

توزیع زمانی - فضایی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در ایران با استفاده از داده‌های سنجنده OMI

کوهزاد رئیس پور^{۱*}

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(تاریخ دریافت ۰۴/۲۷/۰۰ - تاریخ پذیرش ۰۴/۱۲/۰۰)

چکیده:

آلودگی هوا از مهم‌ترین موضوعات مرتبط با اقلیم است. امروزه به دلیل استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی، غلظت آلاینده‌های هوا به ویژه دی‌اکسید نیتروژن (NO₂) افزایش یافته که سبب بروز مشکلات عدیده‌ای برای سلامت انسان شده است. در این پژوهش توزیع زمانی - فضایی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در ایران با استفاده از داده‌های سنجنده OMI طی دوره آماری (۲۰۲۰ - ۲۰۰۵) بررسی شد. در آنالیز بلندمدت تراکم ستون NO₂ تروپوسفری، میانگین NO₂ 1.57e+15 molec/cm² برآورد شد که بیشترین مقدار آن بر فراز شهر تهران (1.5e+16 molec/cm²) و کمترین مقدار آن در نواحی برون شهری (1.e+14 molec/cm²) مشاهده شد. افزون بر کلانشهر تهران، شهرهای اصفهان، اهواز، شیراز، تبریز، رشت، ساری، مشهد، قم، قزوین و نواحی صنعتی سواحل جنوب از غلظت زیادی برخوردار بودند. آنالیز حاصل از بررسی سری زمانی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در طول ۵۸۲۳ روز متوالی (۲۰۲۰ - ۲۰۰۵)، حاکی از روند افزایشی NO₂ در گستره تروپوسفر ایران است، به طوری که میانگین آن از 1.36e+15 molec/cm² در سال ۲۰۰۵ به 1.78e+15 molec/cm² در سال ۲۰۲۰ رسیده است. نتایج بررسی پراکنش فصلی نشان داد که بیشینه و کمینه NO₂ به ترتیب در فصول زمستان (1.57e+15 molec/cm²) و تابستان (1.31e+15 molec/cm²) رخ می‌دهد. از سوی دیگر ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه از بیشترین، و ماه‌های ژوئن، ژولای و آگوست از کمترین پراکنش ماهانه برخوردار بوده‌اند. غلظت بیشتر NO₂ در دوره سرد سال به دلیل فعال تر بودن کانون‌های انتشار از یک سو و شرایط هواشناسی حاکم در این دوره از سال از سوی دیگر است. همچنین با توجه به روند افزایشی آلاینده NO₂ اثرهای زیانبار آن در آینده تشدید خواهد شد. بنابراین باید قبل از افزایش بیشتر، اقدامات پیشگیرانه توسط مسئولان صورت گیرد.

کلید واژگان: آلودگی هوا، ایران، تروپوسفر، دی‌اکسید نیتروژن، سنجنده OMI

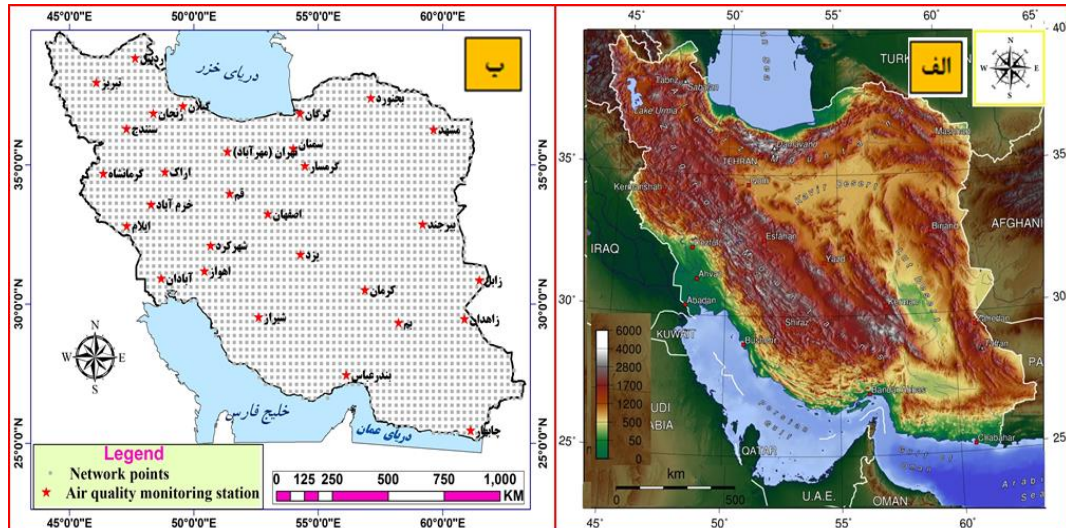
۱. مقدمه

Zhang *et al.*, 2018). از مهم‌ترین منابع انتشار NO_2 می‌توان به وسایط نقلیه، سامانه‌های گرمایش، نیروگاه‌های برق، سوخت‌های فسیلی، دیگ‌های بخار صنعتی، زباله‌سوزها، وسایل گرمایشی، رعدوبرق و آتشفشان‌ها اشاره کرد (Shon *et al.*, 2019a; Goldberg *et al.*, 2011). غلظت NO_2 در طول شبانه‌روز متغیر بوده و منبع اصلی آئروسول‌های نیترات است که بخش مهمی از ذرات $\text{PM}_{2.5}$ را تشکیل می‌دهد (Zhang *et al.*, 2017). در پژوهش‌های متعددی از NO_2 به‌عنوان نشانگر برای آلاینده‌های مرتبط با احتراق (ترافیک جاده‌ای و احتراق خانگی) استفاده شده است (Zhang *et al.*, 2012; Mavroidis and Iliia, 2003). تحقیقات اپیدمیولوژی نشان داده‌اند که مواجهه با NO_2 با علائم برونشیت در کودکان آسمی و کاهش عملکرد ریه در ارتباط است (Dehghani, 2008). در صورتی که غلظت NO_2 حتی در مدت کوتاهی از $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ فراتر رود، این آلاینده مانند گاز سمی عمل می‌کند و سبب التهاب چشمگیری در مسیرهای هوایی می‌شود (Omidvar, 2018). افزون‌بر این، NO_2 با آمونیاک، رطوبت و ترکیبات دیگر به‌شکل ذرات کوچک واکنش نشان می‌دهد و با نفوذ در عمق ریه سبب ایجاد یا تشدید بیماری‌های تنفسی می‌شود (Mansouri, 2011; Javanbakht, 2012; Amiri and Khatami, 2012). شواهد علمی نشان داده است که تغییرات بافت کلیه، کبد و قلب، کاهش وزن، حساسیت در برابر باکتری‌ها و عفونت‌های ویروسی از دیگر اثرهای این آلاینده است (Nemery *et al.*, 2001). در ترکیب با هیدروکسید به‌صورت باران اسیدی بر زمین می‌بارد (Hosseiniabadi, 2014). این گاز اثر مهمی در

در روند پیشرفت و اجرای برنامه‌های توسعه صنعتی، ترکیباتی زبان‌آور به محیط زیست رها می‌شود که تأثیرات بسیار نامطلوبی برجا می‌گذارد (Schneider *et al.*, 2017; Paraschiv *et al.*, 2015). پدیده آلودگی هوا یکی از پیامدهای توسعه صنعتی است که با مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی روزبه‌روز بر شدت آن افزوده می‌شود (Kononov *et al.*, 2013; Bechle *et al.*, 2016). این پدیده از مهم‌ترین موضوعاتی است که همواره در ارتباط با اقلیم مطرح است و از جنبه‌های مختلف مورد توجه پژوهشگران پرشماری در جهان قرار گرفته است. آلودگی هوا عبارت است از وجود یک یا چند آلاینده در هوای آزاد به مقدار و مدتی که کیفیت آن را چنان تغییر دهد که مضر به حال انسان و سایر موجودات زنده باشد (Anttila and Tuovinen, 2010). آژانس‌های حفاظت محیط زیست، پنج آلاینده اصلی شامل مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5,10}$)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و اُزن (O_3) را به‌عنوان آلاینده‌های معیار انتخاب کرده و برای آنها استانداردهای ملی وضع کرده‌اند (عرفان‌منش و افیونی، ۱۳۹۴). در میان هفت نوع اکسید نیتروژن موجود در هوای آزاد، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) قابلیت بیشتری در واکنش‌های اسماگ فتوشیمیایی داشته و بیشترین غلظت را در هوای آزاد دارد (Chaloulakou *et al.*, 2008; Sabziparvar and Helali, 2015). NO_2 به رنگ قرمز مایل به نارنجی و دارای نقطه جوش $21/1$ درجه سانتی‌گراد و فشار جزئی کم است که سمیت آن چندبرابر NO است (Sun *et al.*, 2011; Ghiasuddin, 2017).

به منظور داده برداری از چند گاز مهم از جمله NO₂ در جولای ۲۰۰۴ روی ماهواره Aura ناسا قرار گرفت، مبنای پژوهش‌های پرشماری در جهان شد. بررسی روند NO₂ اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI و داده‌های سازمان کیفیت هوا در ایالات متحده (۲۰۱۳ - ۲۰۰۵) بیانگر روند کاهشی NO₂ بوده است (Lamsal et al., 2015). همچنین استفاده از داده‌های این سنجنده نشان داد که مقدار NO₂ در کشورهای در حال توسعه در حال افزایش است و عامل مهم در روند افزایش NO₂ در کشورهای خاورمیانه مصرف سوخت‌های فسیلی است (Ghude et al., 2009). در تحقیقی دیگر دربارهٔ روند بلندمدت تغییرات NO₂ در اروپا با استفاده از داده‌های سنجنده OMI، نتایج حاکی از کاهش NO₂ در غرب اروپا بوده است (Zhou et al., 2012). با استفاده از داده‌های همین سنجنده، روند NO₂ طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ برای شهرهای بزرگ جهان بررسی شد و نتایج نشان داد که مقدار NO₂ در اروپا و آمریکای شمالی کاهش و در آسیا، آفریقا و کشورهای خاورمیانه افزایش یافته است (Schneider et al., 2015). مقایسهٔ داده‌های NO₂ سنجنده OMI و اندازه‌گیری‌های انجام گرفته توسط هواپیماها ارتباط معناداری بین دو نوع داده نشان داد (Bucselo et al., 2008). غلظت NO₂ به لحاظ اهمیت برای محیط‌های شهری در بسیاری از تحقیقات بررسی شده است (Lu et al., 2015; Kim et al., 2016; Judd et al., 2019). توزیع مکانی- زمانی NO₂ در هند (David and Nair, 2013)، بررسی تغییرات NO₂ تروپوسفری در آمریکای شمالی (Laughner et al., 2019) و بررسی حساسیت داده‌های NO₂ سنجنده OMI به

شیمی جو و به‌ویژه آلودگی هوا دارد (Arvin, Kuhlmann et al., 2016; Miri et al., 2016) و پیش‌نشانگر پدیدهٔ اسماگ محسوب می‌شود (Kuhlmann et al., 2016; Duncan et al., 2016). همچنین NO₂ می‌تواند با واداشتهای تابشی توازن تابشی زمین را از طریق شیمی آزن تروپوسفری و طول عمر متان تغییر دهد (Martins et al., 2016). سال‌های متمادی روش‌های آزمایشگاهی تنها روش‌های معمول برای تعیین مقدار آلاینده‌های هوا در اتمسفر بودند. اما به دلیل پیشرفت‌های خیره‌کنندهٔ اخیر در زمینهٔ کنترل آلودگی هوا و تقاضا برای پایش هوا در مقیاس کلان، این روش‌ها نمی‌توانند جوابگو باشند (Erfan Manesh and Afuoni, 2000). از سوی دیگر نیاز روزافزون به تحلیل پیوسته یا لحظه‌ای ترکیبات هوا در مکان‌های دور را نمی‌توان با فرایندهای شیمیایی معمول در آزمایشگاه‌ها پاسخ داد. نیاز به طراحی تجهیزات پایش مداوم آلاینده‌های هوا، زمینهٔ ورود فناوری سنسجش از دور را به این عرصه فراهم کرد (Abel et al., 2019). در حال حاضر از میان ماهواره‌های پایشگر آلایندهٔ NO₂ اتمسفری با پوشش جهانی، می‌توان به ماهوارهٔ Metop-A (سنجنده‌های GOME-2 و IASI)، ماهوارهٔ SNPP (سنجندهٔ OMPS)، ماهوارهٔ OSIR (سنجندهٔ Envisat)، ماهوارهٔ SCIAMACHY (سنجندهٔ GOSAT)، ماهوارهٔ TANSO (سنجنده‌های AURA) و ماهوارهٔ OMI اشاره کرد. در این میان استفاده از داده‌های سنجندهٔ OMI به دلیل تفکیک طیفی، زمانی و مکانی زیاد و همچنین کالیبراسیون بهینه در مقایسه با ابزار مشابه توصیه شده است (Herman et al., 2019; Hovila et al., 2018). این سنجنده که



شکل ۱- الف: مدل رقومی ارتفاع و ب: نقاط شبکه بندی شده ی سنجنده ی OMI با قدرت تفکیک مکانی 0.25×0.25 در ایران

به برآورد زمانی- مکانی تراکم ستون NO_2 تروپوسفری با استفاده از برون داد سنجنده OMI ماهواره Aura (۲۰۲۰ - ۲۰۰۵) در ایران پرداخته شد تا با شناختی جامع از پراکنش این آلاینده، سیاستگذاری های ضروری منجر به کاهش آن در راستای مدیریت محیطی مناطق با غلظت زیاد اتخاذ شود.

۲. مواد و روش ها

ماهواره خورشیدآهنگ Aura با حمایت مؤسسه هلندی و سازمان هواشناسی فنلاند در جولای ۲۰۰۴ در مدار قرار گرفت (Levelt *et al.*, 2018). سنجنده OMI یا ابزار پایش ازن، یکی از چهار سنجنده مستقر روی ماهواره Aura است (Pitkanen *et al.*, 2015; Qin *et al.*, 2019) که در کنار این سنجنده ها به بررسی آلودگی هوا (NO_2 , CH_4 , SO_2 , CO , O_3 , UV,) لایه ازن و اقلیم می پردازد (Sharma *et al.*, 2012). استفاده از محصولات NO_2 سنجنده OMI، مبنای پژوهش های پرشماری در جهان در راستای پایش آلاینده NO_2 جوی قرار گرفته است که از جدیدترین آنها می توان

پدیده وارونگی دمایی در نواحی صنعتی کانادا (Wallace and Kanaroglou, 2009) از دیگر پژوهش های مبتنی بر داده های NO_2 سنجنده OMI در جهان است. در ایران نیز NO_2 تروپوسفری از زوایای گوناگون توسط برخی پژوهشگران بررسی شده است؛ از جمله بررسی وضعیت NO_2 تروپوسفری ایران طی سال های ۲۰۱۲ - ۲۰۰۴ (Sharipour and Ali Akbari Beidokhti, 2014)، برآورد مرگومیر ناشی از آلاینده NO_2 تروپوسفری در شهر همدان (Lily *et al.*, 2016)، بررسی رفتار و روند NO_2 هوای تهران با استفاده از داده های سنجنده OMI (Shah Mohammadi *et al.*, 2017)، پهنه بندی NO_2 جوی در شهر تهران با استفاده از داده های سنجنده OMI و MODIS (Ahmadian *et al.*, 2018) و بررسی رفتار NO_2 در مشهد و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی (Shah Mohammadi *et al.*, 2020). نتایج برخی از این پژوهش ها نشان داد که سطح انتشار آلاینده NO_2 در برخی از کلانشهرهای ایران خطرناک است (Ajimi, 2015). بر همین اساس در تحقیق حاضر

جدول ۱- پایش تراکم ستون NO₂ تروپوسفری (molec/cm²) در ایران (۲۰۲۰ - ۲۰۰۵)

ردیف	متغیر	مقدار (molec/cm ²)
۱	میانگین تراکم ستون NO ₂ تروپوسفری	1.57e+15
۲	بیشینه تراکم ستون NO ₂ تروپوسفری	3.38e+15
۳	کمینه تراکم ستون NO ₂ تروپوسفری	0.57e+15
۴	میانه تراکم ستون NO ₂ تروپوسفری	1.30e+15
۵	انحراف معیار تراکم ستون NO ₂ تروپوسفری	1.32e+15

امکانات نرم افزارهای فوق با اعمال الگوریتم های لازم، به داده های شبکه ای (رستری) و جدول های اطلاعاتی تبدیل شد و خروجی های لازم براساس مرز جغرافیایی ایران تهیه شد. به طور کلی مقادیر NO₂ ماهانه از میانگین مقادیر NO₂ روزانه (ساعت ۱۳:۱۵ به وقت محلی) متعلق به هر ماه و میانگین فصلی از میانگین سه ماه مربوط به هر فصل برای تروپوسفر ایران استخراج شد. به لحاظ مکانی نیز مقادیر هر پیکسل شرایط میانگین مقدار تراکم ستون NO₂ تروپوسفری (ماهانه، فصلی و سالانه) در طول سری زمانی است. در نهایت، برای درک هرچه بهتر توزیع زمانی- مکانی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در جو ایران، نتایج به صورت گرافیکی (نقشه، گراف و نمودار) ارائه و واکاوی شد.

۱-۲. صحت سنجی داده ها

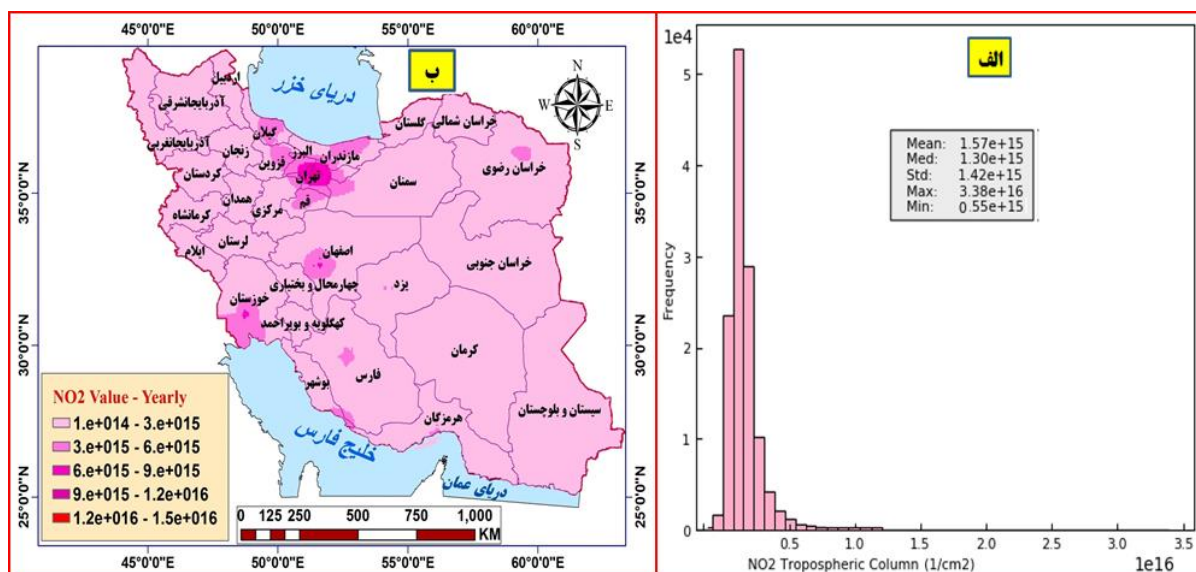
یکی از مهم ترین الزامات قبل از ارائه یافته های حاصل از به کارگیری داده های ماهواره ای، صحت سنجی این داده هاست. در این پژوهش نیز برای بررسی صحت داده های تراکم ستون NO₂ تروپوسفری سنجنده OMI ماهواره AURA از داده های مشاهده ای مقادیر NO₂ ۳۰ ایستگاه پایش کیفیت هوا (وابسته به سامانه پایش کیفی هوای ایران) که اغلب در مراکز استانی مستقرند و به طور نسبی پوشش مناسبی از کل کشور فراهم می کنند استفاده شد (شکل ۱ ب). در گام بعدی مقادیر تراکم ستون NO₂ تروپوسفری مربوط به پیکسل هایی (۳۰

پژوهش های (Vasilkov *et al.*, 2017; Zara *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019; Laughner *et al.*, 2019; Krotkov *et al.*, 2019; Goldberg *et al.*, 2019b; Wang and Wang, 2020; JamaLi *et al.*, 2020; Lamsal *et al.*, 2021) را نام برد.

در این تحقیق نیز از محصولات سطح ۳ (NO₂ Tropospheric Column - OMNO₂d-L3) تراکم ستون NO₂ تروپوسفری سنجنده OMI با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی برای سری زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ استفاده شد (Aissa *et al.*, 2016). این داده ها برآوردی از تعداد مولکول های NO₂ در یک ستون جوی از سطح زمین تا قله تروپوسفر است که ۲۰۰ hpa فرض شده و برحسب واحد مولکول بر سانتی متر مربع (molec/cm²) بیان می شود. داده های مورد نیاز با تفکیک زمانی روزانه از تارنمای

<https://Aura.gsfc.nasa.gov/omi.htm>

استخراج و پس از اعمال پردازش های لازم توسط نرم افزارهای تخصصی (ENVI, ArcGIS) و EXCEL) به مقادیر ماهانه و فصلی تبدیل شد. تعداد یاخته های با تفکیک مکانی فوق برای سنجنده OMI در ایران ۲۶۳۷ یاخته است (شکل ۱ ب). بر این اساس، ابعاد آرایه های ایجاد شده به ترتیب ۱۹۲ × ۲۶۳۷ برای ماه ها و ۶۴ × ۲۶۳۷ برای فصول سال در دامنه زمانی سال های ۲۰۲۰ - ۲۰۰۵ است. داده های استفاده شده به صورت رقومی است و مقدار NO₂ ارزش عددی به ازای هر پیکسل است که با استفاده از



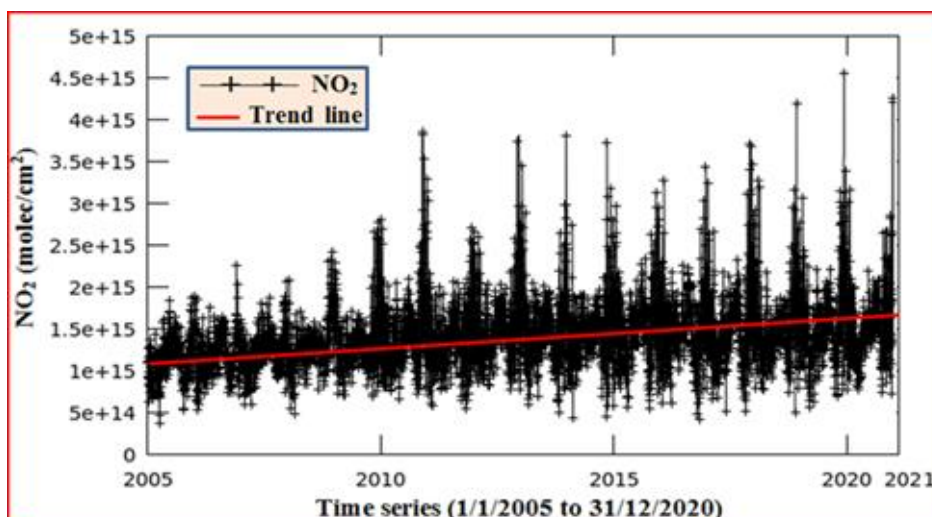
شکل ۲- الف) توصیف آماری تراکم ستون NO₂ تروپوسفری بر فراز یاخته‌های با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه؛ ب) میانگین بلندمدت NO₂ ستون تروپوسفری در پهنه ایران در طی سال‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۰۵

نوامبر) است. به لحاظ ماهانه نیز کمترین اختلاف با ۱/۴ درصد (بیش‌برآوردی) مربوط به ماه ژانویه و بیشترین اختلاف با ۷/۲ درصد (بیش‌برآوردی) در ماه سپتامبر برآورد شد. همچنین برآورد همبستگی داده‌ها براساس ضریب همبستگی پیرسون (Rp) نشان داد که مقدار همبستگی بین مقادیر NO₂ برآوردشده توسط سنجنده OMI و ایستگاه‌های پایش کیفی هوای انتخابی، در مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه از ۰/۸۴ تا ۰/۹۷ درصد متغیر بوده که بیانگر همبستگی زیاد تا بسیار زیاد است.

۲-۲. منطقه پژوهش

ایران در مختصات جغرافیایی ۲۵° تا ۴۰° درجه عرض شمالی و ۴۴° تا ۶۴° درجه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱ الف) و دارای اقلیم‌های مختلفی از جمله اقلیم معتدل و مرطوب (ناحیه ساحلی دریای خزر)، اقلیم سرد کوهستانی (غرب)، اقلیم گرم و خشک (فلات مرکزی) و اقلیم گرم و مرطوب (سواحل جنوبی) است (Masoudian, 2017). میانگین ارتفاعی در ایران ۱۲۰۰ متر است که

پیکسل و هر پیکسل با ابعاد تقریبی ۲۵ در ۲۵ کیلومتر) که ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا روی آنها قرار می‌گرفتند برآورد شد و مقادیر اختلاف و همبستگی بین دو پایگاه داده، در مقیاس سالانه فصلی و ماهانه محاسبه شد. یافته‌ها نشان داد که مقادیر بلندمدت تراکم ستون NO₂ تروپوسفری برآوردشده توسط سنجنده OMI در گستره ایران ۳/۷ درصد بیش از (بیش‌برآوردی) مقادیر NO₂ حاصل از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های انتخابی پایش کیفیت هواست. به لحاظ فصلی نیز مقادیر NO₂ برآوردشده توسط سنجنده استفاده‌شده، در فصل تابستان (ژوئن، ژولای و آگوست) ۱/۴ درصد کمتر از برآورد NO₂ ایستگاه‌های پایش کیفیت هواست، اما در فصل‌های دیگر (زمستان، بهار و پاییز) سنجنده NO₂ برآورد بیشتری را نشان داده است. در این میان کمترین اختلاف (بیش‌برآوردی) با ۱/۶ درصد مربوط به فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) و بیشترین اختلاف (بیش‌برآوردی) با مقدار ۵/۸ درصد مربوط به فصل پاییز (سپتامبر، اکتبر و



شکل ۳- نمودار سری زمانی میانگین روزانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری طی ۵۸۲۳ روز متوالی (۲۰۰۵-۲۰۲۰) در ایران

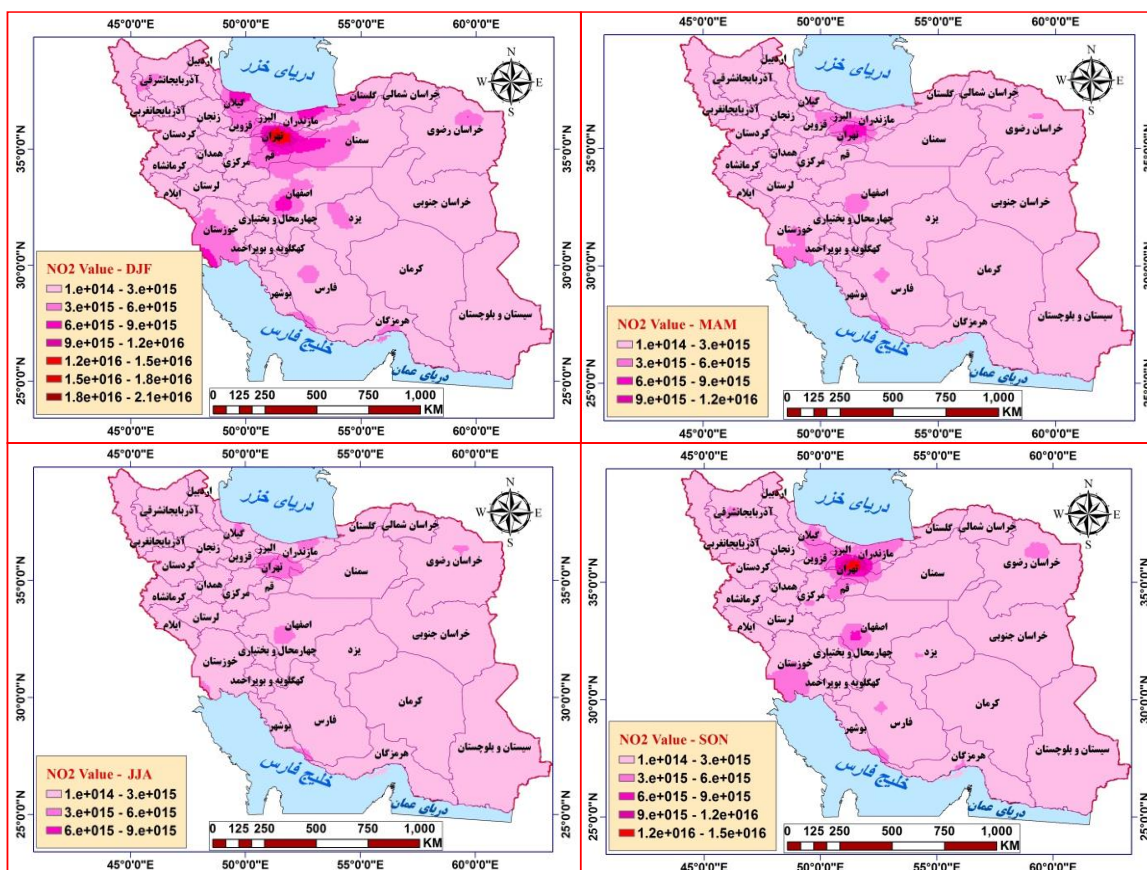
NO₂ با $2.50e+16 \text{ molec/cm}^2$ مربوط به شهر تهران است که انتشار آن تا شعاع چند کیلومتری گسترش یافته است (شکل ۲ ب). تهران با مساحت تقریبی ۸۰۰ کیلومتر مربع در دامنه جنوبی کوه‌های البرز واقع شده و براساس پژوهش‌ها و گزارش‌ها از آلوده‌ترین شهرهای جهان است. در این شهر تراکم ستون NO₂ تروپوسفری شایان توجه است. می‌توان گفت عوامل متعددی در افزایش غلظت NO₂ بر فراز این شهر دخالت دارند که به نظر می‌رسد از میان آنها عوامل جغرافیایی از اهمیت بیشتری برخوردارند. شهر تهران در محیطی نیمه‌محصور در دامنه جنوبی ارتفاعات البرز واقع شده است. این موضوع سبب می‌شود که کوه‌های البرز در شمال و شرق آن همانند سدی از گذر بادهای غربی جلوگیری کنند و شرایط را برای ماندگاری و تداوم NO₂ تروپوسفری فراهم آورند. از جهتی دیگر حاکمیت شرایط وارونگی دما (اینورژن) و استقرار مداوم سیستم‌های پرفشار در برخی روزها (به‌خصوص در دوره سرد سال)، از دیگر ویژگی‌های اقلیمی منطقه است که شرایط را برای تشدید آلودگی هوای شهر تهران و نواحی پیرامونی فراهم می‌آورد. افزون بر عوامل طبیعی مطرح‌شده،

پایین‌ترین ارتفاع آن نقطه‌ای در دشت لوت با ارتفاع ۵۶ متر پایین‌تر از سطح دریا و مرتفع‌ترین نقطه آن در ارتفاع ۵۶۱۰ متری در قله دماوند است (Samadzadeh, 2019). میانگین بارندگی در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که از توزیع ناهمگن زمانی و مکانی برخوردار است (Alijani, 2019).

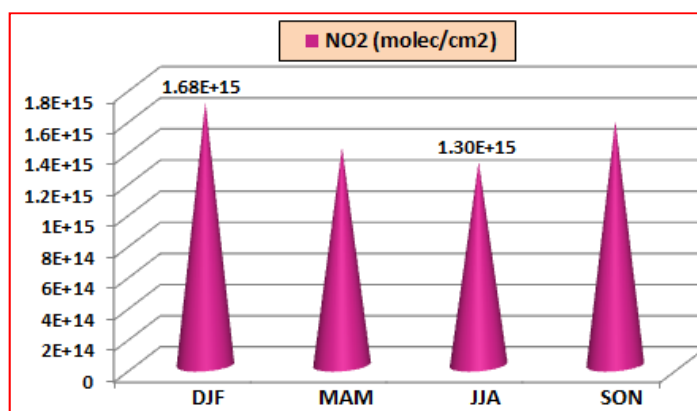
۳. نتایج

۳-۱. برآورد بلندمدت

برخی از پارامترهای آمار توصیفی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری ایران (۲۰۰۵ - ۲۰۲۰) در جدول ۱ و شکل ۲ الف آمده است. براساس این جدول میانگین تراکم ستون NO₂ تروپوسفری ایران $1.57e+15 \text{ molec/cm}^2$ و بیشترین و کمترین مقدار برآوردشده به ترتیب $3.38e+15 \text{ molec/cm}^2$ و $0.32e+15 \text{ molec/cm}^2$ با انحراف معیار $1.32e+15 \text{ molec/cm}^2$ بوده است. به لحاظ پراکنش مکانی نیز بیشترین تراکم ستون NO₂ تروپوسفری بر فراز شهرهای تهران، اصفهان، اهواز، شیراز، رشت، ساری، مشهد، قم، قزوین و بخش صنعتی استان بوشهر حاکم است. در این میان بیشترین میانگین غلظت



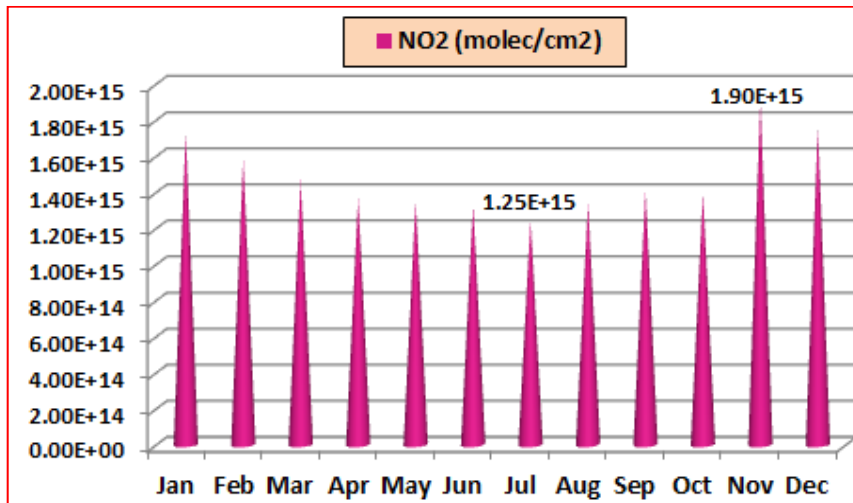
شکل ۴- توزیع فضایی میانگین فصلی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در گستره ایران در طی دوره آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۵)



شکل ۵- توزیع آماری میانگین فصلی ستون NO₂ تروپوسفری در گستره ایران در طی دوره آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۵)

شرایط مناسب آب‌وهوایی و توسعه به نسبت مطلوب زیرساختی از تراکم زیاد جمعیت برخوردارند. از جهتی دیگر، قرار گرفتن این شهرها در ردیف مناطق هدف گردشگری، حجم زیاد ترافیک را در پی دارد که زمینه‌ساز افزایش NO₂ در این ناحیه می‌شود. دیگر شهرهای اشاره شده نیز به دلیل صنعتی بودن، تراکم جمعیت، ترافیک زیاد، ناوگان فرسوده و ... غلظت به نسبت زیادی از NO₂ را در طول سال

عوامل انسانی مانند تمرکز زیاد جمعیت، تعداد زیاد خودروها (اغلب فرسوده) و ترافیک زیاد، استقرار کارخانه‌ها و صنایع در شهر به ویژه در غرب و جنوب غرب، بر آلودگی هوای شهر تهران می‌افزاید و تراکم ستون NO₂ تروپوسفری را به شدت افزایش می‌دهد. در مراتب بعدی، کلانشهرهای اصفهان و مشهد و شهرهای واقع در ناحیه ساحلی شمال ایران (استان‌های مازندران و گیلان) به علت برخورداری از



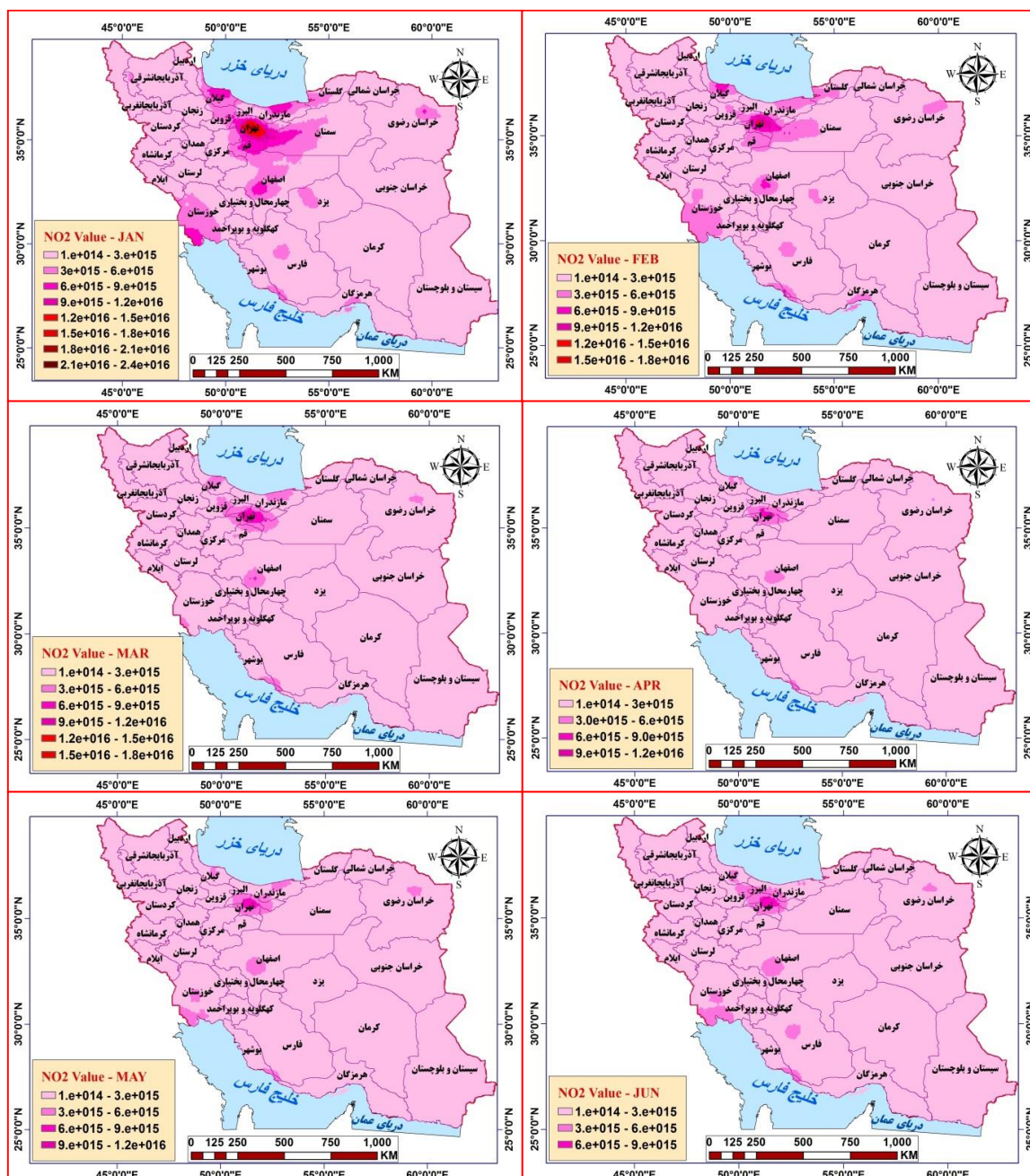
شکل ۶- توزیع آماری میانگین ماهانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در گستره ایران در طی دوره آماری (۲۰۰۵-۲۰۲۰)

ترافیک و ارتقای سیستم‌های گرمایشی، از پراکنش مونوکسید کربن تا حد زیادی کاسته شده است (Raispour and Khosravi, 2020). ولی در مورد NO₂ نه تنها مشکل کم نشده، بلکه وضعیت از قبل هم بدتر شده است. نگاهی به آخرین وضعیت نیروگاه‌های حرارتی کشور (به استناد گزارش‌های وزارت نیرو) حاکی از آن است که تاکنون (سال ۲۰۱۹) ۵۸۳ واحد تولید برق حرارتی در ۱۲۹ نیروگاه کشور احداث شده که بیانگر رشد بیست‌برابری تولید برق در مقایسه با سال ۲۰۰۵ است. سوخت مصرفی اغلب این نیروگاه‌ها زغال سنگ، مازوت و گازوئیل است که از عوامل اصلی انتشار NO₂ هستند. بنابراین روند رو به رشد تعداد نیروگاه‌های برق و تولید برق از یک سو و افزایش وسایط نقلیه، سیستم‌های گرمایشی، دیگ‌های بخار صنعتی، زباله‌سوزها و ... از سوی دیگر از جمله دلایل افزایش گاز NO₂ طی سال‌های اخیر در ایران است.

۲-۳. برآورد فصلی

آنالیز خروجی‌های مربوط به میانگین فصلی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری (۲۰۰۵-۲۰۲۰) برای فصول بهار (MAM)، تابستان (JJA)، پاییز (SON) و

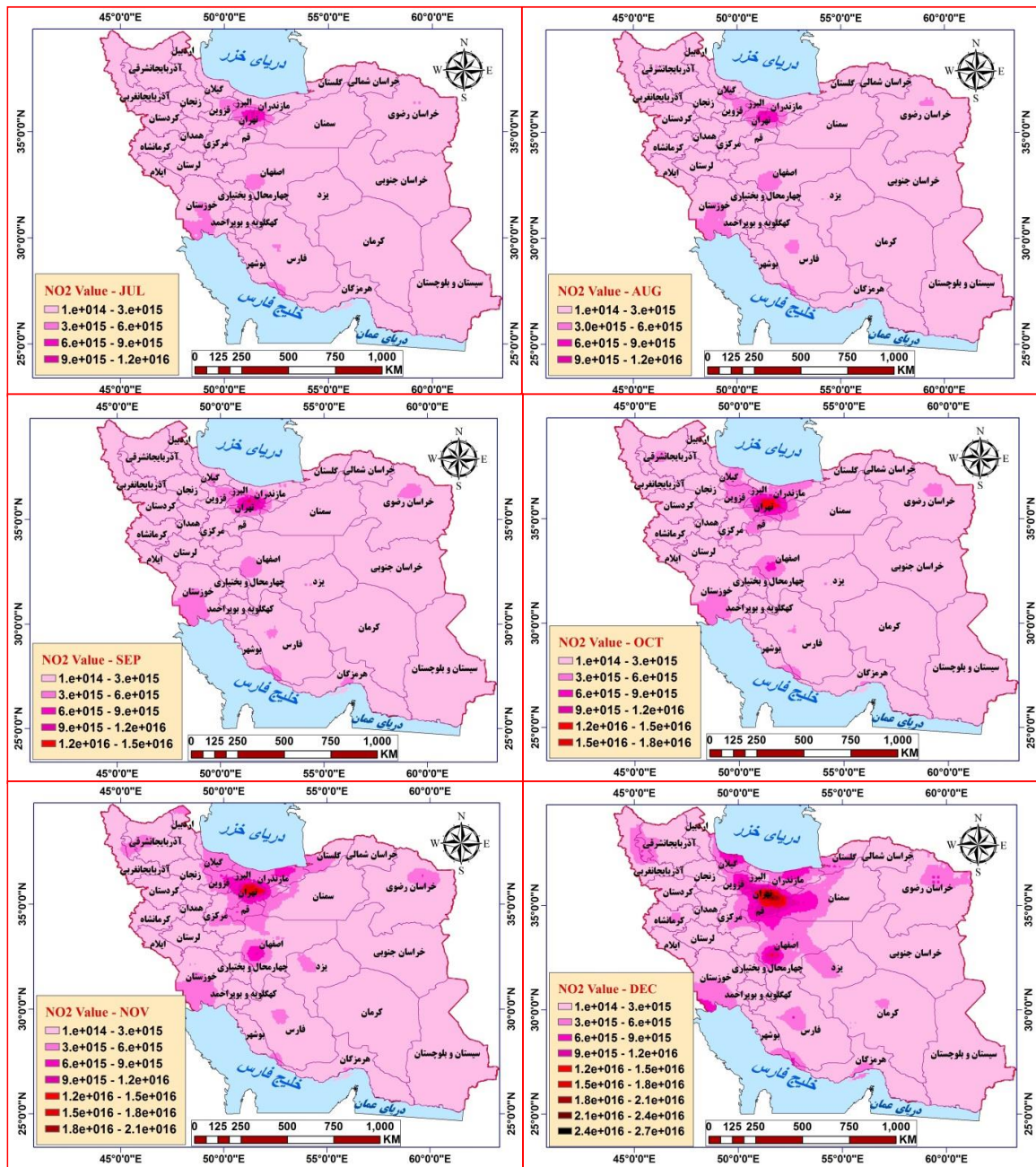
تجربه می‌کنند. واکاوی سری زمانی میانگین روزانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در طول ۵۸۲۳ روز متوالی (۲۰۲۰ - ۲۰۰۵)، حاکی از سیر افزایشی مقدار NO₂ در گستره تروپوسفر ایران است، به طوری که میانگین این گاز از 1.36e+15 molec/cm² در سال ۲۰۰۵ به 1.78e+15 molec/cm² در سال ۲۰۲۰ افزایش یافت. به عبارت دیگر در این دامنه زمانی بر تراکم ستون NO₂ تروپوسفری ایران 0.42e+15 molec/cm² (حدود ۲۴ درصد) افزوده شد (شکل ۳). افزایش تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در ایران در حالی اتفاق افتاده که ایران در سال ۱۳۸۴ به پروتکل کیوتو ملحق شده و در خصوص کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف انرژی، نفت و گاز، کشاورزی، منابع طبیعی و جنگلداری اعلام همکاری کرده است، اما همچنان روند افزایشی انتشار این گاز در ایران مشاهده می‌شود. البته در مقایسه با دیگر آلاینده‌های هوا، کنترل و کاهش اکسیدهای نیتروژن بسیار مشکل‌تر است. پژوهش‌ها در این زمینه نشان می‌دهد که با کنترل‌های به عمل آمده در بهسوزی خودروها و اقداماتی مانند تجهیز ناوگان حمل‌ونقل، افزایش کیفیت سوخت‌های فسیلی، اعمال طرح‌های کنترل



شکل ۷- توزیع فضایی میانگین ماهانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در گستره ایران در طی دوره آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۵)

موتوری، فعالیت‌های صنعتی و تراکم زیاد جمعیتی است. از جمله این مناطق می‌توان به شهرهای تهران، اصفهان، ساری، رشت، اهواز، مشهد، فارس، تبریز و ... اشاره کرد که به فراخور فصل سال، ویژگی‌های جغرافیایی و افزایش یا کاهش فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی، تعداد آنها متغیر است (شکل ۴). به‌طور کلی مناطقی از ایران که بیشترین آلودگی را نشان می‌دهند در محدوده کلانشهرهای بزرگ واقع

زمستان (DJF) در ایران نشان داد که بیشینه فصلی NO₂ در فصل زمستان با مقدار 1.68e+15 mole/cm² و کمینه فصلی آن در فصل تابستان با مقدار 1.30e+15 mole/cm² رخ داده است (شکل ۵). از سوی دیگر بررسی نقشه‌های مربوط به توزیع فضایی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در فصول سال، به روشنی نشان داد که مناطق با غلظت زیاد NO₂ مربوط به کلانشهرهایی با ترافیک زیاد وسایل نقلیه



شکل ۸- توزیع فضایی میانگین ماهانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در گستره ایران در طی دوره آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۵)

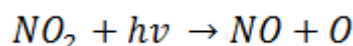
در دوره سرد سال است که در کنار عوامل دیگری از قبیل مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی، افزایش غلظت آلاینده NO₂ را در این فصل در پی دارد. از سوی دیگر کاهش شدت تابش خورشیدی در راستای تبدیل NO₂ به NO مزید بر علت می‌شود، زیرا با افزایش انرژی خورشیدی، درصد بیشتری از گاز NO₂ به NO طبق سازوکار واکنش ۱ تبدیل می‌شود و غلظت آن در تروپوسفر کاهش می‌یابد (Lin et al.,

شده‌اند و در این میان بیشترین آلودگی مربوط به کلانشهر تهران با حداکثر میانگین فصلی $2.10e+16$ molec/cm² در فصل زمستان است. یکی از عوامل تراکم زیاد ستون NO₂ تروپوسفری در دوره سرد سال، بیشتر بودن طول عمر NO₂ در نبود نور خورشید است (Van Der et al., 2006). افزایش طول عمر NO₂ در فصل زمستان نسبت به دیگر فصول، از عوامل شیمیایی پیشینه این آلاینده

(2015).

سپتامبر و اکتبر) در حدفصل ماه‌های بیشینه و کمینه فوق قرار دارند (شکل ۶). همچنین برآورد فضایی غلظت NO₂ ماهانه حاکی از تفاوت‌های معنادار آن است که این تفاوت در نقشه‌های ۷ و ۸ به‌خوبی مشاهده می‌شود. همان‌طور که الگوها نشان می‌دهد، اگرچه میانگین ماهانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری از نوسان زیادی در ایران برخوردار است، توزیع فضایی آن از الگوی همسانی تبعیت می‌کند. بررسی الگوهای ماهانه همانند الگوی فصلی نشان داد که مناطق پرتراکم ستون NO₂ تروپوسفری مربوط به کلانشهرهای پرتراکم وسایل نقلیه موتوری و فعالیت‌های صنعتی است. از جمله این مناطق می‌توان به استان‌های تهران، اصفهان، اهواز، مشهد، تبریز، رشت، ساری و در حاشیه خلیج فارس (بوشهر و بندرعباس) اشاره کرد. البته مقادیر تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در شهرهای اشاره‌شده و دیگر نواحی ایران، با توجه به ازدحام و تردد وسایل نقلیه موتوری، فعالیت‌های صنعتی، موقعیت‌های هواشناسی و تراکم جمعیت متفاوت است. همان‌طور که یاد شد، افزون بر کاهش شدت تابش خورشیدی در راستای تبدیل بخشی از NO₂ به NO، از دیگر عوامل اقلیمی (جغرافیایی) مؤثر در افزایش NO₂ در دوره سرد سال، می‌توان به وارونگی‌های دمایی اشاره کرد که به دو صورت تابشی و سینوپتیکی رخ می‌دهد. وارونگی تابشی بر اثر سرد شدن شدید سطح زمین و وارونگی سینوپتیکی اغلب بر اثر استقرار سیستم‌های پرفشار پایدار جوی تشکیل می‌شوند. هر دو پدیده از ویژگی‌های اصلی شرایط آب‌وهوایی ایران در دوره سرد سال است. از دیگر عوامل مؤثر بر افزایش تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در این دوره از سال، می‌توان به ترافیک زیاد (به‌دلیل باز بودن مدارس، دانشگاه‌ها و

(۱)

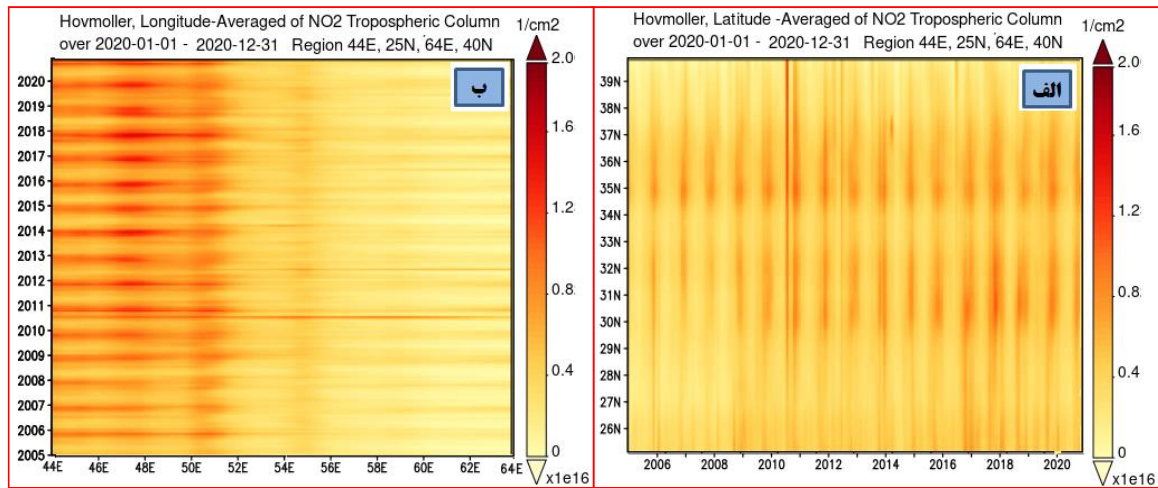


(۱)

از آنجا که واکنش ۱ در تابش خورشیدی و در طول روز (فتولیز در طول موج بین ۰/۳ تا ۰/۴ μm) انجام می‌گیرد، در دوره گرم سال به‌علت ساعات آفتابی بیشتر و شدت زیاد تابش خورشیدی، شرایط برای کاهش غلظت NO₂ مهیاتر است. بر همین اساس NO₂ تروپوسفری از یک‌سو تأثیر مهمی در شیمی جو و آلودگی هوا دارد و پیش‌نشانگر پدیده مه‌دود فتوشیمیایی محسوب می‌شود و از سوی دیگر، غلظت‌های زیاد آن به‌طور مستقیم (به‌علت گاز سمی بودن) و غیرمستقیم (تشکیل ذرات) اثرهای نامطلوبی بر سلامت انسان و دیگر موجودات زنده دارد (Sarnat *et al.*, 2001). بخش بزرگی از NO₂ از باکتری‌های درون خاک در طی فرایند دنیتریفیکاسیون تولید می‌شود، اما غلظت‌های زیاد این گاز در تروپوسفر اغلب ناشی از منابع مربوط به فعالیت‌های انسانی است. از میان فعالیت‌های انسانی، ۴۵ درصد NO₂ ناشی از وسایل نقلیه و مصارف خانگی، ۳۵-۳۰ درصد از نیروگاه‌های تولید برق و ۲۰ درصد از صنعت است (Georgoulis *et al.*, 2019).

۳-۳. برآورد ماهانه

شکل‌های ۶ تا ۸ برآورد ماهانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری ایران (۲۰۰۵-۲۰۲۰) را نشان می‌دهد. براساس این شکل‌ها، بیشترین میانگین ماهانه NO₂ در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه (ماه‌های سرد سال) و کمترین آن در ماه‌های ژوئن، ژولای و آگوست (ماه‌های گرم سال) برآورد شد. مقدار NO₂ در دیگر ماه‌های سال (فوریه، مارس، آوریل، می،



شکل ۹- الف) نمودار مداری هوفمولر؛ ب) نمودار نصفالنهاری هوف مولر؛ ج) میانگین مداری تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در گستره‌ی ایران طی دوره آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۵)

حالت یا نوع از نمودارهای هوفمولر قابل ترسیم است (Hovmoller, 1949). نتایج حاصل از این پروفیل‌ها به خوبی تبیین‌کننده توزیع و تغییرات تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در راستای طول و عرض جغرافیایی در ایران است (شکل ۹). براساس این نمودار در سال-های آماری تحت بررسی افت‌وخیزهای چشمگیری در مقادیر تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در ایران مشهود است، ولی سیر افزایشی روند آن از سال ۲۰۱۱ میلادی به بعد شایان توجه است. همچنین مقدار فراسنج تحت بررسی از جنوب به شمال ایران افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در دو محدوده بین عرض‌های ۳۰ تا ۳۲ درجه و ۳۴ تا ۳۸ درجه شمالی است. با نگاهی جزئی‌تر، بیشترین میانگین مداری تراکم ستون NO₂ تروپوسفری منطبق بر دو ناحیه جغرافیایی یکی در حوالی مدار ۲۶ درجه (منطبق بر کلانشهر اهواز) و دیگری در حوالی مدار ۳۶ درجه (منطبق بر کلانشهر تهران) است. همچنین در نمودار هوفمولر نوع دوم (تراز جوی- عرض جغرافیایی ثابت، طول جغرافیایی- زمان متغیر) نیز بیشترین تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در راستای ۴۴ تا ۵۲ درجه طول شرقی

اداره‌ها) و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی برای تأمین گرمایش فضاهای مسکونی، اداری، آموزشی و بهداشتی اشاره کرد. این یافته‌ها با نتایج معدود پژوهش‌های انجام‌گرفته در ایران همسوست (Ahmadi et al., 2018; Shah Mohammadi et al., 2020). از آنجا که چشمه‌های اصلی NO₂ تروپوسفری شامل فعالیت‌های انسانی و چشمه‌های طبیعی است (Liu et al., 2020)، به دلیل تفاوت در کانون‌های انتشار، تراکم ستون NO₂ تروپوسفری از مکانی به مکان دیگر متفاوت است.

۳-۳. برآورد مداری- نصف‌النهاری

اندازه‌گیری مقادیر تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در راستای طول و عرض جغرافیایی با استفاده از پروفیل‌های هوفمولر بازسازی شده است. این پروفیل‌ها در واقع نیمرخ‌های عمودی و افقی فراسنج‌های جوی محسوب می‌شوند که برای ارزیابی یا تشخیص رفتار یک فراسنج در امتداد طول و عرض جغرافیایی در طول زمان به کار می‌روند. در نمودارهای هوفمولر ابعاد چهارگانه ژئوفیزیکی (طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، تراز و زمان) دوبه‌دو با هم متغیر یا ثابت‌اند که از ترکیب چهار بُعد به صورت دوبه‌دو، شش

(جنوب غرب ایران) مشهود است. به عبارت دیگر تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در راستای طول جغرافیایی از غرب به شرق کاهش می‌یابد. این شرایط به این دلیل است که تمرکز کانون‌های تولید و انتشار NO₂ تروپوسفری در نیمه غربی ایران بیش از نیمه شرقی است (شکل ۹ ب).

۴. بحث و نتیجه گیری

در پی استفاده روزافزون از وسایل نقلیه، توسعه صنایع و کارخانه‌ها و مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی، غلظت آلاینده‌های هوا به‌ویژه NO₂ تشدید شده که مشکلات عدیده‌ای را برای سلامت انسان در پی داشته است. در این تحقیق، توزیع زمانی- فضایی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در ایران با استفاده از داده‌های NO₂ سنجنده OMI در طی سال‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۰۵ بررسی شده است. توزیع تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در دامنه زمانی مذکور نشان داد که میانگین تراکم ستون NO₂ تروپوسفری 1.57×10^{15} molec/cm² است که در این میان، بیشترین مقدار مشاهده شده 3.38×10^{15} molec/cm² و کمترین مقدار آن 0.32×10^{15} molec/cm² با انحراف معیار 1.32×10^{15} molec/cm² بوده است. به لحاظ پراکنش مکانی نیز بیشترین تراکم ستون NO₂ تروپوسفری بر فراز شهرهایی از جمله تهران، اصفهان، اهواز، شیراز، رشت، ساری، مشهد، قم، قزوین و بخش صنعتی استان بوشهر حاکم است. آنالیز حاصل از بررسی سری زمانی میانگین روزانه تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در طول ۵۸۲۳ روز متوالی (۲۰۲۰ - ۲۰۰۵)، حاکی از سیر افزایشی روند تراکم ستون NO₂ تروپوسفری در گستره ایران است، به طوری که

میانگین این گاز از 1.36×10^{15} molec/cm² در سال ۲۰۰۵ به 1.78×10^{15} molec/cm² در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است. سیر افزایشی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری ممکن است به دلایلی همچون توسعه شهرنشینی، افزایش جمعیت، استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی، افزایش تعداد نیروگاه‌های برق، فعالیت‌های صنعتی و همچنین افزایش ترافیک ناشی از وسایل نقلیه باشد. واکاوی حاصل از میانگین فصلی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری نشان داد که بیشینه فصلی NO₂ در دوره سرد سال (فصل زمستان با مقدار 1.68×10^{15} molec/cm²) و کمینه فصلی آن در فصل تابستان با مقدار 1.30×10^{15} molec/cm² رخ می‌دهد. افزایش طول عمر این آلاینده در فصل زمستان که به دلیل کاهش شدت انرژی خورشیدی جهت تبدیل NO₂ به NO است، یکی از عوامل شیمیایی بیشینه NO₂ در دوره سرد سال است. فعال تر بودن کانون‌های انتشار مانند حجم ترافیک شدید، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی برای تأمین گرمایش فضاها، مختلف و شرایط هواشناسی حاکم (پدیده وارونگی دما)، از دیگر عوامل مؤثر در این دوره از سال است. همچنین توزیع فضایی تراکم ستون NO₂ تروپوسفری حاکی از تفاوت‌های معنادار فضایی آن در گستره جغرافیایی ایران است، زیرا کانون‌های تولید و انتشار NO₂ در کلانشهرهای با توزیع ناهمگن جغرافیایی قرار دارد که اغلب در نیمه غربی و شمالی ایران واقع شده‌اند. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های مشابه در شهرهای تهران، مشهد، همدان و اصفهان مطابقت دارد (Lily et al., 2016; Shah Mohammadi et al., 2017; Ahmadian et al., 2018; Shah Mohammadi et al., 2020)، بنابراین باید برای

راستای اتخاذ راهکارهای مدیریتی مناسب برای کاهش غلظت NO₂ صورت گیرد.

کاهش بیماری‌های ناشی از این آلاینده و حفظ سلامت محیط زیست، اقدامات چشمگیری در

References

- Abel, C., Horion, S., Tagesson, T., Brandt, M., Fensholt, R., 2019. Towards improved remote sensing based monitoring of dryland ecosystem functioning using sequential linear regression slopes (SeRGS). *Remote Sensing Environment* 224, 317-332.
- Ahmadian, A., Mobasheri, M., Motakan, A., 2018. Atmospheric NO₂ zoning in industrial cities using OMI and MODIS images (Case study: Tehran metropolis). *Spatial Information Technology Engineering* 1(6), 171-184. (In Persian).
- Aissa, B., Isaifan, R.J., Madhavan, V.E., Abdallah, A.A., 2016. Structural and Physical Properties of the Dust Particles in Qatar and Their Influence on the PV Panel Performance. *Scientific Report* 6, 1-12.
- Ajimi, N., Omidvar, K., Shahaian, S., 2015. Evaluation of the effect of air pollution on mortality due to myocardial infarction in Mashhad, the first international conference on tourism, geography and sustainable environment, Tehran University Jihad. (In Persian).
- Alijani, B., 2019. *Iran Climate*, Payame Noor University Press, 236 p. (In Persian).
- Anttila, P., Tuovinen, J.P., 2010. Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007. *Atmospheric Environment* 44, 30-41.
- Arvin, A., 2016. *Air Pollution and Chemistry Atmosphere*. Payame Noor University Press, 19 p. (In Persian).
- Bechle, M.J., Millet, D.B., Marshall, J.D., 2013. Remote sensing of exposure to NO₂: Satellite versus ground-based measurement in a large urban area. *Atmospheric Environment* 69, 345-353.
- Bucsel, E.J., Wenig, M.O., Swart, D.P.J., Volten, H., Kroon, M., Levelt, P.F., 2008. Validation of Ozone Monitoring Instrument nitrogen dioxide columns. *Geophysical Research* 113, 1029.
- Chaloulakou, A., Mavroidis, I., Gavriil, I., 2008. Compliance with the annual NO₂ air quality standard in Athens. Required NO_x levels and expected health implications. *Atmospheric Environment* 42, 454-465.
- David, L.M., Nair, P.R., 2013. Tropospheric column O₃ and NO₂ over the Indian region observed by Ozone Monitoring Instrument (OMI): Seasonal changes and long-term trends. *Atmospheric Environment* 65, 25-39.
- Dehghani, H., 2008. *Fundamentals of Meteorology and Air Pollution*, Ghashieh Publications, Tehran, 265 p. (In Persian).
- Duncan, B.N., Lamsal, L.N., Thompson, A.M., Yoshida, Y., Lu, Z., Streets, D.G., Hurwitz, M.M., Pickering, K.E., 2016. Space-based, high-resolution view of notable changes in urban NO_x pollution around the world (2005-2014). *Geophysical Research Atmospheric* 121, 976 - 996.
- Erfan Manesh, M., Afuoni, M., 2000. *Environmental pollution "water, soil and air"*, Arkan Isfahan Press, 330 p. (In Persian).
- Georgoulas, A.K., van der A, R.J., Stammes, P., Eskes, H.J., 2019. Long-term trends and trend reversal detection in two decades of tropospheric NO₂ satellite observations. *Geophysical Research: Atmospheres* 714, 7236 - 7249.
- Ghiasuddin, M., 2017. *Air Pollution, Resources, Effects and Control*, University of Tehran Press, 900 p. (In Persian).
- Ghude, S.D., Van der A, R. J., Beig, G., Fadnavis, S., Polade, S.D., 2009. Satellite derived trends in NO₂ over the major global hotspot regions during the past decade and their inter-comparison, *Environmental Pollution. Atmospheric chemistry and Physics* 157, 1873-1878.
- Goldberg, D., Lu, Z., Oda, T., Lamsal, L.N., Liu, F., Griffin, D., McLinden, C., Krotkov, N.A.,

- Duncan, B.N., Streets, D., 2019b. Exploiting OMI NO₂ satellite observations to infer fossil-fuel CO₂ emissions from U.S. megacities. *Sci. Total Environment* 695, 133805.
- Goldberg, D.L., Saide, P.E., Lamsal, L.N., de Foy, B., Lu, Z., Woo, J.H., Kim, Y., Kim, J., Gao, M., Carmichael, G., and Streets, D.G., 2019a. A top-down assessment using OMI NO₂ suggests an underestimate in the NO_x emissions inventory in Seoul, South Korea, during KORUS-AQ. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 1801-1818.
- Herman, J., Spinei, E., Kim, J., Abuhassan, N., Segal-Rozenhaimer, M., 2018. NO₂ and HCHO measurements in Korea from 2012 to 2016 from Pandora spectrometer instruments compared with OMI retrievals and with aircraft measurements during the KORUS-AQ campaign. *Atmospheric Measurement Techniques* 11, 4583-4603.
- Hosseiniabadi, M., 2014. Effects of Climate and Air Pollutants on Surface Ozone and Ultraviolet Radiation in Isfahan, MSc Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian).
- Hovila, J., Arola A. and Tamminen J., 2019. OMUVB: OMI/Aura Surface UV Irradiance 1-orbit L2 Swath 13x24 km V003. Available online: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMUVB-V003/>.
- Hovmoller, E., 1949. The Trough and Ridge Diagram. *Tellus* 1(2), 62 - 66.
- Jamali, S., Klingmy, D., Tagesson, T., 2020. Global-Scale Patterns and Trends in Tropospheric NO₂ Concentrations, 2005–2018. *Remote Sensing* 12(3526), 1-18.
- Javanbakht Amiri, S., Khatami, S., 2012. Study of the relationship between air quality index pollutants and meteorological parameters in Tehran, with the regression analysis approach. *Human and the Environment* 10, 15-28. (In Persian).
- Judd, L.M., Al Saadi, J.A., Janz, S.J., Kowalewski, M.G., Pierce, R.B., Szykman, J.J., Valin, L.C., Swap, R., Cede, A., Mueller, M., Tiefengraber, M., Abuhassan, N., Williams, D., 2019. Evaluating the impact of spatial resolution on tropospheric NO₂ column comparisons within urban areas using high-resolution airborne data. *Atmospheric Measurement Techniques* 12, 6091-6111.
- Kim, H. C., Lee, P., Judd, L., Pan, L., Lefer, B., 2016. OMI NO₂ column densities over North American urban cities: the effect of satellite footprint resolution. *Geoscience Model Development* 9, 1111-1123.
- Kononov, I.B., Berezin, E.V., Ciais, P., Broquet, G., Janssens-Maenhout, G., 2016. Estimation of fossil-fuel CO₂ emissions using satellite measurements of “proxy” species. *Atmospheric Chemistry* 16, 13509-13540.
- Krotkov, N.A., Lamsal, L.N., Marchenko, S.V., Celarier, E.A., Bucsela, E.J., Swartz, W.H., Joiner, J., 2019. OMNO₂d: OMI/Aura NO₂ Cloud-Screened Total and Tropospheric Column L3 Global Gridded 0.25 Degree V3. *China Atmospheric Environment* 142, 127-136.
- Kuhlmann, G., Lam, Y. F., Cheung, H.M., Hartl, A., Fung, J.C.H., Chan, P.W., Wenig, M.O., 2015. Development of a custom OMI NO₂ data product for valuating biases in a regional chemistry transport model. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 5627-5644.
- Lamsal, L.N., Krotkov, N.A., Vasilkov, A., Yang, E.S., Fasnacht, Z., Joiner, J., Choi, S., Haffner, D., Swartz, W.H., Fisher, B., Bucsela, E., 2021. Ozone Monitoring Instrument (OMI) Aura nitrogen dioxide standard product version 4.0 with improved surface and cloud treatments. *Atmospheric Measurement Techniques* 14, 455-479.
- Lamsal, L.N., Duncan, B.N., Yoshida, Y., Krotkov, N. A., Pickering, k. E., Streets, D.G., Lu, Z., 2015. US NO₂ trends (2005-2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). *Atmospheric Environment* 110, 130-143.
- Laughner, J.J., Cohen, R.C., 2019. Direct observation of changing NO_x lifetime in North American cities. *Science* 366, 723-727.
- Laughner, J.L., Zhu, Q., Cohen, R.C., 2019. Evaluation of version 3.0B of the BEHR OMI NO₂ product *Atmospheric Measurement Techniques* 12, 129-146.
- Levelt, P.F., Joiner, J., Tamminen, J., Veefkind,

- J.P., Bhartia, P.K., Duncan, B.N., Streets, D.G., Eskes, H., Van Der, R.A., 2018. The Ozone Monitoring Instrument: Overview of 14 Years in Space. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 5699-5745.
- Lily, M., Bahrami Asl, F., Hesam, M., Molla Mahmoudi, M., Salahshour Arian, S., 2016. Estimation of the number of diseases and deaths attributed to NO₂ and SO₂ pollutants using AirQ model in Hamadan. *Hamedan Medicine and Health Services* 23(4), 314-322. (In Persian).
- Lin, J.T., Liu, M.Y., Xin, J.Y., Boersma, K. F., Spurr, R., Martin, R., Zhang, Q., 2015. Influence of aerosols and surface reflectance on satellite NO₂ retrieval: seasonal and spatial characteristics and implications for NO_x emission constraints. *Atmospheric chemistry and Physics* 15, 11217-11241.
- Liu, F., Duncan, B.N., Krotkov, N.A., Lamsal, L.N., Beirle, S., Griffin, D., McLinden, C. A., Liu, M., Lin, J., Boersma, K. F., Pinaridi, G., Wang, Y., Xie, P., Eskes, H., Van Roozendaal, M., Hendrick, F., Wang, P., Wang, T., Yan, Y., Chen, L., Ni, R., 2019. Improved aerosol correction for OMI tropospheric NO₂ retrieval over East Asia: constraint from CALIOP aerosol vertical profile. *Atmospheric Measurement Techniques* 12, 1- 21.
- Lu, Z., Streets, D.G., de Foy, B., Lamsal, L.N., Duncan, B.N., Xing, J., 2015. Emissions of nitrogen oxides from US urban areas: estimation from Ozone Monitoring Instrument retrievals for 2005–2014. *Atmospheric chemistry and Physics* 15, 10367-10383.
- Mansouri, N., 2011. Environmental pollution, air, water, waste, Arad Ketab Press, 472 p. (In Persian).
- Martins, D.K., Najjar, R.G., Tzortziou, M., Kollonige, D.E., 2016. Spatial and temporal variability of ground and satellite column measurements of NO₂ and O₃ over the Atlantic Ocean during the Deposition of Atmospheric Nitrogen to Coastal Ecosystems Experiment. *Geophysical Research: Atmospheres* 121, 14175-14187.
- Masoudian, S.A., 2012. Iran Climate, Sharia Toos press, 288 p. (In Persian).
- Mavroidis, I., Ilija, M., 2012. Trends of NO_x, NO₂ and O₃ concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 63, 135-147.
- Miri, M., Mohammadi, A., Nemati, S., Abdullah Nejad, A.S. and Nikonhad, A., 2016. A study of changes in air quality hygiene index (AQI) in Mashhad with Geographic Information System (GIS). *Journal of Community Health Research* 2(1): 12-20. (In Persian).
- Nemery, B., Hoet, P.H. Nemmar, A., 2001. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *Lancet* 357(9257), 704-708.
- Omidvar, K., 2018. Air Pollution and Chemistry Atmosphere, Yazd University Press, 347 p. (In Persian).
- Paraschiv, S., Constantin, D.E., Paraschiv, S.L., Voiculescu, M., 2017. OMI and ground-based in-situ tropospheric nitrogen dioxide observations over several important European cities during 2005–2014. *Environment Research Public Health* 14, 1415-1422.
- Pitkanen, M.R.A., Arola, A., Lakkala, K., Koskela, T., Lindfors, A.V., 2015. Comparing OMI UV Index to Ground-Based Measurements at Two Finnish Sites with Focus on Cloud-Free and Overcast Conditions. *Atmospheric Measurement Techniques* 8, 487-516.
- Qin, W., Fasnacht, Z., Haffner, D., Vasilkov, A., Joiner, J., Krotkov, N., Spurr, R., 2019. A geometry-dependent surface Lambertian-equivalent reflectivity product for UV–Vis retrievals–Part 1: Evaluation over land surfaces using measurements from OMI at 466 nm. *Atmospheric Measurement Techniques* 12, 3997-4017.
- Raispour, K. and Khosravi, Y., 2020. Investigation of spatio - temporal scattering of carbon monoxide in the Iranian atmosphere using Aqua / AIRS data. *Spatial Analysis of Environmental Hazards* 7(2), 137-152. (In Persian).
- Sabziparvar, A., Helali, J., 2015. The basic principles of meteorology and air pollution, Bu Ali University of Hamadan press, 342 p. (In Persian).
- Samadzadeh, R., 2019. Geomorphology of Iran,

Samat Presss, 496 p. (In Persian).

Schneider, P., Lahoz, W.A., van der A.R., 2015. Recent satellite-based trends of tropospheric nitrogen dioxide over large urban agglomerations worldwide. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15(3), 1205-1220.

Shah Mohammadi, A., Bayat, A., Mashhadizadeh, S., 2017. Investigation of the behavior and trend of air nitrogen dioxide in Tehran using OMI sensor measurements. *Iranian Journal of Astronomy and Astrophysics* 4(2), 69-78. (In Persian).

Shah Mohammadi, A., Bayat, A., Mashhadizadeh, S., 2020. Investigation of the behavior of nitrogen dioxide in the city of Mashhad and its relationship with meteorological parameters. *Applied Research in Geographical Sciences* 58: 71-85. (In Persian).

Sharipour, Z., Ali Akbari Beidakhti, A., 2014. A study of the tropospheric NO₂ status of Iran during the years 2004 to 2012. *Journal of Environmental Studies* 40(1), 65-77. (In Persian).

Sharma, N.P., Bhattarai, B.K., Sapkota, B., Kjeldstad, B., 2012. Comparison of Ground Based Measurements of Solar UV Index with Satellite Estimation at Four Sites of Nepal. *Journal of the Institute of Engineering* 8, 58 -71.

Shon, Z. H., Kim, K. H. and Song, S. K., 2011. Long-term trend in NO₂ 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., Zirui, L., 2011. In situ measurements of SO₂, NO_x, NO_y, and O₃ in Beijing, China during August 2008. *Science of the Total Environment* 409, 933 - 940.

Van Der, A.R.J., Peters, D.H., Eskes, H., Boersma, K.F., De Smedt, I., Kelder, H.M., 2006. Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China. *Geophysical Research: Atmospheres* 111, 12-27.

Vasilkov, A., Qin, W., Krotkov, N., Lamsal, L., Spurr, R., Yang, E.-S., Marchenko, S., 2017. Accounting for the effects of surface BRDF on satellite cloud and trace-gas retrievals: a new

approach based on geometry-dependent Lambertian equivalent reflectivity applied to OMI algorithms. *Atmospheric Measurement Techniques* 10, 333-349.

Wallace, J. and Kanaroglou, P., 2009. The sensitivity of OMI-derived nitrogen dioxide to boundary layer temperature inversions. *Atmospheric Environment* 43, 3596 - 3604.

Wang, Y., Wang, J., 2020. Tropospheric SO₂ and NO₂ in 2012–2018: Contrasting views of two sensors (OMI and OMPS) from space. *Atmospheric Environment* 223, 117214.

Zara, M., Boersma, K. F., De Smedt, I., Richter, A., Peters, E., van Geffen, J. H. G. M., Beirle, S., Wagner, T., Van Roozendaal, M., Marchenko, S., Lamsal, L.N., Eskes, H. J., 2018. Improved slant column density retrieval of nitrogen dioxide and formaldehyde for OMI and GOME-2A from QA4ECV: intercomparison, uncertainty characterisation, and trends. *Atmospheric Measurement Techniques* 11, 4033-4058.

Zhang, L., Lee, C.S., Zhang, R. and Chen, L., 2017. Spatial and temporal evaluation of long term trend (2005–2014) of OMI retrieved NO₂ and SO₂ concentrations in Henan Province. *China Atmospheric Environment* 154, 151-166.

Zhang, R., Tie, X., Bond, 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, R., Wang, Y., Smeltzer, C., Qu, H., Koshak, W., Boersma, K.F., 2018. Comparing OMI-based and EPA AQS in situ NO₂ trends: Towards understanding surface NO_x emission changes. *Atmospheric Measurement Techniques* 11, 3955 - 3967.

Zhou, Y., Brunner, D., Hueglin, C., Staehelin, J., 2012. Changes in OMI tropospheric NO₂ columns over Europe from 2004 to 2009 and the influence of meteorological variability. *Atmospheric Environment* 46, 482-495.