییرات دی‌اکسید نیتروژن، پارامترهای هواشناسی باد، دما و دید افقی در بازه اندازه‌گیری اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ ایستگاه مهرآباد مطالعه شده است. لحظه گذر سنجنده OMI ساعت ۱۳:۴۵ به وقت محلی است

^۶Nadir



شکل ۳: توزیع فراوانی سرعت باد شهر تهران در بازه ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ با استفاده از داده‌های ایستگاه مهرآباد.



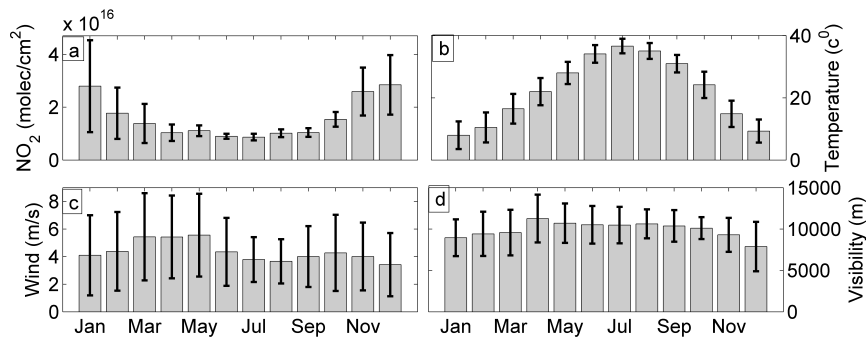
شکل ۴: جهت وزش باد برای ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران در بازه اندازه‌گیری بین ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶. باد غالب از طرف غرب به شرق است.

به همین دلیل از نزدیک‌ترین داده‌های ایستگاه هواشناسی استفاده شده است. در شکل‌های ۳ و ۴، نمودار توزیع فراوانی و جهت باد با نرم‌افزار WRPLOT^۷ در بازه اندازه‌گیری ترسیم شده است. در شکل ۳ محور افقی کلاس‌های باد برحسب متر برثانیه و محور عمودی درصد را نشان می‌دهند. تقریباً ۷۵ درصد بادهای شهر تهران آرام (کمتر از ۰/۵ متر برثانیه) هستند. در شکل ۴، جهت وزش باد نشان داده شده است که شامل ۸ قسمت است که هر قسمت یک جهت و هر رنگ بازه‌ای از مقدار سرعت باد را نشان می‌دهد. باد غالب در شهر تهران از سمت غرب به مرکز آن است. بنابراین با توجه به جهت باد غالب، توپوگرافی شهر و فراوانی سرعت‌های کم باد در تهران انتظار داریم که در اغلب اوقات هوای آلوده در جو شهر باقی بماند.

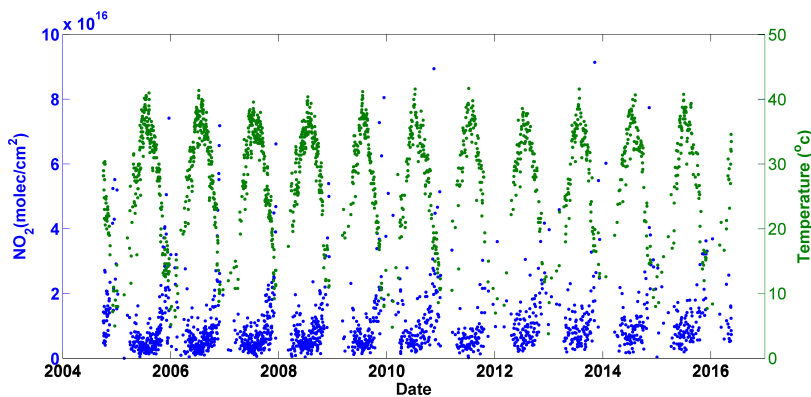
میانگین ماهانه مشترک دی‌اکسید نیتروژن شهر تهران برای بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI در شکل ۵ a آورده شده است. بیشترین مقدار دی‌اکسید نیتروژن در ماه دسامبر ($28/40 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$) و کمترین مقدار آن در ماه جولای ($1/68 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$) اتفاق می‌افتد. انحراف معیار فصل زمستان برابر $14/84 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ است که بیشتر از مقدار آن در فصل تابستان، $3/73 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ می‌باشد. میانگین ماهانه مشترک دمای سطحی نیز در شکل ۵ b آورده شده است. در فصل‌های پاییز و زمستان (بهار و تابستان) دما کمترین (بیشترین) مقدار را دارد که سبب پایداری (ناپایداری) و سکون بیشتر هوا می‌شود. شکل ۵ c میانگین ماهانه مشترک باد را نشان می‌دهد، بیشترین مقدار باد در فصل‌های سرد سال اتفاق می‌افتد. در شکل ۵ d میانگین ماهانه مشترک دید افقی شهر تهران نشان داده شده است که بیشترین دید افقی در دو فصل بهار و تابستان است. بیشترین انحراف معیار اندازه‌گیری شده دید افقی در فصل بهار ($2/52 \times 10^3$) و کمترین مقدار آن در فصل پاییز ($1/94 \times 10^3$) رخ می‌دهد.

شکل ۶ سری زمانی دی‌اکسید نیتروژن و دما را به صورت روزانه برای شهر تهران در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می

^۷Wind Rose Plot



شکل ۵: میانگین ماهانه مشترک (a) دی اکسید نیتروژن، (b) دمای سطحی، (c) باد و (d) دید افقی شهر تهران برای بازه ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶.



شکل ۶: سری زمانی دی اکسید نیتروژن و دما در بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر تهران.

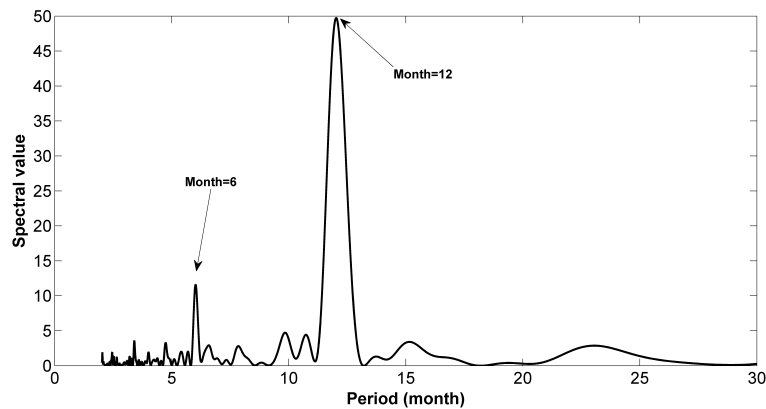
۲۰۱۶ نشان می‌دهد. بین دما و دی اکسید نیتروژن رابطه معکوس برقرار است. به طوری که در روزهای ابتدایی و انتهای هر سال میلادی که هوا سردتر است دی اکسید نیتروژن بیشترین و دما کمترین مقدار را دارد و در روزهای میانی سال میلادی بالعکس می‌باشد.

در جدول ۱ میانگین باد، دما، دید افقی، دی اکسید نیتروژن و ضریب همبستگی بین دی اکسید نیتروژن با باد، دما و دید افقی برای تمامی فصل‌ها و کل بازه اندازه‌گیری بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ آورده شده است. بیشترین مقدار میانگین سرعت باد در فصل بهار اتفاق می‌افتد که تفاوت چندانی با مقدار میانگین آن در طول سال ندارد. بیشترین (کمترین) مقدار میانگین دما در فصل تابستان (زمستان) رخ می‌دهد. ضریب همبستگی باد و دما با دی اکسید نیتروژن برای کل بازه اندازه‌گیری به ترتیب برابر $0.04-$ و $0.59-$ بدست آمد که نشان می‌دهد با افزایش دما میزان آلودگی هوا کاهش می‌یابد. میانگین دی اکسید نیتروژن در پاییز و زمستان بیشترین مقدار و در تابستان و بهار کمترین مقدار را دارد و میانگین کل دی اکسید نیتروژن برای بازه اندازه‌گیری برابر $9.87 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ می‌باشد. کمترین مقدار دید افقی در فصل زمستان اتفاق می‌افتد. ضریب همبستگی دید افقی با دی اکسید نیتروژن برابر $0.20-$ است که نشان‌دهنده کاهش دید افقی با افزایش دی اکسید نیتروژن است.

در این بخش مشاهده کردیم که دما عامل موثر در تغییرات دی اکسید نیتروژن در طول سال در شهر تهران است. کاهش دما باعث پایداری جو شده و موجب انباشت آلودگی در جو شهر تهران می‌شود. با افزایش آلودگی که بیشترین مقدار آن در فصل زمستان رخ می‌دهد، دید افقی نیز کاهش می‌یابد. باد، تاثیر کمتری نسبت به دما در تغییرات آلودگی جو تهران دارد. در بخش بعد با استفاده از برازش خطی پس از حذف دوره‌های تناوب بر روی داده‌های میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن، روند تغییرات دی اکسید نیتروژن به عنوان شاخصی از آلودگی هوا در بازه اندازه‌گیری مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۱: میانگین باد (m/s)، دما (c°) و دید افقی ($10^3 m$)، دی اکسید نیتروژن ($10^{15} molec/cm^2$) و ضریب همبستگی بین دی اکسید نیتروژن با باد و دما برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان و کل بازه اندازه‌گیری بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر تهران.

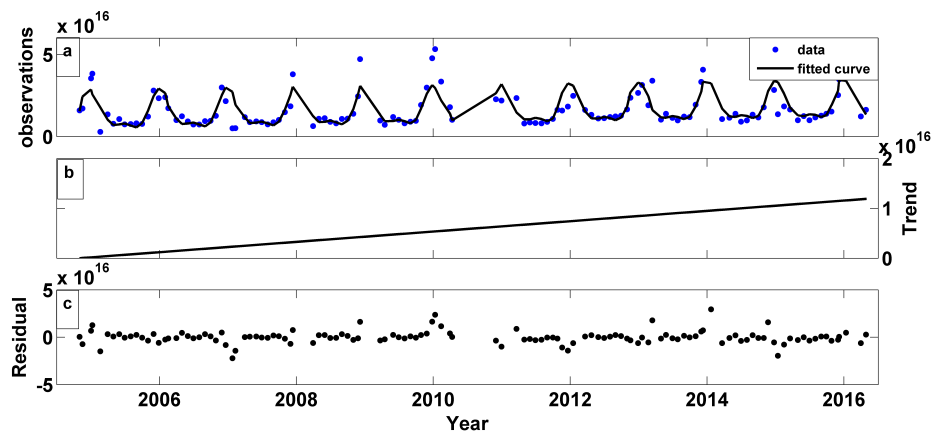
کل	زمستان	پاییز	تابستان	بهار	
۴/۲۸	۴/۴۸	۴/۰۹	۳/۷۴	۵/۲۷	میانگین باد
۲۸/۹۵	۱۲/۳۸	۲۱/۹۴	۳۵/۰۴	۲۸/۹۴	میانگین دما
۱۰/۲۴	۸/۸۹	۹/۹۱	۱۰/۳۵	۱۰/۵۴	میانگین دیدافقی
۹/۸۷	۱۹/۶۵	۱۶/۹۰	۶/۲۲	۶/۹۹	میانگین دی اکسید نیتروژن
-۰/۵۹	-۰/۲۵	-۰/۵۶	-۰/۲۹	-۰/۲۴	ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با دما
-۰/۰۴	۰/۰۰۶	-۰/۱۰	-۰/۰۵	۰/۰۸	ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با باد
-۰/۲۰	-۰/۱۹	-۰/۲۸	۰/۰۰	۰/۰۴	ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با دید افقی



شکل ۷: طیف پیکسل بالاسر شهر تهران.

۲.۴ استخراج روند دی اکسید نیتروژن

پس از تشکیل سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن بین بازه اندازه‌گیری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶، با استفاده از آنالیز طیفی کمترین مربعات [۲۴] دوره‌های تناوب سالانه، شش و چهار ماهه مشاهده شد. شکل ۷ طیف سری‌های زمانی دی اکسید نیتروژن را نشان می‌دهد که مولفه‌های سالانه، شش و چهار ماهه دارای مقدار طیف بالایی است. پس از محاسبه طیف، تست آماری ارائه شده توسط پاگیاتاکیس در سال ۱۹۹۹ [۲۵] روی طیف اعمال شد و مولفه‌های سالانه، شش و چهار ماهه از نظر آماری نیز معنی‌دار شناخته شدند. این مولفه‌ها در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد مولفه‌های معنی‌دار هستند و بایستی برای محاسبه روند این مولفه‌ها از سری زمانی برداشته شوند و پس از آن روند محاسبه شود. دوره‌های تناوب شش و چهار ماهه هارمونیک‌های سالانه محسوب می‌شوند. پس از حذف مولفه‌های معنی‌دار سالانه، شش و چهار ماهه از سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن، روند با استفاده از برازش خطی بر روی سری زمانی باقیمانده حساب می‌شود. شکل ۸ (a) سری زمانی ماهانه دی اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده برای پیکسل بالاسر شهر تهران و سری زمانی مدل شده آن، (b) روند و (c) سری زمانی باقیمانده پس از حذف روند و مولفه‌های معنی‌دار برای بازه اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد. روند افزایشی دی اکسید نیتروژن برای شهر تهران $10^{14} molec/cm^2 \times 5/76$ در سال می‌باشد. پس از محاسبه مقدار روند با استفاده از تست آماری ارائه شده توسط ودرهد در سال ۱۹۹۸ [۲۶] اعتبار سنجی انجام شد و عدد



شکل ۸: (a) سری زمانی ماهانه دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده برای پیکسل متناظر شهر تهران و سری زمانی مدل شده آن، (b) روند و (c) سری زمانی باقیمانده.

روند بدست آمده در سطح اطمینان ۹۵ درصد معتبر است و روند معنی‌دار تلقی می‌شود.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله از داده‌های دی‌اکسید نیتروژن سنجنده OMI و داده‌های باد، دمای سطحی و دید افقی ایستگاه مهرآباد برای بررسی رفتار و روند آلودگی هوای شهر تهران در بازه اندازه‌گیری اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ استفاده شده است. مقدار میانگین دی‌اکسید نیتروژن در بازه اندازه‌گیری شده برای پیکسل بالاسر شهر تهران $9/87 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ است. بیشترین مقدار دی‌اکسید نیتروژن در فصل سرد و کمترین مقدار آن در فصل گرم رخ می‌دهد. به طوری که بیشترین مقدار دی‌اکسید نیتروژن در ماه دسامبر ($28/40 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$) و کمترین مقدار آن در ماه جولای ($8/68 \times 10^{15}$) اتفاق می‌افتد. انحراف معیار فصل زمستان برابر $14/84 \times 10^{15}$ است که بیشتر از مقدار آن در فصل تابستان، $3/37 \times 10^{15}$ می‌باشد. مقدار همبستگی باد و دی‌اکسید نیتروژن تقریباً در تمامی فصل‌ها ناچیز می‌باشد. بیشترین (کمترین) مقدار میانگین دما در فصل‌های تابستان (زمستان) اتفاق می‌افتد. ضریب همبستگی دی‌اکسید نیتروژن با دمای سطحی در طول سال برابر $-0/59$ است. می‌دانیم که باد و دمای سطحی دو عامل مهم طبیعی برای از بین بردن آلودگی هوا هستند، نتایج ما نشان می‌دهد که در شهر تهران دما عامل موثرتری نسبت به باد می‌باشد. به طوری که در تابستان آلودگی هوای کمتری نسبت به زمستان مشاهده می‌کنیم. اما افت و خیز آلودگی هوا در زمستان بیشتر از تابستان است که به دلیل تغییرات زیاد هوا در زمستان می‌باشد. ضریب همبستگی دید افقی با دی‌اکسید نیتروژن برابر $-0/20$ بدست آمد. کمترین مقدار میانگین دید افقی در شهر تهران در فصل سرد سال اتفاق می‌افتد که به دلیل آلودگی هوا در این فصل می‌باشد. با استفاده از برازش خطی - پس از حذف دوره‌های تناوب سالیانه، شش و چهار ماهه - بر روی سری زمانی میانگین ماهانه دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI در بازه اندازه‌گیری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶، روند با اعتبار ۹۵ درصد محاسبه شد. مقدار روند دی‌اکسید نیتروژن در هر سال $5/76 \times 10^{14} \text{ molec/cm}^2$ بدست آمد. در این مطالعه، روند افزایشی آلاینده دی‌اکسید نیتروژن در بازه اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر تهران مشاهده شد، که می‌تواند به دلیل افزایش شهرنشینی، گسترش جمعیت، استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی و وسایل نقلیه باشد. همانطور که دیدیم توپوگرافی شهر و وارونگی دمایی و سرعت کم باد و نیز جهت وزش آن در افزایش این آلاینده بی‌تاثیر نیستند. در نتیجه وضعیت هوای این شهر از نظر حفظ سلامت افراد جامعه به خصوص افراد حساس کیفیت مطلوبی ندارد و نیازمند توجه بیشتر و برنامه‌های مدیریتی مناسب جهت کاهش غلظت آلاینده‌های هوا می‌باشد.

مراجع

- [۱] جوانبخت امیری، ستاره و خاتمی، سید هادی (۲۰۱۲). بررسی ارتباط بین آلاینده‌های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در تهران با رویکرد آنالیز رگرسیون سال ۱۳۸۴، انسان و محیط زیست ۱۰ (۲۰۱۲): ۱۵-۲۸.
- [2] Kenneth, W., Warner, C. F., Davis, W. (1981). Air pollution: its origin and control. Harper and Row, New York. Wark, k. and C. F. Warner, 1981.
- [۳] یاور، حسین و سلیقه، محمد (۲۰۱۱). سطوح وارونگی در آلودگی‌های شهر تهران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۱ (۲۰)، ۸۹-۱۰۵.
- [4] Loomis, D., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim- Tallaa, L., ... Straif, K. (2013). The carcinogenicity of outdoor air pollution. The lancet oncology, 14(13), 1262-1263.
- [5] WHO. (2014). Burden of disease from ambient and household air pollution.
- [۶] شرکت کنترل کیفیت هوا، <http://air.tehran.ir>.
- [7] Tiwary, A., Colles, J. (2009). Air pollution: measurement, modelling mitigation. Taylor Francis.
- [۸] شرعی‌پور، زهرا و علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی (۲۰۱۴). بررسی وضعیت NO_2 تروپوسفری ایران طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲، محیط‌شناسی، ۴۰ (۱)، ۶۵-۷۸.
- [۹] جوانبخت امیری، ستاره (۲۰۰۶). محاسبه اثر بین آلودگی هوا و عناصر هواشناسی در تهران با رویکرد آنالیز رگرسیون، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- [10] World Health Organization. (2003). Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide: report on a WHO working group, Bonn.
- [11] Challen, P. J. R., Hickish, D. E., Bedford, J. (1958). An Investigation of Some Health Hazards in an Inert- gas Tungsten- arc Welding- shop. British journal of industrial medicine, 15(4), 276.
- [۱۲] طاوسی، تقی و حسین آبادی، نسرین (۲۰۱۷). ارزیابی شاخص‌های وارونگی دمای لایه مرزی هوای شهر تهران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی.
- [۱۳] دفتر برنامه‌ریزی و تالیف کتب درسی ایران - زمین شناسی - انتشارات شرکت چاپ کتاب‌های درسی ایران.
- [۱۴] محمدی، حسین (۲۰۱۷). چرا دانش مخاطره (وارونگی دمای شهر تهران)، مدیریت مخاطرات محیطی (دانش مخاطرات سابق).
- [۱۵] محسنی، ذات‌الله (۱۹۸۷). تاثیر عوامل جوی بر آلودگی هوای تهران، پایان نامه دانشکده ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- [۱۶] صفوی، یحیی و علیجانی، بهلول (۲۰۰۷). بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران، پژوهش‌های جغرافیایی.
- [17] Van Der A, R. J., Peters, D. H. M. U., Eskes, H., Boersma, K. F., Van Roozendael, M., De Smedt, I., kelder, H. M. (2006). Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO_2 over China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111(D12).
- [18] Lamsal, L. N., Duncan, B. N., Yoshida, Y., Krotkov, N. A., Pickering, k. E., Streets, D. G., Lu, Z. (2015). US NO_2 trends (2005-2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). Atmospheric Environment, 110, 130-143.

- [19] Ghude, S. D., Van der A, R. J., Beig, G., Fadnavis, S. (2009). trends in NO_2 over the major global hotspot regions during the past decade and their inter- comparison, Environmental Pollution, 157, 1873-1878.
- [20] <https://www.amar.org.ir>.
- [۲۱] ثنایی، مریم، خانمحمدی، مجید و محمدی، حسین (۲۰۱۵). تحلیل اثر الگوی سینوپتیکی رخداد مخاطره آمیز موج گرمای تابستان ۱۳۹۲ و فوت ناشی از آلودگی شهر تهران، دانش مخاطرات محیطی، ۲(۱)، ۶۷-۸۳.
- [22] <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.htm>.
- [23] www.irimo.ir.
- [24] Vanicek, P. (1971). Further development and properties of the spectral analysis by least-squares. Astrophysics and Space Science, 12(1), 10-33.
- [25] Pagiatakis, S. D. (1999). Stochastic significance of peaks in the least- squares spectrum. Journal of Geodesy. 73(2), 67-78.
- [26] Weatherhead, E. C., Reinsel, G. C., Tiao, G. C., Meng, X.L., Choi, D., Cheang, W. K., ... Miller, A. J. (1998). Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103(D14), 17149-17161.