

بررسی وضعیت NO_2 تروپوسفری ایران طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲

زهرا شرعی‌پور*^۱، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲

۱. کارشناس ارشد هواشناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

bidokhti@ut.ac.ir

۲. استاد گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۹/۴

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۷/۱۴

چکیده

در این تحقیق، توزیع زمانی مکانی NO_2 تروپوسفری در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره OMI طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ بررسی شده است. نتایج بررسی‌های تغییرات فصلی NO_2 تروپوسفری نشان می‌دهد که معمولاً بیشینه فصلی در زمستان و کمینه فصلی در تابستان رخ می‌دهد. در ایستگاه ژئوفیزیک تهران، طی سال ۲۰۰۷، بیشینه NO_2 تروپوسفری در دسامبر با مقدار $23/28 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ و کمینه NO_2 تروپوسفری در جولای با مقدار $5/06 \times 10^{15} \text{ molec/cm}^2$ رخ داده است. بررسی نقشه‌های میانگین ماهانه توزیع تروپوسفری NO_2 در منطقه خاورمیانه نشان می‌دهد که معمولاً مناطق با غلظت بالای ستون تروپوسفری NO_2 مربوط به شهرهایی با ترافیک سنگین وسایل نقلیه موتوری و فعالیت‌های صنعتی است. از جمله این مناطق می‌توان در ایران به محدوده شهرهای تهران، اصفهان، مشهد، رشت، شیراز، اهواز و تبریز اشاره کرد. بررسی روند تغییرات بلندمدت ۹ ساله ۲۰۰۴-۲۰۱۲ در شهرهای با غلظت بالای NO_2 تروپوسفری نشان داده که روند افزایشی در محدوده شهرهای تهران، اصفهان و شیراز مشاهده می‌شود. مقایسه منطقه‌ای تهران از نظر NO_2 تروپوسفری و نزدیک سطح زمین طی ماه‌های سرد نشان می‌دهد که مناطق شمال و شمال شرق تهران بسیار آلوده‌تر از جنوب آن است. یکی از عوامل مؤثر این امر می‌تواند الگوی باد و وزش بادهای دشت به کوه حاکم بر تهران باشد. شرایط هواشناسی می‌تواند شدت آلودگی NO_2 تروپوسفری و گستردگی آن را در ایران، بیشتر کند. از جمله این شرایط می‌توان به حضور پشته‌ها در تروپوسفر میانی همراه پایداری ستون هوا، کاهش سرعت باد و افزایش وارونگی دمای هوای سطحی اشاره کرد. مقایسه مقادیر ستون NO_2 تروپوسفری با غلظت آلاینده NO_2 سطح زمین نشان می‌دهد که طی فصل سرد، همبستگی مثبتی بین آن‌ها برقرار است.

کلیدواژه

ایران، چشمه‌های سطحی، دی اکسید نیتروژن تروپوسفری، شرایط هواشناسی.

۱. سرآغاز

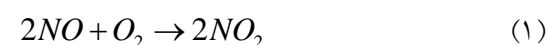
سوزاندن گیاهان می‌شوند. علاوه بر این، چشمه‌های طبیعی NO_2 تروپوسفری، شامل گسیل ناشی از خاک، برق ناشی از تخلیه الکتریکی رعد و برق ابرها و آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها می‌شوند. به طور کلی چشمه‌های گسیل NO_2 از محلی به محل دیگر متفاوت‌اند. فعالیت‌های مربوط به ترافیک وسایل نقلیه موتوری یکی از منابع انسان‌ساز اکسیدهای نیتروژن است که کنترل مهمی در غلظت NO_x محیط شهری دارد. غلظت‌های میانگین ساعتی و سالانه NO_2 از نکات مهم در ارزیابی

در میان اکسیدهای نیتروژن در هوا، اکسید نیتروژن (NO) و دی اکسید نیتروژن (NO_2) از آلوده‌کننده‌های مهم هوای محیط‌های شهری محسوب می‌شوند. دی اکسید نیتروژن گازی مرئی با رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز و بویی تند است. احتراق سوخت‌ها در دمای بالا سبب تولید این آلاینده می‌شود.

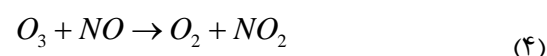
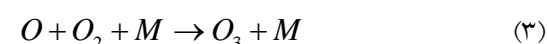
چشمه‌های اصلی NO_2 تروپوسفری، شامل فعالیت‌های انسان‌ساز از قبیل صنعت، ترافیک وسایل نقلیه موتوری و

کیفیت هوا محسوب می‌شوند. غلظت NO_2 شامل گسیل‌های اولیه از وسایل نقلیه و تشکیل ثانویه در اثر واکنش شیمیایی NO با ازن (O_3) است. در کشورهای توسعه‌یافته، رعایت استانداردهای قانونی برای گسیل NO_x از وسایل نقلیه به منظور بهبود کیفیت هوا در محیط شهری از اهمیت خاصی برخوردار است (Shon, et al., 2011).

آلاینده ثانویه NO_2 از اکسیداسیون NO از طریق واکنش زیر تشکیل می‌شود. NO نیز آلاینده اولیه‌ای است که از طریق ترافیک وسایل نقلیه و اشتعال سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود.



واکنش‌های مربوط به تشکیل ثانویه NO_2 در خصوص ازن به صورت زیر است.



واکنش ۲ در حضور تابش خورشیدی انجام می‌شود و طی روز رخ می‌دهد (فوتولیز در طول موج بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر). NO_2 تروپوسفری نقش مهمی در شیمی جو و به ویژه آلودگی هوا دارد. NO_2 یک پیش‌نشانگر (precursor) برای پدیده smog محسوب می‌شود. علاوه بر این، غلظت‌های بالای NO_2 به طور مستقیم (به علت گاز سمی بودن) و غیرمستقیم (تشکیل ذرات) سهمی در آثار سوء در سلامت دارند.

شواهد علمی نشان داده است که فرارگرفتن در معرض تنفس NO_2 به طور کوتاه‌مدت (۲۴-۰/۵ ساعت) آثار زیان‌آوری در سیستم تنفس انسان برجا می‌گذارد. این آثار شامل التهاب سیستم تنفسی در افراد سالم و افزایش بیماری‌های تنفسی در افراد مبتلا به آسم است. مطالعات نشان داده که تنفس کوتاه‌مدت غلظت بالای NO_2 ، افزایش مراجعه افراد به مراکز درمانی و بیمارستانی به علت بیماری‌های تنفسی را در پی داشته است. غلظت‌های NO_2 در نزدیک وسایل نقلیه موتوری، خیابان‌ها و جاده‌ها بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده (۲ یا ۳ برابر) در ایستگاه‌های

اندازه‌گیری است. غلظت‌های NO_2 نزدیک خیابان‌ها به ویژه برای افراد آسیب‌پذیر مانند مبتلایان به آسم، کودکان و افراد مسن حائز اهمیت است. اکسیدهای نیتروژن از طریق واکنش با رطوبت و آمونیاک و سایر ترکیبات می‌توانند ذرات ریز جوی را تشکیل دهند. این ذرات ریز می‌توانند با نفوذ به بخش‌های حساس ریه‌ها سبب بروز بیماری‌های تنفسی، ریوی و قلبی شوند (EPA). <http://www.epa.gov/air/nitrogenoxides>. NO_2 به علت طول عمر هرچند کوتاه، سهمی برای واداشته‌های تابشی دارد و بنابراین می‌تواند توازن تابشی زمین را از طریق آثار آن در شیمی ازن تروپوسفری و طول عمر متان (CH_4) و سایر گازهای گلخانه‌ای تغییر دهد (Zhang, et al., 2007).

با استفاده از برخی روش‌ها (مثل طیفی) می‌توان آلاینده NO_2 سطح زمین را از داده‌های تروپوسفری برآورد کرد. Lamsal و همکاران (2008) غلظت آلاینده NO_2 سطح زمین را با استفاده از مدل شیمیایی جوی سه‌بعدی (GEOS-Chem) از داده‌های تروپوسفری ماهواره‌ای OMI برآورد کرده‌اند. NO_2 در لایه مرزی می‌تواند سهم عمده‌ای از NO_2 تروپوسفری داشته باشد. در تحقیق Bucselo و همکاران (2008)، مقایسه داده‌های NO_2 تروپوسفری ماهواره OMI و اندازه‌گیری‌های انجام شده از طریق هواپیماها نشان داد که ارتباط معنی داری بین این دو وجود دارد. غلظت‌های NO_2 و ازن در محیط شهری به لحاظ اهمیتی که دارند، در بسیاری از تحقیقات بررسی شده‌اند (Chaloulakou, et al., 2008; Anttila & Tuovinen, 2010; Sun, et al., 2011; Mavroidis, 2012). در روندهای بلندمدت غلظت‌های NO_2 ، NO_x و ازن را برای دوره ۳ ساله ۲۰۰۷-۲۰۰۹ در انواع ایستگاه‌های شهری، حومه شهری و کنار خیابان آتن بررسی کرده‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داده که در ایستگاه‌های کنار خیابان که تحت تأثیر مستقیم ترافیک وسایل نقلیه قرار دارند، غلظت NO_x و NO_2 زیاد، و غلظت ازن کم است.

Zhang و همکاران (2007) ویژگی‌های فضایی و زمانی

NO_x ناشی از فعالیت های انسانی و طبیعی روی NO_x و ازن تروپوسفری در امریکا را با استفاده از مدل انتقال شیمیایی سه بعدی بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که برق حاصل از رعد و برق تابستانی در امریکا نقش مهمی در غلظت NO_x و ازن تروپوسفر میانی و بالایی دارد. از آنجا که آلودگی هوا و فعالیت‌های شهرسازی از عوامل مؤثر در رعد و برق است، سیاستگذاری‌ها در این زمینه می‌تواند به طور غیرمستقیم در غلظت NO_x و ازن تروپوسفری و اقلیم تأثیرگذار باشد. Wallace و Kanaroglou (2009) حساسیت داده های NO_2 تروپوسفری ماهواره ای OMI به رویداد وارونگی دمایی در لایه مرزی پایینی را در شهر صنعتی با ترافیک بالا در کانادا بررسی کرده‌اند. نتایج به دست آمده آن‌ها نشان داده که ماهواره OMI نسبت به تغییرات مقدار NO_2 طی وارونگی دمایی، حساس و در روزهایی با رویداد وارونگی دمایی، افزایش مقادیر NO_2 به دست آمده از طریق ماهواره OMI کمتر از افزایش NO_2 سطح زمین بوده است.

شفاعت نظرو و همکاران (۱۳۹۱) آثار زیست محیطی آلاینده های NO_x و SO_2 منتشره از نیروگاه گرمایی تبریز را بررسی کرده اند. شرعی‌پور (۱۳۹۱) ارتباط بین غلظت آلاینده NO_2 و سایر ناکس های سطح زمین را با آلاینده ازن بررسی کرده است. شرعی‌پور و علی‌اکبری بیدختی (۱۳۹۱) شاخص آلودگی هوا از نظر آلاینده NO_2 را در تهران بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که طی ماه‌های دسامبر و آگوست، روند بلندمدت آلاینده NO_2 برای دوره ۱۰ ساله ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ افزایشی بوده است.

در تحقیق حاضر، تغییرات فصلی NO_2 تروپوسفری ایران بررسی شده است. سپس، توزیع مکانی NO_2 تروپوسفری در ایران و به طور جداگانه در تهران بررسی شد و مناطق آلوده تر مشخص شدند. همین‌طور روند بلندمدت در شهرهای با غلظت بالای NO_2 تروپوسفری تعیین شده است. مقایسه NO_2 تروپوسفری و سطح زمین برای مناطق تهران انجام و تأثیر عوامل هواشناسی هم‌مدیدی در تغییرات غلظت NO_2 بررسی شده است.

توزیع غلظت چگالی NO_2 تروپوسفری در چین را بر اساس اندازه‌گیری های ماهواره‌ای برای دوره سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۶ بررسی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده که رشد شایان توجهی در NO_2 تروپوسفری شرق چین به خصوص در بخش‌های صنعتی با رشد اقتصادی سریع روی داده است. Ghude و همکاران (2009) توزیع NO_2 تروپوسفری را در مقیاس جهانی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GOME و SCIAMACHY بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج، مناطق دارای مقادیر بالای NO_2 تروپوسفری طی سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۰۶ مشخص شده و روندهای بلندمدت NO_2 تروپوسفری به دست آمده است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده که مقدار NO_2 تروپوسفری در کشورهای در حال توسعه مانند چین، جنوب آسیا، خاورمیانه و جنوب افریقا افزایش و در شرق امریکا و اروپا کاهش یافته است. عامل مهم در روند افزایشی NO_2 تروپوسفری در کشورهای خاورمیانه مانند ایران، عراق، عربستان سعودی، کویت و ترکیه به مصرف سوخت نسبت داده شده است. David و Nair (2013) توزیع مکانی، تغییرات فصلی و روند بلندمدت NO_2 و ازن تروپوسفری را در هند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای OMI بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، NO_2 تروپوسفری در هند دارای گرادیان شدید شمال به جنوب $0.005 \text{ DU}/^\circ$ بوده است. به بیان دیگر، مقادیر بالای NO_2 و ازن تروپوسفری در شمال و مقادیر کم آن در جنوب هند وجود داشته و NO_2 تروپوسفری در مناطق اقیانوسی هند، روند افزایشی داشته است. Zhou و همکاران (2012) روند بلندمدت تغییرات NO_2 تروپوسفری در اروپا را برای سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده که NO_2 تروپوسفری در غرب اروپا به ویژه آلمان، دارای روند کاهشی بوده و بالاترین روندهای کاهشی مربوط به اسپانیا و انگلستان است. کاهش شدید NO_2 تروپوسفری در مناطق تولید انرژی اسپانیا، به سیاستگذاری‌های کاهش گسیل ناشی از نیروگاه‌های زغالی و سایر فعالیت‌های صنعتی در سال‌های اخیر نسبت داده شده است. Zhang و همکاران (2003) آثار چشمه‌های

۲. مواد و روش بررسی

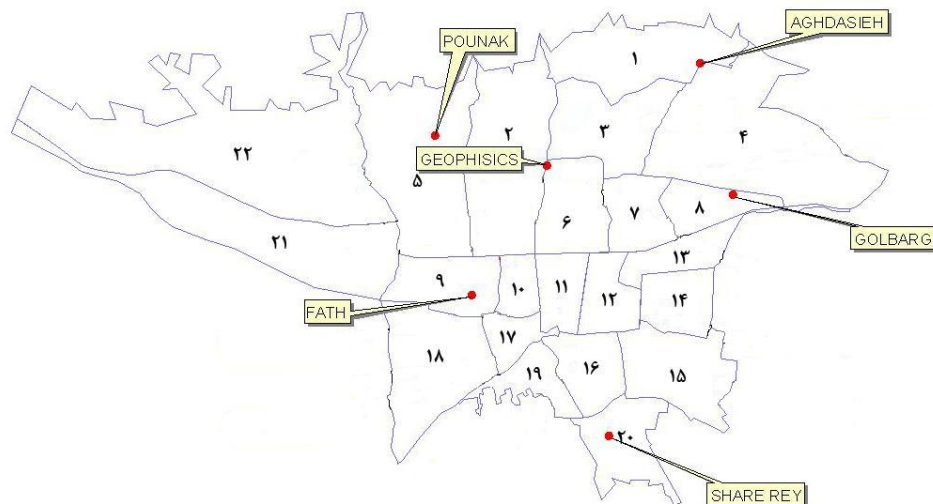
و ایستگاه‌های مورد استفاده عبارت اند از: ژئوفیزیک، اقدسیه، گلبرگ، شهری، محلاتی، پونک، فتح. داده‌های آلاینده NO_2 نزدیک سطح زمین شهرستان‌ها از سازمان محیط زیست تهیه شده است و ایستگاه‌های مورد استفاده عبارت اند از: اصفهان، شیراز و تبریز. داده‌های آلاینده NO_2 نزدیک سطح زمین بر حسب واحد ppb است. داده‌های هواشناسی سرعت باد و وارونگی دمایی مربوط به برج رسالت شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران است. از آنجا که واحد هر شبکه داده‌ای ماهواره‌ای ستون NO_2 تروپوسفری حدود ۱۰ کیلومتر است و NO_2 نزدیک سطح زمین به صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری شده است، تغییرات محلی آن به علت چشمه‌های مختلف می‌تواند بسیار زیاد باشد. این داده‌ها معمولاً با یکدیگر مقایسه می‌شوند و تبدیل دو واحد molec/cm^2 و ppb آلاینده NO_2 در تحقیقات متداول نیست، اما تقریباً یک واحد ppb معادل $10^{15} \times 2/5 \text{ molec/cm}^2$ است.

در این تحقیق، از داده‌های NO_2 تروپوسفری (NO_2 tropospheric column) ماهواره‌ای OMI استفاده شده است و این داده‌ها از سایت TEMIS (http://www.temis.nl/airpollution/no2col/no2regioomimonth) تهیه شده‌اند. این داده‌ها برآوردی از تعداد مولکول‌های NO_2 در یک ستون جوی از سطح زمین تا قله تروپوسفر، که ۲۰۰ hPa فرض شده، است و بر حسب واحد molec/cm^2 بیان می‌شود. واحد شبکه‌ای این داده‌ها ۰/۱۲۵ درجه عرض و طول جغرافیایی است. به طور خلاصه، داده‌های ستون NO_2 تروپوسفری ماهواره‌ای OMI در ۳ مرحله اصلی به دست می‌آیند که عبارت‌اند از: محاسبه ستون مایل (با استفاده از طیف سنجی)، محاسبه ستون مایل تروپوسفری (با استفاده از روش‌های مدلینگ و شبیه‌سازی) و محاسبه ستون قائم تروپوسفری (با استفاده از فاکتور توده هوا).

داده‌های آلاینده NO_2 نزدیک سطح زمین تهران از شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران تهیه شده است



شکل ۱. نقشه توزیع شهرهای منتخب ایران



شکل ۲. نقشه توزیع ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای تهران

وسایل نقلیه موتوری و فعالیت‌های صنعتی و موقعیت‌های هواشناسی متفاوت است. به طور نمونه شکل ۴ تغییرات میانگین ماهانه ستون تروپوسفری NO_2 را برای شهرهای مراکز استان تهران، اصفهان، مشهد، تبریز، رشت و اراک طی سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه فصلی در زمستان رخ می‌دهد و بالاترین مقادیر مربوط به ایستگاه تهران و کمترین مربوط به ایستگاه تبریز و اراک است. به بیان دیگر، آلوده‌ترین ایستگاه، تهران و پاک‌ترین، تبریز و اراک و بیشترین اختلاف بین ایستگاه‌ها مربوط به فصل سرد است. از آنجا که اراک شهری صنعتی محسوب می‌شود، به نظر می‌رسد، ترافیک وسایل نقلیه عامل مهم‌تری نسبت به فعالیت‌های صنعتی در تولید NO_2 تروپوسفری است. یکی دیگر از عوامل بیشینه غلظت ستون تروپوسفری NO_2 در زمستان، بیشتر بودن طول عمر NO_2 در غیاب نور خورشید است (وندر و همکاران، ۲۰۰۶).

شکل ۵ تغییرات میانگین ماهانه ستون تروپوسفری NO_2 را در تهران برای سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تهران در سال ۲۰۱۰ از نظر آلاینده NO_2 آلوده‌تر از سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ بوده است. مقایسه نقشه‌های توزیع ستون تروپوسفری

نقشه توزیع ایستگاه‌های منتخب ایران در شکل ۱ و نقشه توزیع ایستگاه‌های تهران در شکل ۲ آمده است. نقشه‌های هواشناسی مربوط به مرکز تحقیقاتی NOAA است (NOAA: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> ; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>).

۳. نتایج

بررسی و مقایسه نقشه‌های میانگین ماهانه توزیع ستون تروپوسفری NO_2 در منطقه خاورمیانه در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که معمولاً بیشینه فصلی در زمستان و کمینه فصلی در تابستان رخ می‌دهد و در فصل سرد نیز بیشینه ماهانه مربوط به ماه‌های دسامبر و نوامبر است. شکل ۳ این نقشه‌ها را برای ماه‌های سرد دسامبر و گرم جولای نشان می‌دهد. بررسی این نقشه‌ها نشان می‌دهد که مناطق با غلظت بالای ستون تروپوسفری NO_2 مربوط به شهرهایی با ترافیک بالای وسایل نقلیه موتوری و فعالیت‌های صنعتی است. از جمله این مناطق می‌توان در ایران به استان‌های تهران و اصفهان و در حاشیه خلیج فارس به کویت، دبی و بحرین و در عربستان به ریاض اشاره کرد.

مقادیر غلظت ستون تروپوسفری NO_2 در شهرهای پرتراffic مرکزی نیز با توجه به مقدار ازدحام و تردد

NO₂ تروپوسفری و سطح زمین چند شهر ایران مانند اصفهان، شیراز و تبریز نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به طور کلی در فصل سرد، در مناطقی که مقدار NO₂ نزدیک سطح زمین بالاست، مقادیر بالای NO₂ تروپوسفری نیز وجود دارد. همبستگی بین این دو پارامتر بررسی شد و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در فصل سرد همبستگی مثبت معنی‌داری (از نظر آماری در سطح ۹۹ درصد) بین آن دو برقرار است ($R=0.78$). شکل ۷ نمودار همبستگی، رابطه همبستگی خطی بین آن‌ها و ضریب همبستگی مربوطه را نشان می‌دهد. به بیان دیگر در فصل سرد می‌توان از طریق این رابطه با داشتن مقادیر NO₂ نزدیک سطح زمین، مقادیر NO₂ تروپوسفری را برآورد کرد.

به منظور بررسی تأثیر عوامل هواشناسی در تغییرات غلظت ستون تروپوسفری NO₂، نقشه‌های میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۵۰۰ mb برای سال‌های مختلف مقایسه شد. بررسی این نقشه‌ها حضور پشته در منطقه ایران در دسامبر ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد (مطابق شکل الف (۸)). تداوم حضور پشته در منطقه می‌تواند سبب پایداری ستون هوا و انتشار کمتر آلودگی هوا و افزایش وارونگی دمایی شود و وسعت و غلظت NO₂ تروپوسفری را افزایش دهد. برای مقایسه، نقشه یکی از سال‌هایی که تداوم حضور پشته وجود ندارد (مانند سال ۲۰۰۴) نیز آورده شده است. در این سال، ناوه ضعیفی بر منطقه حاکم است (مطابق شکل ب (۸)).

از آنجا که وارونگی دمایی نشانه‌ای از پایداری ستون هواس، وارونگی دمای سطحی در برج رسالت شهرداری تهران بررسی شده است. برای بررسی وارونگی دمای سطحی، اختلاف دمای ارتفاع ۸ متری و سطح زمین و تعداد روزهای با وارونگی دمایی بزرگ‌تر از ۱ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. شکل ۹ تعداد روزهای با وارونگی دمایی را طی دسامبر برای سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دسامبر ۲۰۱۰ شامل بالاترین رخداد وارونگی دمایی بوده است.

NO₂ برای میانگین ماهانه دسامبر سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که در برخی سال‌ها مانند ۲۰۱۰، محدوده غلظت بالای NO₂ تروپوسفری مربوط به استان‌های تهران و اصفهان گسترده‌تر از سایر سال‌ها بوده است. در این حالت، غلظت بالای NO₂ تروپوسفری از مرکز تهران تا حدود ۰/۵ درجه در جهات مختلف گسترده می‌شود و از شرق تا آبرسد دماوند و از غرب تا فردیس کرج و از شمال شرق تا نزدیکی جاده چالوس و از شمال غرب تا سد طالقان و از جنوب شرق تا گرمسار گسترده می‌شود.

مقایسه NO₂ تروپوسفری میان مناطق مختلف تهران نشان می‌دهد که مناطق شمالی، شمال شرقی و شمال غربی تهران آلوده‌تر از سایر مناطق آن بوده و جنوب تهران پاک‌ترین منطقه است. به طور نمونه، جدول ۱ این مقایسه را برای ماه‌های پیک آلودگی NO₂ تروپوسفری یعنی نوامبر و دسامبر ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این ماه‌ها مناطق اقدسیه (شمال شرق) و پونک (شمال غرب) نسبت به سایر ایستگاه‌ها آلودگی بیشتری دارند و شهری پاک‌ترین است. مقایسه وضعیت آلاینده NO₂ نزدیک سطح زمین میان مناطق مختلف تهران نیز همین نتایج را نشان می‌دهد (مطابق جدول ۱). بنابراین، تا حدودی تغییرات منطقه‌ای NO₂ تروپوسفری و NO₂ نزدیک سطح زمین در تهران مشابه و مناطق شمال و شمال شرق تهران بسیار آلوده‌تر از جنوب آن است. یکی از عوامل مؤثر این امر می‌تواند الگوی باد و بادهای دشت به کوه و کوه به دشت حاکم بر تهران باشد. شکل ۶ الگوی جهت باد در ارتفاع ۲۴ متری سطح زمین را در ایستگاه برج رسالت برای نمونه‌ای از نوامبر سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. الگوی باد در ارتفاع ۲۴ متری از سطح زمین بهتر از ارتفاع ۱۰ متری می‌تواند بیان‌کننده جهت باد دشت به کوه و کوه به دشت باشد. مطابق این شکل، هنگام شب جهت باد شمالی و شمال شرقی کوه به دشت حاکم است و با شروع صبح به تدریج وزش باد جنوبی دشت به کوه (آناباتیک) آغاز می‌شود و طی روز، آلاینده NO₂ از بخش‌های جنوبی شهر به شمال شهر انتقال می‌یابد. مقایسه

جدول ۱. مقایسه NO₂ سطح زمین (واحد ppb) و تروپوسفری (واحد 10¹⁵ molec/cm²) مناطق مختلف الف) تهران و ب) برخی شهرستان‌ها در ماه‌های پیک نوامبر و دسامبر. ایستگاه‌های تهران طی سال ۲۰۱۰، ایستگاه‌های اصفهان و شیراز طی سال ۲۰۰۹ و ایستگاه تبریز طی سال ۲۰۰۸ است.

(الف)

منطقه	اقدسیه (شمال شرق)		گلبرگ (شرق)		شهرری (جنوب)		پونک (شمال غرب)		فتح (غرب)		ژئوفیزیک (مرکز)	
	سطح	تروپوسفر	سطح	تروپوسفر	سطح	تروپوسفر	سطح	تروپوسفر	سطح	تروپوسفر	سطح	تروپوسفر
نوامبر	۸۸/۲	۵۱/۶۲	۳۹/۶	۴۰/۸۶	۱۶/۶	۲۹/۹۵	۵۰/۱	۵۰/۴۷	۶۴/۳	۳۹/۴۲	۷۲/۹	۳۹/۲۹
دسامبر	۹۵/۴	۵۳/۵۱	۵۷/۲	۳۵/۱۷	۳۰/۵	۲۲/۲۴	۶۵/۳	۴۷/۲۴	۵۷/۲	۳۲/۹۴	۶۸/۳	۳۵/۵۶

(ب)

منطقه	اصفهان		شیراز		تبریز	
	سطح	تروپوسفر	سطح	تروپوسفر	سطح	تروپوسفر
نوامبر	۳۴/۱	۱۵/۰۹	۲۶/۹	۶/۶۲	۲۲/۲	۵/۷۲
دسامبر	۵۵/۲	۲۲/۶۲	۳۱/۴	۸/۳۸	۲۸/۱	۷/۷۵

تروپوسفری و NO₂ نزدیک سطح زمین یکسان نیست. برای نمونه شکل ۱۰ این مقایسه را برای ایستگاه ژئوفیزیک تهران طی سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سال ۲۰۰۷ از آگوست تا دسامبر، تغییرات مشابه است، اما بیشینه تابستانی آلاینده NO₂ سطحی در ستون NO₂ تروپوسفری مشاهده نمی‌شود. در سال ۲۰۱۰ تغییرات، مشابه و همبستگی خوبی (R=0/92) بین آن‌ها برقرار است.

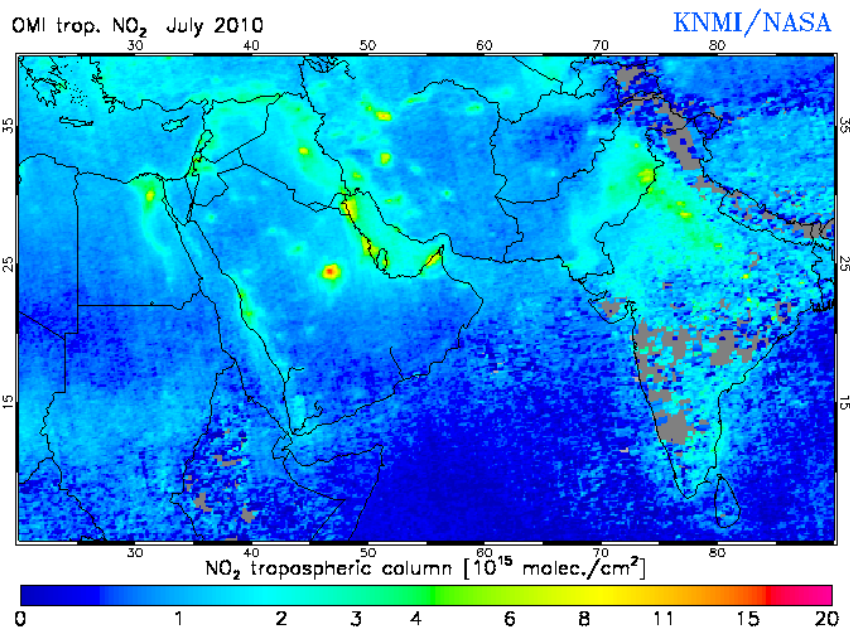
روند تغییرات بلندمدت ۹ ساله (۲۰۰۴-۲۰۱۲) NO₂ تروپوسفری طی ماه پیک دسامبر در مناطقی از ایران که معمولاً بالاترین غلظت‌ها را در نقشه‌ها نشان می‌دهند، بررسی و میانگین بلندمدت هر کدام محاسبه شد. این مناطق در محدوده شهرهای تهران، اصفهان، مشهد، رشت، شیراز، اهواز و تبریز واقع شده‌اند. جدول ۲ میانگین بلندمدت هر یک از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که آلوده‌ترین منطقه تهران است. در این میان، روند تغییرات بلندمدت NO₂ تروپوسفری در محدوده شهرهای تهران، اصفهان و شیراز افزایشی بوده است (از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد). شکل ۱ نمودارها و روابط این روندها را برای شهرهای تهران، اصفهان و مرودشت در شمال شرق شیراز نشان می‌دهد. بقیه مناطق، روند خاصی نداشته‌اند.

همچنین، مقادیر ساعتی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین بررسی، سپس از این داده‌ها مقادیر میانگین ماهانه محاسبه شد. شکل ۹ این مقادیر را برای دسامبر طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دسامبر ۲۰۱۰ شامل کمترین مقدار سرعت باد در این دوره بوده است. بنابراین، در دسامبر ۲۰۱۰ تداوم حضور پشته در ایران همراه پایداری ستون هوا، کاهش سرعت باد و افزایش وارونگی دمای هوای سطحی در افزایش وسعت و غلظت NO₂ تروپوسفری منطقه مؤثر بوده است.

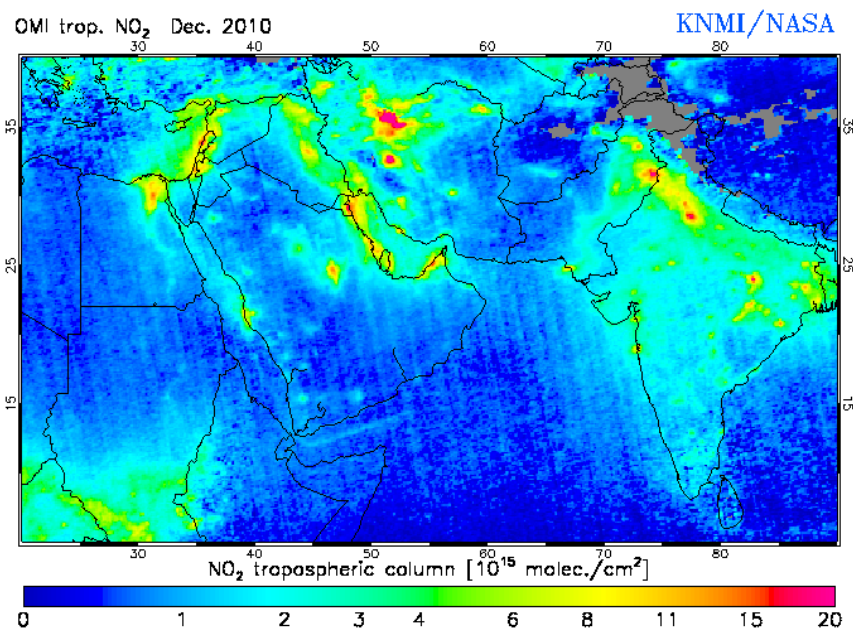
بررسی تغییرات فصلی آلاینده NO₂ نزدیک سطح زمین نشان می‌دهد که معمولاً دو بیشینه طی سال رخ می‌دهد که بیشینه اصلی در زمستان و بیشینه فرعی در تابستان است و در برخی موارد نیز فقط بیشینه زمستانی رخ می‌دهد. مقادیر میانگین ماهانه ستون NO₂ تروپوسفری با مقادیر آلاینده NO₂ نزدیک سطح زمین برای سال‌های مختلف مقایسه شد. نتایج این مقایسه‌ها نشان داد که در برخی موارد، همبستگی خوبی بین آن‌ها برقرار بوده و تغییرات مشابه است، بنابراین لزوماً همیشه تغییرات ستون NO₂

جدول ۲. میانگین بلندمدت (۹ ساله ۲۰۰۴-۲۰۱۲) NO₂ تروپوسفری طی دسامبر در مناطق بیک ایران (واحدها برحسب 10¹⁵ molec/cm² جدول اند)

ایستگاه	تجریش	شاهین شهر	مشهد	رشت	مرودشت	تبریز	اهواز
استان	تهران	اصفهان	خراسان	گیلان	فارس	آذربایجان	خوزستان
NO ₂	۴۰/۲۹	۲۲/۱۸	۹/۶۶	۹/۲۹	۸/۳۱	۶/۴۲	۶/۰۳

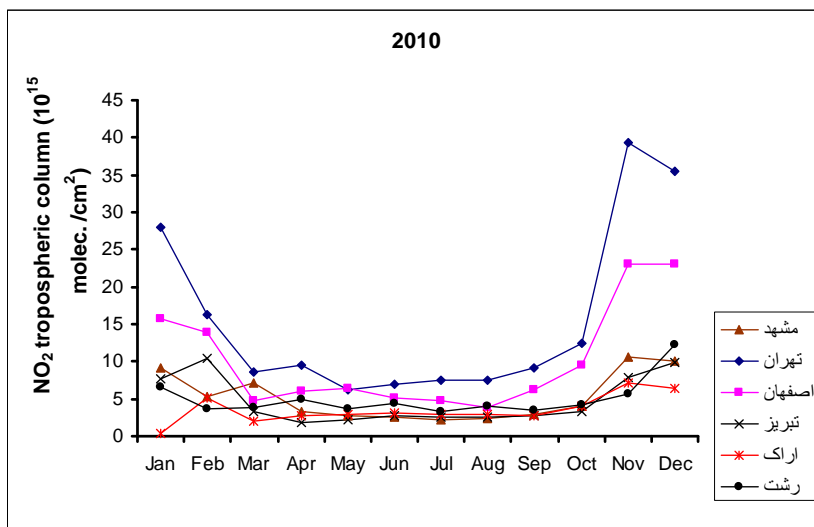


(الف)

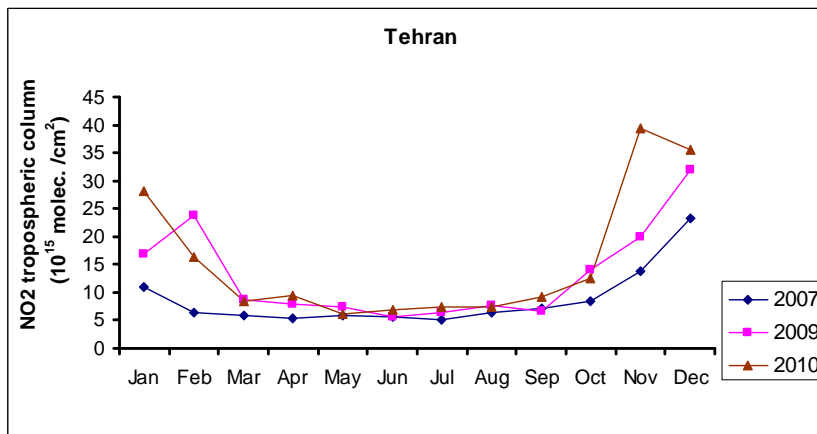


(ب)

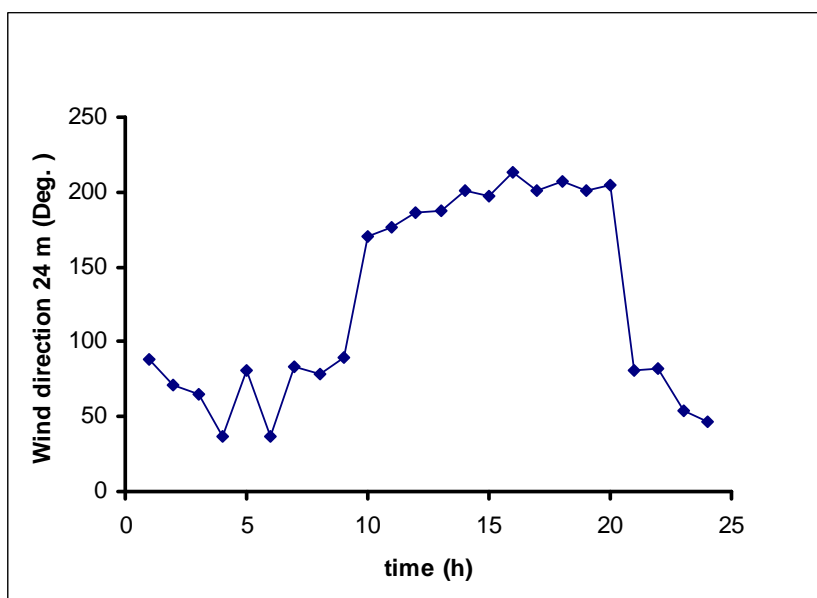
شکل ۳. نقشه‌های میانگین ماهانه توزیع ستون تروپوسفری NO₂ در منطقه خاورمیانه برای ماه‌های الف) جولای و ب) دسامبر سال ۲۰۱۰ (سایت TEMIS)



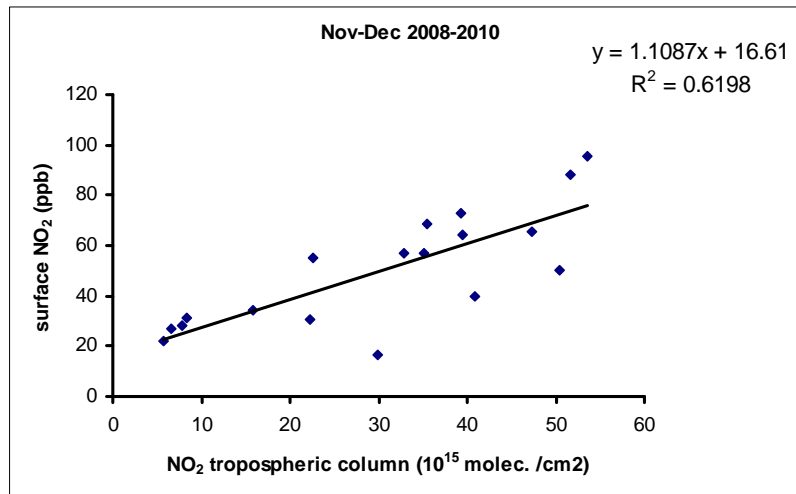
شکل ۴. مقایسه مقادیر میانگین ماهانه ستون تروپوسفری NO_2 برای برخی شهرهای ایران طی سال ۲۰۱۰



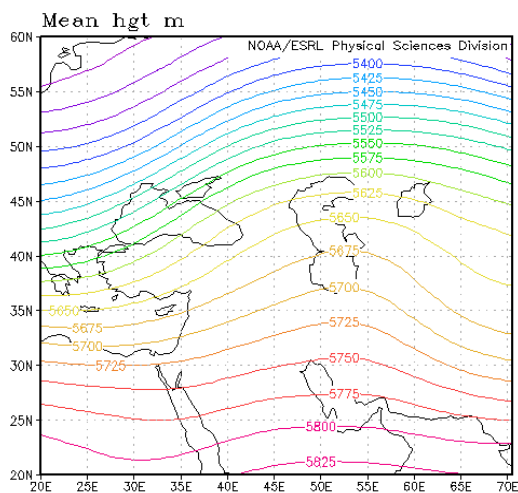
شکل ۵. مقایسه مقادیر میانگین ماهانه ستون تروپوسفری NO_2 در تهران برای سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰



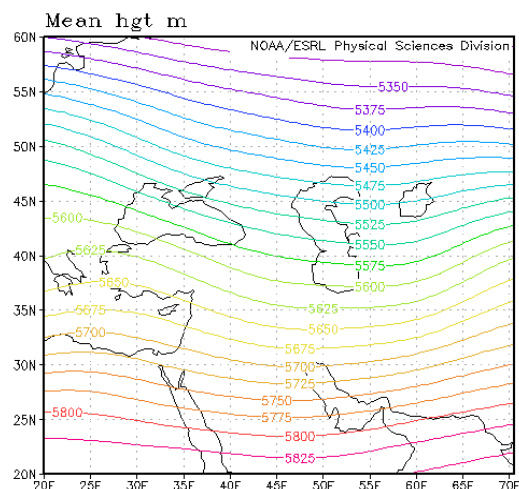
شکل ۶. نمونه الگوی زمستانی جهت باد در ۲۴ متری سطح زمین در ایستگاه برج رسالت در ۲۲ نوامبر ۲۰۱۰



شکل ۷. نمودار و رابطه همبستگی بین مقادیر میانگین ماهانه ستون تروپوسفری و آلاینده NO₂ نزدیک سطح زمین ناشی از ایستگاه‌های واقع در مناطق مختلف ایران طی ماه‌های نوامبر و دسامبر ۲۰۰۸-۲۰۱۰

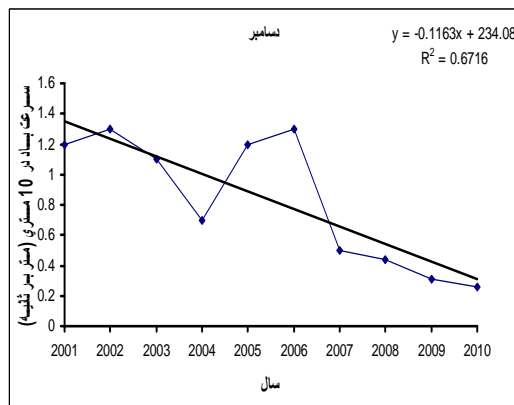


(الف)

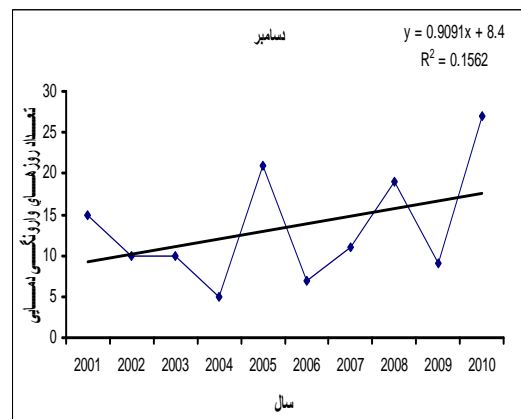


(ب)

شکل ۸. نقشه الگوی میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیلی (برحسب واحد gpm) پشته ۵۰۰ mb طی دسامبر الف) (۲۰۱۰، ب) (۲۰۰۴)

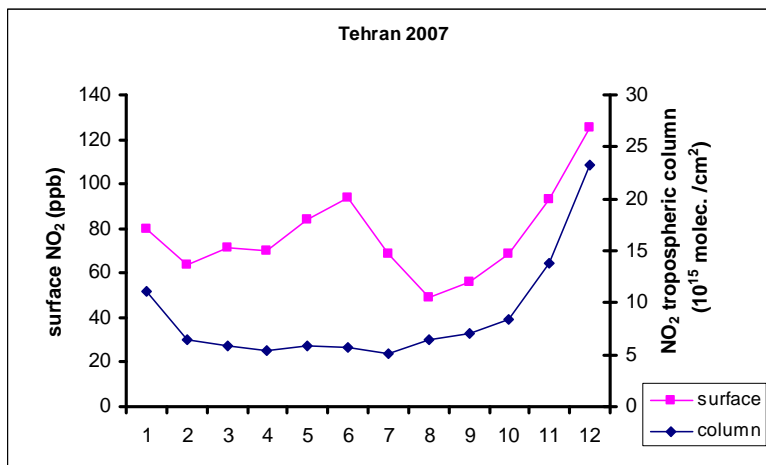


(ب)

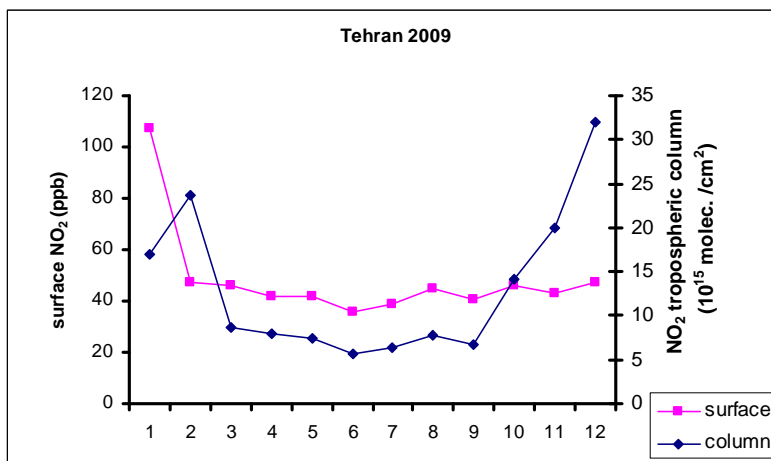


(الف)

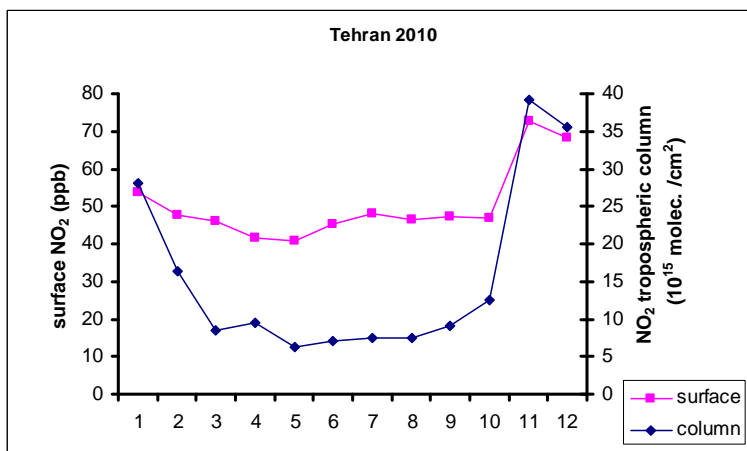
شکل ۹. تغییرات بلندمدت الف) رخداد وارونگی دمای هوای سطحی، ب) سرعت باد ارتفاع ۱۰ متری برای میانگین دسامبر در برج رسالت تهران طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰



(الف)



(ب)

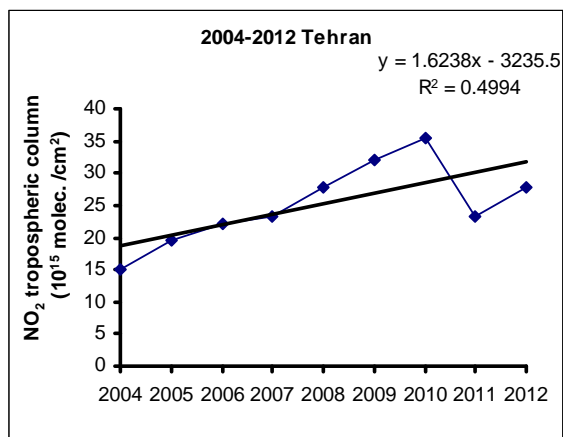


(ج)

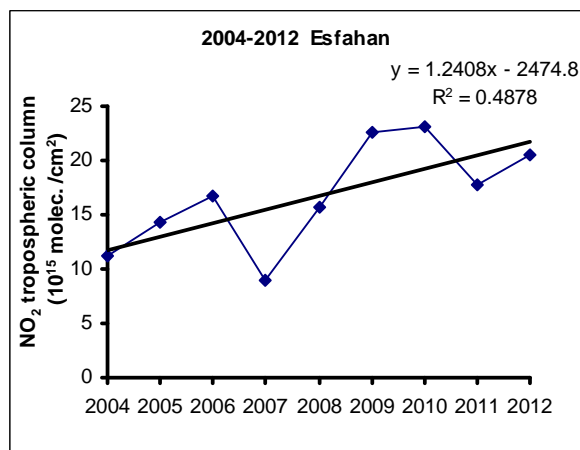
شکل ۱۰. مقایسه مقادیر میانگین ماهانه ستون تروپوسفری و آلاینده NO_2 نزدیک سطح زمین برای سال‌های الف) ۲۰۰۷، ب) ۲۰۰۹ و ج) ۲۰۱۰. محور افقی شماره ماه‌هاست و از ژانویه آغاز می‌شود.

برای تابش خورشیدی و ترغیب بیشتر فرایند فوتوشیمیایی تشکیل ازن، همچنین کاهش غلظت آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن در روز پس از بارش و متعاقباً کاهش تخریب ازن از طریق آن‌ها اشاره کرد.

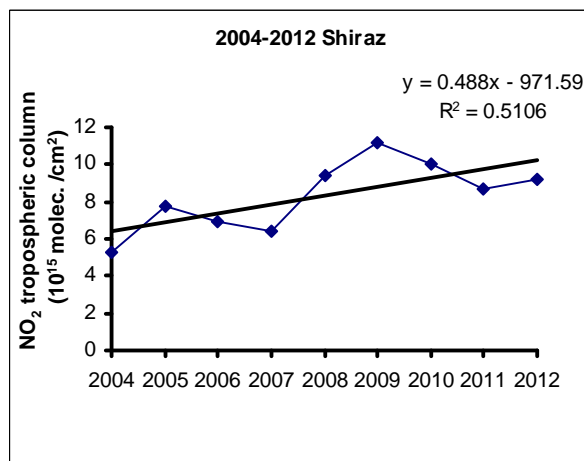
بررسی تأثیر بارش در مقدار آلاینده NO₂ سطحی نشان داده است که در روز بارش غلظت همه آلاینده‌ها کاهش می‌یابد، اما در ۱ تا ۲ روز پس از بارش در حالی که هنوز اکثر آلاینده‌ها غلظت نسبتاً پایینی دارند، غلظت ازن افزایش می‌یابد. از عوامل این پدیده می‌توان به شفاف تر بودن جو



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱. تغییرات بلندمدت میانگین ماهانه ستون NO₂ تروپوسفری در ایستگاه‌های الف) ژئوفیزیک تهران، ب) اصفهان، ج) مرودشت در شمال شرق شیراز طی دسامبر برای سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲

هواشناسی در تغییرات NO₂ تروپوسفری نیز بررسی شده است.

نتایج بررسی‌های تغییرات فصلی NO₂ تروپوسفری نشان می‌دهد که معمولاً بیشینه فصلی در زمستان و کمینه فصلی در تابستان رخ می‌دهد و در فصل سرد نیز بیشینه

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، توزیع زمانی- مکانی NO₂ تروپوسفری در ایران با استفاده از داده‌های ماهواره OMI طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ بررسی و تغییرات NO₂ سطح زمین با NO₂ تروپوسفری مقایسه شده است. همچنین، تأثیر عوامل

مناطق شمال شرق و شمال غرب تهران بسیار آلوده‌تر از جنوب آن است. طی دسامبر ۲۰۱۰، از نظر NO₂ نزدیک سطح زمین، بالاترین غلظت مربوط به ایستگاه اقدسیه با مقدار ۹۵/۴ ppb و کمترین غلظت مربوط به ایستگاه شهرری با مقدار ۳۰/۵ ppb و از نظر NO₂ تروپوسفری، بالاترین غلظت مربوط به ایستگاه اقدسیه به ترتیب با مقادیر $10^{10} \text{ molec/cm}^2 \times 53/51$ و کمترین غلظت مربوط به شهرری با مقدار $10^{10} \text{ molec/cm}^2 \times 22/24$ بوده است. یکی از عوامل مؤثر این امر می‌تواند الگوی باد و وزش بادهای دشت به کوه حاکم بر تهران باشد. با شروع صبح به تدریج وزش باد جنوبی دشت به کوه (آناباتیک) آغاز می‌شود و طی روز، آلاینده NO₂ از بخش‌های جنوبی به شمال شهر انتقال می‌یابد.

مقایسه نقشه‌های توزیع NO₂ تروپوسفری دسامبر سال‌های مختلف نشان می‌دهد که در برخی موارد، مانند سال ۲۰۱۰ لکه‌های آلودگی اصلی مربوط به شهرهای تهران و اصفهان گسترده‌تر می‌شود. به خصوص در مورد تهران، آلودگی در محدوده اطراف از شرق تا آبرسد دماوند و از غرب تا فردیس کرج و از شمال شرق تا نزدیکی جاده چالوس و از شمال غرب تا سد طالقان و از جنوب شرق تا گرمسار گسترده می‌شود. بررسی عوامل هواشناسی مؤثر در این ماه نشان داده که تداوم حضور پشته در سطح mb ۵۰۰ در منطقه ایران همراه پایداری ستون هوا، کاهش سرعت باد و افزایش وارونگی دمای هوای سطحی در افزایش وسعت و غلظت NO₂ تروپوسفری منطقه مؤثر بوده است.

مقایسه مقادیر میانگین ماهانه ستون NO₂ تروپوسفری با مقادیر آلاینده NO₂ نزدیک سطح زمین برای سال‌های مختلف نشان می‌دهد که در برخی موارد، تغییرات مشابه وجود دارد. طی فصل سرد، همبستگی مثبتی بین ستون NO₂ تروپوسفری و نزدیک سطح زمین وجود داشته است و رابطه همبستگی خطی بین این دو طی ماه‌های نوامبر و دسامبر به دست آمد.

ماهانه مربوط به ماه‌های دسامبر و نوامبر است. در ایستگاه ژئوفیزیک تهران، طی سال ۲۰۰۷، بیشینه NO₂ تروپوسفری در دسامبر با مقدار $10^{10} \text{ molec/cm}^2 \times 23/28$ و کمینه NO₂ تروپوسفری در جولای با مقدار $10^{10} \text{ molec/cm}^2 \times 5/06$ رخ داده و میانگین سالانه مقدار $10^{10} \text{ molec/cm}^2 \times 8/7$ محاسبه شده است.

بررسی نقشه‌های میانگین ماهانه توزیع تروپوسفری NO₂ در منطقه خاورمیانه در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که معمولاً مناطق با غلظت بالای ستون تروپوسفری NO₂ مربوط به شهرهای با ترافیک بالای وسایل نقلیه موتوری و فعالیت‌های صنعتی است. از جمله این مناطق می‌توان در ایران به استان‌های تهران و اصفهان و در حاشیه خلیج فارس به کویت، دوبی و بحرین و در عربستان به ریاض اشاره کرد. به طور کلی، مناطقی از ایران که معمولاً بالاترین غلظت‌ها را در نقشه‌ها نشان می‌دهند، در محدوده شهرهای تهران، اصفهان، مشهد، رشت، شیراز، اهواز و تبریز واقع شده‌اند و در این میان، بیشترین آلودگی مربوط به تهران با مقدار میانگین بلندمدت حدود $10^{10} \text{ molec/cm}^2 \times 40$ و کمترین آلودگی مربوط به شهرهای تبریز و اهواز با مقدار میانگین بلندمدت حدود $10^{10} \text{ molec/cm}^2 \times 6$ است. همچنین، در زمستان، اختلاف مقادیر NO₂ تروپوسفری بین این شهرها بیشتر از تابستان است.

به نظر می‌رسد، ترافیک وسایل نقلیه موتوری عامل مهم‌تری نسبت به فعالیت‌های صنعتی در تولید NO₂ تروپوسفری در ایران است و افزایش طول عمر NO₂ در زمستان نسبت به سایر فصول یکی از عوامل شیمیایی بیشینه NO₂ تروپوسفری در فصل سرد است. بررسی روند تغییرات بلندمدت ۹ ساله در شهرهای با غلظت بالای NO₂ تروپوسفری نشان داده است که روند افزایشی در محدوده شهرهای تهران، اصفهان و شیراز مشاهده می‌شود و در سایر مناطق روند خاصی وجود ندارد.

مقایسه منطقه‌ای تهران از نظر NO₂ تروپوسفری و نزدیک سطح زمین طی ماه‌های سرد نشان می‌دهد که

منابع

- شرعی پور، ز. ۱۳۹۱. «بررسی غلظت آلاینده‌ ازن و ارتباط آن با پارامترهای NO_x و دمای هوا»، همایش مدیریت آلودگی هوا و صدا، ۲۷ آذرماه ۱۳۹۱.
- شرعی پور، ز؛ علی‌ اکبری بیدختی، ع. ۱۳۹۱. «بررسی روند تغییرات بلندمدت آلودگی هوا و عوامل هواشناسی مؤثر در آن در شهر تهران (طی دوره ۱۰ ساله)»، همایش ملی جریان و آلودگی هوا، ۲۴-۲۵ آبان‌ ماه ۱۳۹۱.
- شفاعت نظرلو، ع؛ سلطانی، م؛ شاکری، م؛ امیدفر، م. ۱۳۹۱. «مطالعه آثار زیست‌محیطی آلاینده‌های منتشره از نیروگاه حرارتی تبریز (گازهای SO_2 - NO_x)»، همایش ملی جریان و آلودگی هوا، ۲۴-۲۵ آبان‌ ماه ۱۳۹۱.
- Anttila, P., and Tuovinen, J. P. 2010. Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994–2007, *Atmospheric Environment*, 44, 30–41.
- Bucselu, E. J., Perring, A. E., Cohen, R. C., Boersma, K. F., Celarier, E. A., Gleason, J. F., Wenig, M. O., Bertram, T. H., Wooldridge, P. J., Dirksen, R. and Veefkind, J. P. 2008. Comparison of tropospheric NO_2 from in situ aircraft measurements with near-real-time and standard product data from OMI, *Journal of Geophysical Research*, 113, doi:10.1029/2007JD008838.
- Chaloulakou, A., Mavroidis, I., and Gavriil, I. 2008. Compliance with the annual NO_2 air quality standard in Athens. Required NO_x levels and expected health implications, *Atmospheric Environment*, 42, 454–465.
- David, L. M. and Nair, P. R. 2013. Tropospheric column O_3 and NO_2 over the Indian region observed by Ozone Monitoring Instrument (OMI): Seasonal changes and long term trends, *Atmospheric Environment*, 65, 25-39.
- Ghude, S. D., Van der A, R. J., Beig, G., Fadnavis, S. and Polade, S. D. 2009. Satellite derived trends in NO_2 over the major global hotspot regions during the past decade and their inter-comparison, *Environmental Pollution*, 157, 1873-1878.
- Lamsal, L. N., Martin, R. V., van Donkelaar, A., Steinbacher, M., Celarier, E. A., Bucselu, E., Dunlea, E. J. and Pinto, J. P. 2008. Ground-level nitrogen dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument, *Journal of Geophysical Research*, 113, DOI: 10.1029/2007JD009235.
- Mavroidis, I. and Iliu, M. 2012. Trends of NO_x , NO_2 and O_3 concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece, *Atmospheric Environment*, 63, 135–147.
- Shon, Z. H., Kim, K. H., and Song, S. K. 2011. Long-term trend in NO_2 and NO_x levels and their emission ratio in relation to road traffic activities in East Asia, *Atmospheric Environment*, 45, 3120–3131.
- Sun, Y., Wang, L., Wang, Y., Quan, L., and Zirui, L. 2011. In situ measurements of SO_2 , NO_x , NO_y , and O_3 in Beijing, China during August 2008, *Science of the Total Environment*, 409, 933–940.
- van der A, R.J., Peters, D.H.M.U., Eskes, H.J., Boersma, K.F., Van Roozendaal, M., De Smedt, I. and Kelder, H.M. 2006. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO_2 over China. *J. Geophys. Res.*, 111, D12317, doi:10.1029/2005JD006594.
- Wallace, J. and Kanaroglou, P. 2009. The sensitivity of OMI-derived nitrogen dioxide to boundary layer temperature inversions, *Atmospheric Environment*, 43, 3596–3604.
- Zhang, R., Tie, X., and Bond, D. W. 2003. Impacts of anthropogenic and natural NO_x sources over the U.S. on tropospheric chemistry, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 100, 1505-1509.
- Zhang, X. Y., Zhang P., Zhang, Y., Li, X. J. and Qiu, H. 2007. The trend, seasonal cycle, and sources of tropospheric NO_2 over China during 1997–2006 based on satellite measurement, *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50, 1877-1884 .
- Zhou, Y., Brunner, D., Hueglin, C., Henne, S. and Staehelin, J. 2012. Changes in OMI tropospheric NO_2 columns over Europe from 2004 to 2009 and the influence of meteorological variability, *Atmospheric Environment*, 46, 482-495.