

بررسی رفتار دی اکسید نیتروژن در شهرستان مشهد و ارتباط آن با

پارامترهای هواشناسی

دریافت مقاله: ۹۷/۴/۱۷ پذیرش نهایی: ۹۷/۹/۱۱

صفحات: ۷۱-۸۵

عاطفه شاهمحمدی: دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۱.

Email: atefeh.sh.m@znu.ac.ir

علی بیات: استادیار گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

Email: abayat@znu.ac.ir

سعید مشهدی زاده ملکی: دانشجوی دکتری نقشه برداری، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران..

Email: saeed.mashhadizadeh@gmail.com

چکیده

توسعه شهرنشینی و آلودگی هوای شهری از مهم ترین موضوعاتی است که امروزه در ارتباط با اقلیم مطرح است. گسترش شهرنشینی و توسعه شهرها، افزایش جمعیت، توسعه فعالیت های صنعتی و مصرف بی رویه سوخت های فسیلی به شدت آلودگی هوا را افزایش داده و میزان آن را بیش از ظرفیت محیط کرده است. در کشور ما، انتشار آلاینده های هوا در برخی از کلان شهرها به میزان خطرناکی رسیده است، مشهد در برخی روزهای سال از آلوده ترین شهرهای کشور به شمار می رود. دی اکسید نیتروژن یکی از شاخص های آلودگی هوا است. در این مطالعه از داده های دی اکسید نیتروژن سنجنده OMI و پارامترهای هواشناسی مانند باد، دمای سطحی و دید افقی برای بازه زمانی ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ جهت بررسی آلودگی هوای ناشی از دی اکسید نیتروژن شهر مشهد استفاده شده است. نتایج نشان می دهند بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن در دوره سرد سال اتفاق می افتد. به طوری که بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن در ماه ژانویه برابر $5.56 \times 10^{15} \frac{molec}{cm^2}$ و کمترین مقدار آن در ماه سپتامبر برابر $4.18 \times 10^{15} \frac{molec}{cm^2}$ می باشد. انحراف معیار دی اکسید نیتروژن نیز نشان می دهد که بیشترین تغییرات در دوره سرد سال رخ می دهد. همچنین نتایج نشان دادند باد غالب در شهر مشهد از سمت جنوب می باشد و اغلب بادهای این شهر سرعت کم دارند. ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با باد و دمای سطحی به ترتیب برابر -0.36 و -0.57 است که اهمیت بیشتر دما در تغییرات دی اکسید نیتروژن شهر مشهد را نشان می دهد. همچنین ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با دید افقی برابر -0.15 است که نشان می دهد با افزایش آلودگی هوای ناشی از دی اکسید نیتروژن دید افقی کاهش می یابد. با استفاده از آنالیز طیفی کمترین مربعات دوره های تناوب شش و دوازده ماهه مشاهده شد که از نظر آماری نیز معنی دار شناخته شدند. پس از حذف مولفه های معنی دار از سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن، روند محاسبه شد. مقدار روند دی اکسید نیتروژن در هر سال برای شهر مشهد $2.41 \times 10^{13} \frac{molec}{cm^2}$ بدست آمد.

کلید واژگان: دی اکسید نیتروژن، آنالیز طیفی کمترین مربعات، سنجنده OMI، پارامترهای هواشناسی، مشهد.

۱. نویسنده مسئول: دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه فیزیک ۰۹۱۰۴۸۳۹۵۴۳

مقدمه

آلودگی هوا از مهم‌ترین موضوعاتی است که همواره در ارتباط با اقلیم مطرح بوده و جنبه‌های مختلفی از آن مورد توجه قرار گرفته است. سازمان بهداشت، رفاه و آموزش آمریکا آلودگی هوا را چنین تعریف کرده است: «اگر یک یا چند ماده آلوده کننده، مدتی در هوا باشند که به انسان‌ها، گیاهان و حیوانات زیان رسانند یا سبب کاهش راحتی، آرامش و لذایذ زندگی گردند، آن هوا آلوده است» (احدی، ۱۳۹۴). منابع تولید آلاینده‌های هوا به دو دسته منابع طبیعی مانند انفجار آتشفشان‌ها، رعد و برق، گسیل ناشی از خاک و منابع انسانی یا مصنوعی مثل منابع صنعتی، شهری، خانگی و کشاورزی تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین آلاینده‌های هوا را می‌توان به دو دسته آلاینده‌های اولیه و ثانویه نیز تقسیم‌بندی نمود. آلاینده‌های اولیه آلاینده‌هایی هستند که به طور مستقیم از منابع تولید کننده منتشر می‌شوند و آلاینده‌های ثانویه در اثر برهم کنش عواملی مانند نورخورشید و رطوبت و واکنش شیمیایی روی آلاینده‌های اولیه تولید شده و وارد جو می‌شوند. آلاینده‌های ثانویه شامل اسید نیتریک، اسید سولفوریک و ازن هستند که از آلاینده‌های اولیه مانند دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن ($\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$) و ترکیبات هیدروکربنی تولید می‌شوند (بوتکین و کلر، ۱۳۸۲). دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) گازی قرمز متمایل به نارنجی نزدیک به قهوه‌ای، دارای نقطه جوش ۲۱٫۲ درجه سلسیوس و فشار جزئی که آن را در حالت گازی نگه داشته است (غیاث‌الدین، ۱۳۸۵). از مهمترین منابع تولید کننده دی‌اکسید نیتروژن اگزوز اتومبیل‌ها، سوخت‌های فسیلی، نیروگاه‌های برق، دیگ‌های بخار صنعتی، زباله‌سوزها، وسایل گرمایشی، رعد و برق و آتشفشان‌ها را می‌توان نام برد (Samet, 2000:5). دی‌اکسید نیتروژن در ترکیب با هیدروکسید رادیکالی، اسید نیتریک تولید می‌کند که در نهایت به صورت باران اسیدی بر سطح زمین می‌بارد (حسین آبادی، ۱۳۹۳). همچنین دی‌اکسید نیتروژن با آمونیاک، رطوبت و ترکیبات دیگر به شکل ذرات کوچک واکنش داده و با نفوذ در عمق ریه سبب ایجاد یا تشدید بیماری‌های تنفسی مانند آسم، برونشیت و افزایش سرفه می‌شود. تغییرات بافت کلیه، کبد و قلب، کاهش وزن، حساسیت در برابر باکتری‌ها و عفونت‌های ویروسی از دیگر اثرات این آلاینده بر سلامتی می‌باشد (حاتمی، ۱۳۸۳).

شرایط جوی و اقلیمی اثر قابل ملاحظه‌ای در تداوم و تشدید آلودگی هوا دارند. پارامترهای هواشناسی تاثیر گذار بر آلودگی هوا عبارتند از: جهت و سرعت باد، دما، بارش، رطوبت، تابش خورشیدی و دید افقی. طبق گزارش آکادمی ملی ایالات متحده آمریکا دمای جهانی سطح زمین ۰٫۴ تا ۰٫۸ درجه سانتیگراد افزایش یافته است. از آنجایی که گرمایش جهانی هوا تاثیر بسیار زیادی بر حیات در کره زمین دارد، پژوهشگران و محققان نیز به بررسی تغییرات دما در مقیاس‌های زمانی و مکانی پرداخته‌اند (Sheppard, 2004:12). باد به دلیل تاثیری که بر دمای هوا می‌گذارد، مهم است و حرکات باد موجب می‌شوند تا اختلالات مربوط به دما، رطوبت و فشار که در جهات مختلف افقی جو وجود دارد، از بین رفته و هوا به حالت تعادل درآید. هنگامی که در یک‌جا تعادل برقرار شد، اختلالات جدیدی در جای دیگر به وجود می‌آید بنابراین هیچ وقت تعادل حاصل نمی‌شود و باد یک تعدیل کننده مهم در طبیعت می‌باشد (بنتلی، ۱۳۸۲).

وارونگی دمایی^۲ به پدیده‌ای گفته می‌شود که برخلاف حالت طبیعی با افزایش ارتفاع، دما نیز زیاد شود و از عواقب وارونگی دمایی تیرگی هوا است (عباسپور، ۱۳۸۹). دید افقی از دیگر کمیت‌های هواشناسی است که در ایستگاه‌های سینوپتیک اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین دید افقی نشانه‌ای ساده برای بررسی کیفیت هوا است (ثابت قدم، ۱۳۹۲). نتایج مطالعه علیجانی و همکارانش نشان می‌دهد که شدت و فراوانی وقوع وارونگی دمایی در ایام سرد سال به بیشینه مقدار خود می‌رسد و در این دوره از سال وارونگی دمایی از تداوم و پایداری بیشتری در مقایسه با سایر فصول سال برخوردار است (علیجانی، ۱۳۸۸).

در ایران میزان انتشار آلاینده‌های هوا در بسیاری از شهرها از جمله تهران، اصفهان، تبریز، مشهد، شیراز، کرج، اراک و اهواز به سطح خطرناکی رسیده است. در میان شهرهای مختلف کشور، شهر مشهد به دلیل وجود آثار تاریخی و فرهنگی به ویژه مرقد مطهر امام رضا (ع) و وجود ییلاقات خوش آب و هوا یکی از شهرهای پرجاذبه زیارتی سیاحتی و مهاجر پذیر کشور است و این موضوع مشکلات زیادی را در تمام جنبه‌های زندگی شهری به وجود آورده است. به طور میانگین روزی ۱۰ نفر بر اثر بیماری‌های مرتبط با آلودگی هوا در مشهد فوت می‌کنند و این آمار رو به افزایش می‌باشد (عجمی تربقان، ۱۳۹۴). بنابراین این موضوع به یک مشکل حاد در این شهر تبدیل شده است. برای کنترل و کاهش میزان آلودگی و تاثیر سو آن بر سلامتی افراد باید در ابتدا عوامل آلوده کننده هوا و عوامل اقلیمی را شناسایی کرد. به همین منظور در این مقاله به بررسی رفتار و روند دی اکسید نیتروژن و برخی پارامترهای هواشناسی در شهر مشهد پرداخته شده است.

ماهواره Aura در مدار خورشید آهنگ^۳ قرار دارد و لحظه گذر آن ساعت ۱۳:۱۵ به وقت محلی است. سنجنده OMI^۴ با حمایت موسسه هلندی و سازمان هواشناسی فنلاند در آگوست ۲۰۰۴ بر روی ماهواره Aura به منظور داده‌برداری از چند گاز مهم از جمله دی اکسید نیتروژن، ازن، دی اکسید کلر، فرمالدئید و هواویزها قرار گرفته است. از داده‌های روزانه دی اکسید نیتروژن سنجنده OMI در بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای بررسی آلودگی هوای شهر مشهد استفاده شده است که مربوط به سایت <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.htm> می‌باشد. علاوه بر نیتروژن داده‌های باد، دمای سطحی و دید افقی نیز به کار گرفته شد (www.irimo.ir).

لامسال^۵ و همکارانش روند دی اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده توسط سنجنده OMI 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 دی اکسید نیتروژن را بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ نشان داد (Lamsal, 2015: 130). قوده^۶ و همکارانش نیز با استفاده از داده‌های سنجنده SCIAMACHY^۷ و GOME^۸ نشان دادند که مقدار دی اکسید نیتروژن در کشورهای در حال توسعه در حال افزایش است و عامل مهم در

² Inversion

³ Sun Synchronous Orbit

⁴ Ozone Monitoring Instrument

⁵ Lamsal

⁶ Ghude

⁷ Scanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartography

⁸ Global Ozone Monitoring Experiment

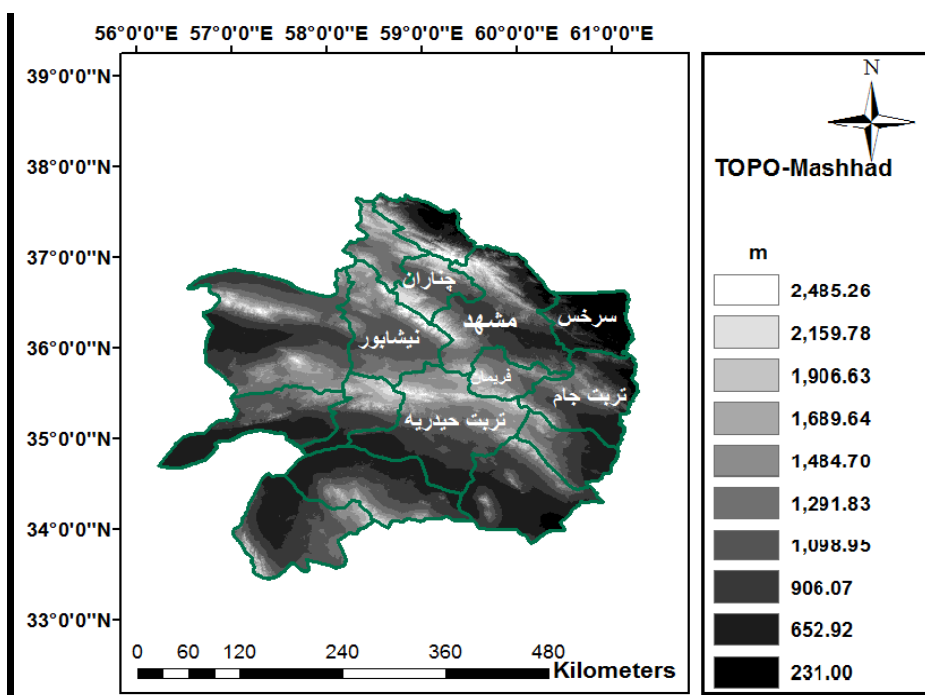
روند افزایش دی اکسید نیتروژن در کشورهای خاورمیانه مصرف سوخت فسیلی بوده است (Ghude and et al., 2009). ژو^۹ و همکارانش روند بلند مدت تغییرات دی اکسید نیتروژن در اروپا را بررسی کرده اند، نتایج آن ها نشان داده که دی اکسید نیتروژن در غرب اروپا کاهش یافته است (Zhou and et al., 2012, 482). اشنایدر و همکارانش با استفاده از داده های SCIAMACHY روند دی اکسید نیتروژن را برای شهرهای بزرگ جهان در بازه آگوست ۲۰۰۲ تا مارس ۲۰۱۲ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که در اروپا، آمریکای شمالی و برخی نقاط در شرق آسیا دی اکسید نیتروژن کاهش می یابد در حالیکه در آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی افزایش یافته است (Schneider and et al, 2015). واندر و همکارانش با استفاده از داده های SCIAMACHY و GOME به بررسی روند دی اکسید نیتروژن در چین پرداختند و نشان دادند که گازهای گلخانه ای و دی اکسید نیتروژن در چین در حال افزایش است (Van Der and et al, 2006). روند دی اکسید نیتروژن به وسیله برازش یک مدل خطی با در نظر گرفتن اجزا فصلی مورد بررسی قرار گرفته است. ژانگ^{۱۰} و همکارانش چشمه های اکسیدهای نیتروژن ناشی از فعالیت های انسانی و طبیعی در آمریکا را بررسی کرده اند و نتایج آن ها نشان داده است که برق حاصل از رعد و برق تابستانی در آمریکا نقش مهمی در غلظت اکسیدهای نیتروژن و ازن دارد (Zhang, 2003: 67). نتایج تحقیق موسوی و معروف نشان داد، دی اکسید نیتروژن و تشعشع خورشید در تشکیل مه- دود فتوشیمیایی دخالت دارند که تاثیر صنایع بیشتر از خودروهای داخل شهر بوده است و مه- دود در حومه شهر بیشتر از نقاط داخلی می باشد (موسوی، ۱۳۸۱: ۴۴).

منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد با دو میلیون و هشتصد و هفت هزار و چهارصد و شصت و چهار نفر دومین کلان شهر ایران می- باشد (حاتمی، ۱۳۹۳: ۴۴). وسعت شهر حدود ۳۰۰ کیلومتر مربع است (جهانشیری، ۱۳۸۹: ۲۵) و در ۱۵.۵۹ تا ۶۰.۳۶ درجه طول جغرافیایی و ۳۵.۴۳ تا ۳۷.۸ درجه عرض جغرافیایی در دشت مشهد واقع شده است (حاتمی، ۱۳۹۳: ۴۴). این شهر یکی از شهرهای صنعتی، مذهبی و اقتصادی و همچنین جز پر ترددترین شهرهای ایران می باشد. رشته کوه هزار مسجد در شمال شرقی، بینالود در غرب و جنوب غربی، شهرستان سرخس در شرق و نیشابور و چناران از غرب این شهر را محاصره کرده اند (صادقی، ۱۳۹۳: ۱). حداقل ارتفاع این منطقه از سطح دریا ۷۵۰ و حداکثر آن ۱۸۰۰ و ارتفاع متوسط آن ۹۴۳ متر است. قسمت اعظم دشت مشهد دارای اقلیمی سرد و خشک می باشد. متوسط دمای هوا در ایستگاه هواشناسی مشهد ۱۳.۵ درجه سانتیگراد گزارش شده است. تعداد روزهای یخبندان در طول سال به طور متوسط ۱۰۰ روز است. همچنین شهر مشهد به عنوان پایتخت معنوی ایران سالانه به طور میانگین میزبان حدود بیست میلیون زائر و مسافر می باشد؛ که نتیجه آن شلوغی شهر و آلودگی هوا است. بر پایه آمار رسمی موجود، حدود ۴۳۰ هزار دستگاه خودرو در این شهر وجود دارد که بیشتر خودروها از سوخت فسیلی استفاده می کنند و در شهرک صنعتی نیز بیشتر از سوخت های فسیلی است (شم آبادی، ۱۳۸۶: ۵۴). شکل (۱).

^۹ Zhou

^{۱۰} Zhang



شکل (۱). توپوگرافی استان خراسان رضوی و شهرستان مشهد. رنگ سبز محدوده شهرستان ها و نوار رنگ ارتفاع برحسب متر از سطح آب های آزاد را نشان می دهد (منبع: نگارندگان)

روش تحقیق

به مجموعه ای از مشاهدات که براساس زمان یا هر کمیت دیگر مرتب شوند سری زمانی می گویند. سری زمانی از اجزای تغییرات فصلی، روند و باقی مانده تشکیل می شود (مشهدی زاده، ۱۳۹۳: ۱۹). مطالعه روند یک پدیده ما را از سیر تاریخی آن مطلع می سازد و سبب توسعه فعالیت ها و برنامه های مدیریتی مناسب برای آینده می شود. با مطالعه روند می توان میزان تاثیر عوامل موثر بر آن را شناسایی کرد و اثرات آن در سری زمانی را مشخص نمود. آنالیز سری زمانی به طور کلی به دو بخش تقسیم می شود: روش هایی که سری زمانی را در قلمرو زمان بررسی می کنند و روش هایی که سری زمانی را در قلمرو فرکانس تحلیل می کنند، روش های سری دوم براساس آنالیز طیفی انجام می شوند. اغلب روش های آنالیز طیفی از الگوریتم FFT^{11} استفاده می کنند. روش FFT در آنالیز طیفی روش کاملی نیست و دارای محدودیت هایی می باشد (اکبری، ۱۳۹۰). ونیچک در سال ۱۹۷۱ روش آنالیز طیفی کمترین مربعات را ارائه داد که محدودیت های موجود در روش FFT را ندارد (Vanicek, 1971: 10). از مزیت های روش آنالیز طیفی کمترین مربعات اعتبارسنجی آماری می باشد که در سال ۱۹۹۹ توسط پاگیاتاکیس ارائه شد و به کمک آن مولفه های هارمونیک معنی دار شناخته می شوند (Pagiatakis, 1999: 67). برای مطالعه بیشتر به منابع ذکر شده مراجعه شود و برخی از روابط به اختصار در اینجا آورده شده است.

¹¹ Fast Fourier transform

$f=[f_1, f_2, f_3, \dots, f_n]$ به عنوان سری زمانی در نظر گرفته شده است. از رابطه (۱) برای محاسبه طیف کمترین مربعات استفاده شده است و $p(w_j)$ از رابطه (۲) بدست می‌آید که در آن C بردار مجهولات می‌باشد.

$$S(w_j) = \frac{f^T P(w_j)}{f^T f} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$p(w_j) = \hat{c}_1 \sin(w_j t) + \hat{c}_2 \cos(w_j t) \quad \text{رابطه (۲)}$$

نتایج

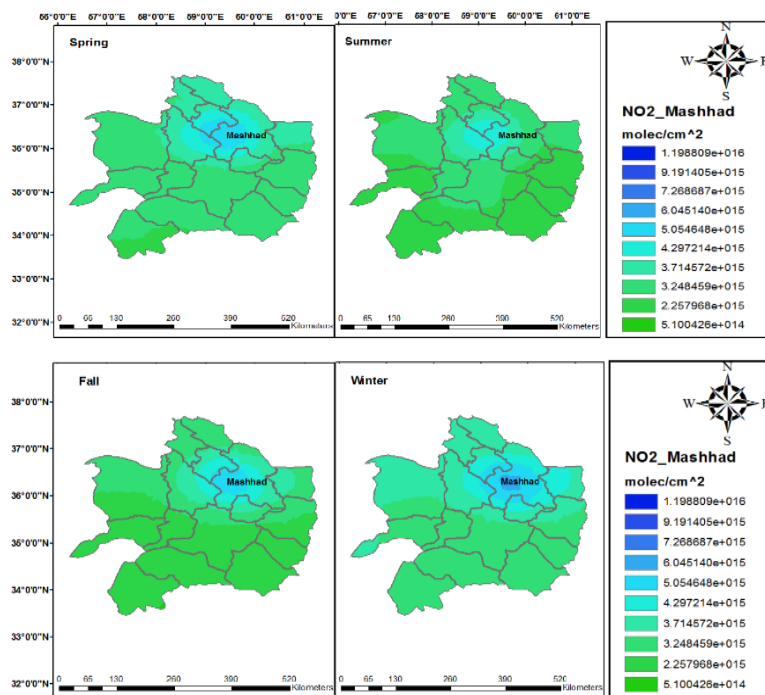
از جمله ماهواره‌هایی که آلاینده‌های هوا را مورد بررسی قرار می‌دهند ^{۱۲}SCIAMACHY, GOME, TOMS و OMI هستند و قدرت تفکیک مکانی و طیفی OMI در مقایسه با بقیه سنجنده‌ها بهبود یافته است. AURA ماهواره علمی- پژوهشی است و برای بررسی لایه ازن، آلودگی هوا و تغییرات اقلیم در مدار زمین قرار گرفته است. این ماهواره در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری در مدار خورشید آهنگ ^{۱۳} قرار دارد و لحظه گذر آن ساعت ۱۳:۴۵ به وقت محلی می‌باشد. سنجنده OMI برای بررسی آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید نیتروژن، ازن، هواویزها و دی‌اکسید کلر در آگوست ۲۰۰۴ بر روی ماهواره AURA قرار گرفت. تصویربرداری آن به گونه‌ای است که از ۱۴ تا ۲۶ کیلومتر مربع در نادر ^{۱۴} و ۲۸ تا ۱۶۰ کیلومتر مربع در اطراف قرار دارد و این چنین روزانه با تفکیک مکانی ۰,۲۵ درجه از کل زمین داده‌برداری می‌کنند. برای بررسی آلودگی هوای ناشی از دی-اکسید نیتروژن در شهر مشهد از داده‌های این سنجنده در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ می‌باشد. بررسی غلظت دی‌اکسید نیتروژن سنجنده OMI در شهر مشهد نرم‌افزار ARCGIS بوده است و داده‌ها به صورت فصلی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) میانگین دی‌اکسید نیتروژن به ترتیب برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان برای استان خراسان رضوی را در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ نشان می‌دهد و نوار رنگ برای تمامی شکل‌ها یکسان است. همانطور که مشاهده می‌کنیم در استان خراسان رضوی بیشترین غلظت دی‌اکسید نیتروژن شهرستان مشهد بوده است. به طوری که در فصل تابستان بیشینه مقدار آن در غرب شهرستان مشهد بوده است و مقایسه شکل در فصل بهار و پاییز نشان می‌دهد که در برخی مکان‌ها مقدار دی‌اکسید نیتروژن در فصل بهار بیشتر از پاییز بوده است و در این فصل‌ها نیز غرب شهرستان آلوده‌تر می‌باشد. غلظت این شاخص آلودگی در زمستان بیشتر از بقیه فصل‌ها می‌باشد و در این فصل به سمت مرکز شهر کشیده شده است. بنابراین می‌توان گفت که در استان خراسان رضوی، شهرستان مشهد نسبت به شاخص دی‌اکسید نیتروژن آلوده‌تر از بقیه شهرستان‌ها بوده است و بیشینه مقدار آن در غرب و مرکز این شهرستان می‌باشد. بیشینه مقدار دی‌اکسید نیتروژن در فصل زمستان و کمینه مقدار آن در فصل تابستان مشاهده می‌شود. همچنین بررسی روند آلودگی هوا در طی سال‌های قبل نشان داده که بیشترین سطح آلودگی در فصل‌های پاییز و زمستان و ماه‌های آذر تا بهمن رخ داده است؛ که آن را می‌توان به پدیده وارونگی هوا و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در طی فصل‌های پاییز و زمستان نسبت داد. گلریز ضیایی با توجه به نقشه‌های آلودگی نشان داده است که

¹² Total Ozone Mapping Spectrometer

¹³ Sun Synchronous Orbit

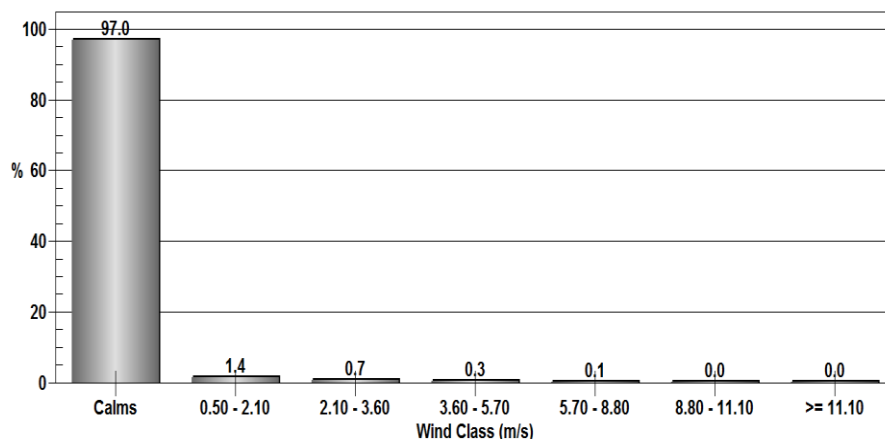
¹⁴ Nadir

بیشترین تراکم آلودگی در مناطق مرکزی شهر بوده و با حرکت به سمت حومه از شدت آن کاسته شده است (گلریز ضیایی، ۱۳۸۹: ۱).



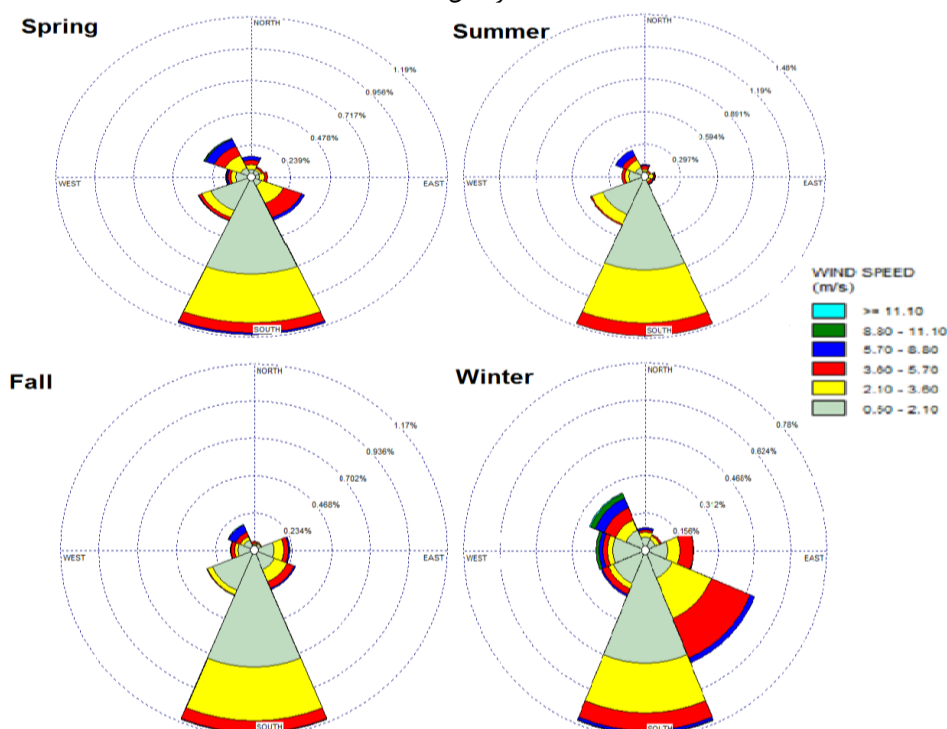
شکل (۲). میانگین دی اکسید نیتروژن به ترتیب برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان برای بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶. نوار رنگ برای تمامی شکل‌ها یکسان است (منبع: نگارندگان).

برای بررسی دقیق‌تر از داده‌های باد، دمای سطحی و دید افقی ایستگاه سینوپتیک مشهد که هر ۳ ساعت یکبار براساس زمان جهانی گزارش شده است، برای بررسی ارتباط بین آلودگی هوای ناشی از دی اکسید نیتروژن برای بازه زمانی ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ استفاده شده است. از نرم افزار WRPLOT view جهت ترسیم گلباد بوده است. شکل (۳) نمودار توزیع فراوانی باد را نشان می‌دهد که محور افقی کلاس‌های باد بر حسب متر بر ثانیه و محور عمودی درصد را نشان می‌دهند. تقریباً ۹۷ درصد بادهای شهر مشهد سرعتی کمتر از ۰٫۵ متر بر ثانیه دارند که به آن‌ها بادهای آرام می‌گویند. شکل (۴) جهت وزش باد به ترتیب برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان را نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنیم باد غالب در شهر مشهد از سمت جنوب می‌وزد و در فصل زمستان علاوه بر باد جنوبی باد جنوب شرقی نیز دیده می‌شود.

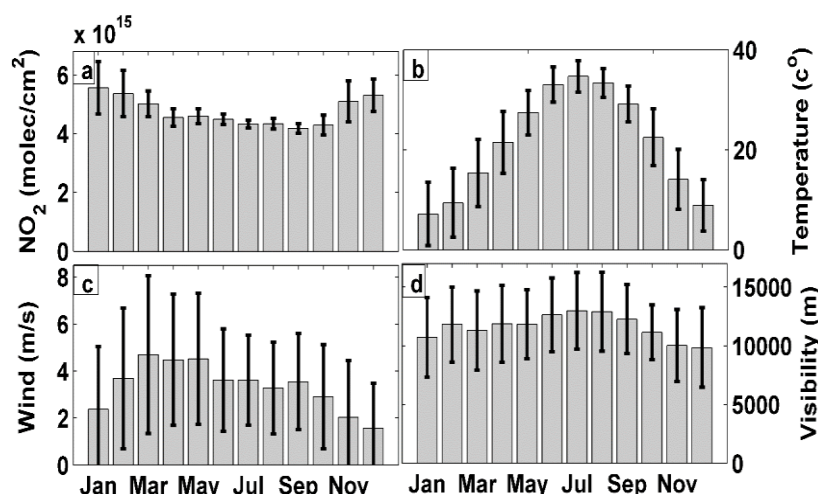


شکل (۳). توزیع فراوانی سرعت باد شهر مشهد در بازه ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک (منبع:

نگارندگان).

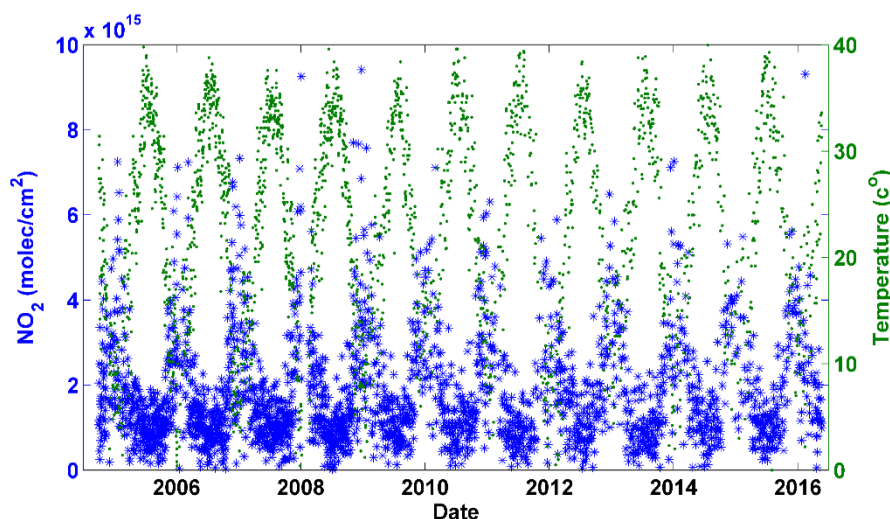


شکل (۴). جهت وزش باد برای ایستگاه سینوپتیک شهر مشهد به ترتیب برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در بازه اندازه‌گیری بین ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶. نوار رنگ برای تمام شکل‌ها یکسان است (منبع: نگارندگان)



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

میانگین ماهانه مشترک (a) دی اکسید نیتروژن، (b) دمای سطحی، (c) باد و (d) دید افقی شهر مشهد برای بازه اندازه گیری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ در شکل (۵) آورده شده است. بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن در ماه ژانویه برابر $5.56 \times 10^{15} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$ و کمترین مقدار آن در ماه سپتامبر برابر $4.18 \times 10^{15} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$ می باشد. انحراف معیار دی اکسید نیتروژن در زمستان بیشترین مقدار و در تابستان کمترین مقدار را دارد. میانگین ماهانه مشترک دمای سطحی برای شهر مشهد در شکل 5b نشان می دهد که در ماه های میانی سال میلادی دما بیشترین مقدار را دارد و انحراف معیار دما در فصل های سرد سال بیشتر می باشد. شکل 5c میانگین ماهانه مشترک باد نشان می دهد، بیشترین مقدار در ماه های ژوئن و جولای و کمترین مقدار آن در ماه دسامبر اتفاق می افتد. انحراف معیار باد در ماه های مارس و آوریل بیشترین و در ماه جولای کمترین مقدار را دارد. در شکل 5d میانگین ماهانه مشترک دید افقی آورده شده است که نشان می دهد دید افقی در تمام ماه ها تقریباً مقدار یکسانی دارد و انحراف معیار نیز تغییرات قابل ملاحظه ای را نشان نمی دهد.



شکل (۶). سری زمانی دی اکسید نیتروژن و دما در بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر مشهد (منبع: نگارندگان).

سری زمانی دی اکسید نیتروژن و دما در بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر مشهد در شکل (۶)، رابطه معکوس بین دما و تغییرات دی اکسید نیتروژن را نشان می دهد. به طوری که در روزهای سرد سال یعنی در روزهای ابتدایی و انتهایی هر سال میلادی دی اکسید نیتروژن بیشترین و دما کمترین مقدار را دارد و در روزهای گرم سال یعنی در روزهای میانی هر سال میلادی بالعکس می باشد.

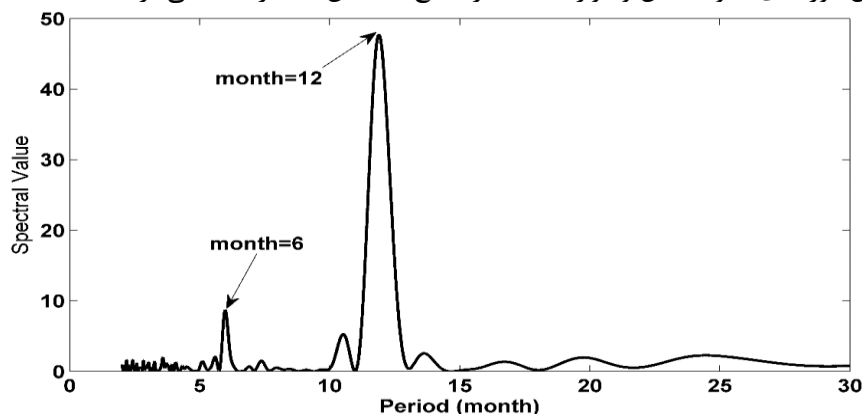
جدول (۱). میانگین و انحراف معیار باد ($\frac{m}{s}$)، دما ($^{\circ}C$)، دید افقی (m)، دی اکسید نیتروژن ($\frac{molec}{cm^2}$)، ضریب همبستگی بین دی اکسید نیتروژن با باد، دما و دید افقی برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان و کل بازه اندازه گیری بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر مشهد (منبع: نگارندگان)

مشهد	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	کل
میانگین باد	۴,۵۹	۵,۷۸	۲,۷۷	۲,۶۳	۴,۱۷
میانگین دما	۲۶,۷۰	۳۲,۹۷	۱۹,۰۶	۱۲,۱۵	۲۴,۱۲
میانگین دید افقی (10^4)	۱,۲۰	۱,۲۷	۱,۰۵	۱,۰۹	۱,۱۷
میانگین دی اکسید نیتروژن (10^{15})	۱,۳۲	۰,۹۷	۲,۱۶	۲,۹۳	۱,۷۱
انحراف معیار باد	۲,۲۱	۲,۲۸	۱,۹۶	۲,۱۵	۲,۵۳
انحراف معیار دما	۶,۰۸	۳,۶۲	۷,۱۹	۵,۸۴	۹,۴۹
انحراف معیار دید افقی (10^3)	۳,۲۷	۳,۲۸	۲,۹۶	۳,۳۳	۳,۳۴
انحراف معیار دی اکسید نیتروژن (10^{15})	۰,۷۰	۰,۴۸	۱,۳۵	۱,۵۷	۱,۲۶
ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با دما	-۰,۳۰	-۰,۱۰	-۰,۴۲	-۰,۰۵	-۰,۵۷
ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با باد	-۰,۲۰	-۰,۰۴	-۰,۲۵	-۰,۰۴	-۰,۳۶
ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با دید افقی	۰,۰۰	۰,۰۹	-۰,۰۷	-۰,۰۳	-۰,۱۵

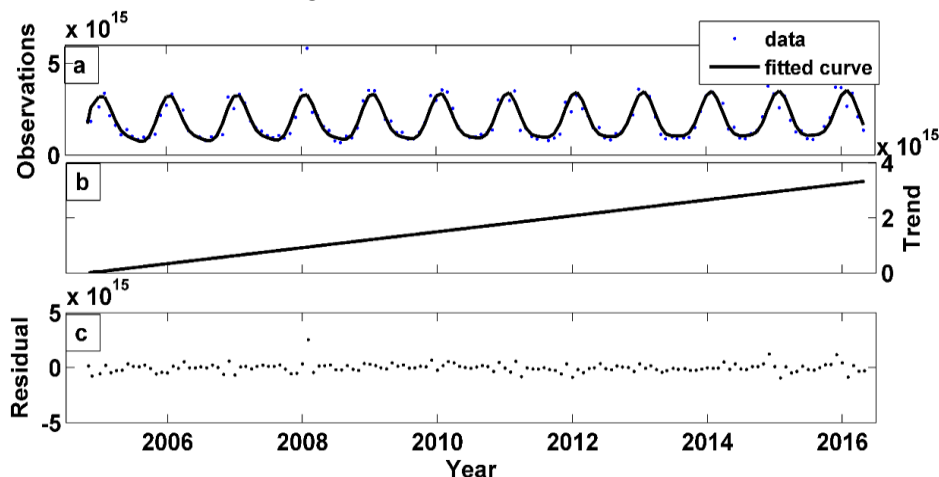
در جدول (۱) میانگین و انحراف معیار باد، دمای سطحی، دید افقی و دی اکسید نیتروژن و ضریب همبستگی بین دی اکسید نیتروژن با باد، دمای سطحی و دید افقی برای تمامی فصل‌ها و کل بازه اندازه‌گیری بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ آورده شده است. کمترین مقدار باد در فصل زمستان و بیشترین مقدار آن در فصل تابستان مشاهده می‌شود. انحراف معیار باد در فصل تابستان بیشترین و در پاییز کمترین مقدار را دارد. برای میانگین دمای سطحی مشاهده می‌کنیم که بیشترین مقدار در تابستان و کمترین مقدار آن در فصل زمستان رخ می‌دهد به طوری که انحراف معیار آن در پاییز بیشترین و در تابستان کمترین مقدار را دارد. میانگین دید افقی برای شهر مشهد برای بازه مورد مطالعه در تابستان بیشترین و در پاییز کمترین مقدار مشاهده می‌شود. تقریباً انحراف معیار دید افقی در تمامی فصل‌ها مقدار نزدیک بهم دارند و تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهند. بیشترین مقدار میانگین دی اکسید نیتروژن در فصل‌های زمستان و پاییز و کمترین مقدار آن در فصل‌های بهار و تابستان رخ می‌دهد. انحراف معیار آن نیز در فصل‌های سرد بیشتر از فصل‌های گرم می‌باشد؛ در زمستان دمای هوا کمتر بوده و جو پایدارتر می‌باشد و اغلب در زمستان هوا آلوده‌تر است و در برخی از روزها بارش باران یا برف موجب تمیز شدن جو می‌شوند. بنابراین تغییرات جو در زمستان از لحاظ آلودگی هوا زیاد است که موجب بالا بودن انحراف معیار دی اکسید نیتروژن در این فصل می‌شوند. ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با باد و دمای سطحی به ترتیب -0.36 و -0.57 بدست آمد که اهمیت بیشتر دما را برای شهر مشهد نشان می‌دهد. همچنین ضریب همبستگی دید افقی برای این شهر -0.15 می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش آلودگی هوای ناشی از دی اکسید نیتروژن دید افقی کاهش می‌یابد.

استخراج روند دی اکسید نیتروژن

برای شناخت خصوصیات و رفتار توابع، می‌توان آن‌ها را در فضای فرکانس بررسی کرد. در اینجا پس از تشکیل سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن بین بازه اندازه‌گیری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶، با استفاده از آنالیز طیفی کمترین مربعات دوره‌های تناوب شش و دوازده ماهه مشاهده شد. طیف سری زمانی دی اکسید نیتروژن برای پیکسل بالاسر شهر مشهد در شکل (۷) آورده شده است. محور عمودی مقدار طیف بدست آمده از روش آنالیز طیفی کمترین مربعات و محور افقی دوره تناوب بر حسب ماه را نشان می‌دهد. با کمک تست آماری پاکیاتاکیس دوره‌های تناوب شش و دوازده ماهه در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار شناخته شدند.



شکل (۷). طیف پیکسل بالاسر شهر مشهد (منبع: نگارندگان)



شکل (۸). (a) سری زمانی ماهانه دی اکسید نیتروژن اندازه گیری شده برای پیکسل متناظر شهر مشهد و سری زمانی مدل شده آن، (b) روند و (c) سری زمانی باقیمانده (منبع: نگارندگان)

برای محاسبه روند دی اکسید نیتروژن مولفه های معنی دار از سری زمانی حذف می شوند. پس از حذف مولفه های معنی دار شش و دوازده ماهه از سری زمانی دی اکسید نیتروژن، با استفاده از برازش خطی بر روی سری زمانی باقیمانده روند محاسبه می شود. در شکل (۸)، (a) سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن اندازه گیری شده برای پیکسل بالاسر شهر مشهد و سری زمانی مدل شده آن، (b) روند و (c) سری زمانی باقیمانده برای بازه اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ ترسیم شده است. مقدار روند دی اکسید نیتروژن برای شهر مشهد در هر سال $2.41 \times 10^{13} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$ می باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله از داده های دی اکسید نیتروژن سنجنده OMI و پارامترهای هواشناسی مانند باد، دمای سطحی و دید افقی به منظور بررسی آلودگی هوای ناشی از دی اکسید نیتروژن شهر مشهد در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ استفاده شده است. نتایج نشان می دهند بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن در ماه ژانویه برابر $5.56 \times 10^{15} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$ و کمترین مقدار آن در ماه سپتامبر برابر $4.18 \times 10^{15} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$ رخ می دهد. بررسی پارامترهای هواشناسی نشان می دهند که دی اکسید نیتروژن با دما رابطه معکوس دارد به طوری که در ماه های سرد (گرم) سال دما کاهش (افزایش) می یابد و دی اکسید نیتروژن بیشتر (کمتر) می شود. در شهر مشهد در فصل تابستان باد بیشترین مقدار خود را دارد و در فصل زمستان کمترین مقدار است و اغلب بادهای مشهد آرام هستند و باد غالب این شهر از سمت جنوب می باشد. ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با باد و دمای سطحی به ترتیب برابر -0.36 و -0.57 است که نشان می دهد دما در افزایش آلودگی ناشی از دی اکسید نیتروژن نقش مهم تری نسبت به باد دارد. همانطور که گفته شد از دیگر عواملی که در آلودگی هوا موثر هستند توپوگرافی می باشد. شهر مشهد از شمال، جنوب و جنوب غربی توسط کوه ها محاصره شده است و

همچنین دارای آب و هوایی سرد و خشک نیز می باشد؛ همه این عوامل سبب وارونگی دمایی در این شهر می شود. هنگامی که وارونگی دمایی رخ می دهد آلاینده های هوا نمی توانند از محیط خارج شوند و در این صورت تهویه طبیعی به خوبی انجام نمی شوند به عبارتی آلاینده ها در بالای هوای شهر باقی می ماند که سبب تیرگی هوا می شوند. یکی از راه های ساده برای تشخیص آلودگی هوا دید افقی می باشد و ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با دید افقی برابر ۰,۱۵- است. از طرفی مشهد به عنوان اولین کلان شهر مذهبی سالانه میلیون ها زائر از سراسر ایران و جهان دارد و این باعث می شود در ایامی از سال خودروها در شهر افزایش قابل توجهی داشته باشند و آلودگی هوا ناشی از آگروز خودروها که بیشترین سوخت آن ها، سوخت فسیلی است افزایش یابد. اکثر مناطق صنعتی نیز در شهر مشهد از سوخت فسیلی استفاده می کنند. در نتیجه همه این عوامل در افزایش آلودگی هوا در شهر مشهد موثر هستند و جهت کاهش بیماری های ناشی از آلودگی هوا و حفظ سلامت محیط زیست باید اقدامات قابل توجهی صورت گیرد. از اقداماتی که جهت کاهش آلودگی هوا می توان انجام داد درختکاری می باشد. به طوری که جوشنی و همکارانش به ارزیابی و پیش بینی وضعیت فضای سبز مشهد پرداختند و نتایج آن ها نشان داد که شهر مشهد برای ایجاد تعادل در مرکز شهر و سایر مناطق نیازمند نگهداری فضاهای سبز و توسعه آن است (جوشنی، ۱۳۹۱). با استفاده از آنالیز طیفی کمترین مربعات نیز دوره های تناوب شش و دوازده ماهه بدست آمدند. پس از حذف این مولفه ها از سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن و برازش خطی روی سری زمانی باقیمانده روند محاسبه شد. مقدار روند دی اکسید نیتروژن برای شهر مشهد در هر سال برابر $2.41 \times 10^{13} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^2}$ است. شکوهمان و همکارانش نیز تغییرات غلظت آلاینده های شاخص هوا طی ۳۶ ماه منتهی به سال ۱۳۹۶ را برای شهر مشهد مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد غلظت آلاینده دی اکسید نیتروژن در شهر مشهد برای بازه مورد مطالعه با گذشت زمان افزایش یافته است (شکوهمان و همکاران، ۱۳۹۶). مطالعه میری و همکارانش تحت عنوان بررسی روند تغییرات شاخص کیفیت بهداشتی هوا (AQI) در شهر مشهد با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) نشان دادند که منشا اصلی آلودگی هوا در این شهر تردد وسایل نقلیه می باشد و در اوایل بهار نیز منشا تولید آلاینده ها، سوخت مورد نیاز برای گرمایش منازل و اماکن عمومی می باشد و بیشترین آلاینده ذرات معلق و دی اکسید نیتروژن بوده است (میری و همکاران، ۱۳۹۵).

منابع

- احدی، لیلان. (۱۳۹۴). *مطالعه آلاینده های جو-آستانه سلامتی در شهر تبریز طی دوره آماری ۲۰۰۴-۲۰۱۳*. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- اکبری، معصومه. (۱۳۹۰). *بررسی تغییرات سطح دریای خزر با استفاده از داده های ماهواره های ارتفاع سنجی*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۳۹۰.
- بنتلی، ای.ین. (۱۳۸۲). *محیط های پاسخده*. انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ترجمه مصطفی بهزادپور.
- بوتکین، دانیل؛ کلر، ادوارد، ترجمه وهاب زاده. (۱۳۸۲). *شناخت محیط زیست (زمین سیاره ی زنده)*، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.

- ثابت قدم، سمانه؛ احمدی گیوی، فرهنگ؛ گلستانی، یحیی؛ علی اکبری بیدختی، عباسعلی. (۱۳۹۲). ارتباط آلاینده‌های شهری با دید افقی منطقه تهران در سال ۲۰۰۸، مجله فیزیک زمین و فضا.
- جوشنی، زینب. (۱۳۹۱). ارزیابی و پیش‌بینی وضعیت فضای سبز شهری با استفاده از مفاهیم بوم‌شناسی سیمای سرزمین (مطالعه موردی: مشهد - سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۴۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- جهانشیری، مهین. (۱۳۸۹). بررسی آماری و سینوپتیکی آلودگی هوای مشهد، دانشگاه تربیت معلم سبزوار.
- حاتمی، حسین. (۱۳۸۳). کتاب جامع بهداشت عمومی، انتشارات ارجمند.
- حاتمی، مریم. (۱۳۹۳). ارزیابی تاثیر ترکیب و توزیع فضایی لکه‌های سبز شهری بر آلودگی هوا (مطالعه موردی شهر مشهد)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۱۳۹۳.
- حسین آبادی، محمد. (۱۳۹۳). اثرات فراسنج‌های آب و هوایی و آلاینده‌های هوا بر ازن سطحی و تابش فرابنفش در اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- شکوهیان، محمد؛ صدیق، وحیده؛ عمرانی، نیما. (۱۳۹۶). آنالیز روند منحنی تغییرات غلظت آلاینده‌های شاخص هوا طی ۳۶ ماه منتهی به سال ۱۳۹۶ و بررسی اقلیم بر شاخص‌های AQI و PSI؛ مطالعه موردی: شهر مشهد، ایران. سومین همایش ملی و سومین همایش بین‌المللی معماری، عمران و شهرسازی.
- شم‌آبادی، احمد. (۱۳۸۶). حاشیه نشینی در کلان شهر مشهد با تاکید بر مدیریت شهری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- صادقی، سلیمان؛ مفیدی، عباس؛ جهانشیری، مهین؛ دوستان، رضا. (۱۳۹۳). نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱: ۱۰-۳۵.
- عباسپور، مجید. (۱۳۸۹). مدل‌سازی آلودگی هوا، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف.
- عجمی تربقان، نرگس. (۱۳۹۴). تاثیر عناصر اقلیمی و آلودگی هوا بر میزان مرگ و میر ناشی از سکته قلبی در شهر مشهد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.
- علیجانی، بهلول؛ نجفی نیک، زهرا (۱۳۸۸). بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای.
- غیاث‌الدین، منصور. (۱۳۸۵). آلودگی هوا - منابع اثرات و کنترل، انتشارات دانشگاه تهران.
- گلریز ضیایی، زهرا؛ صادقی حصار، حمید؛ معتمدی، محمد؛ ژاله رجبی، میترا. (۱۳۸۹). پیش‌بینی، ارزش‌گذاری و ترسیم نقشه آلودگی هوای شهر مشهد: مطالعه موردی گاز منوکسید کربن، صص ۱-۱۱.
- مشهدی‌زاده ملکی، سعید. (۱۳۹۳). تحلیل فرکانسی سری‌های زمانی درجه حرارت اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳.
- موسوی، محمد؛ معروف، محمد صادق؛ نائینی، امین. (۱۳۸۱). بررسی پتانسیل تشکیل مه دود فتوشیمیایی ناشی از صنایع در مشهد، نشریه نیوار. ۲۰: ۴۴-۴۵.

میری، محمد؛ محمدی، امیر؛ نعمتی، سپیده؛ عبدالله نژاد، علی؛ نیکونهاد؛ علی. (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات شاخص کیفیت بهداشتی هوا (AQI) در شهر مشهد با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مجله تحقیقات سلامت در جامعه، ۱۳۹۵.

Ghude, S. D., Van der A, R. J., Beig, G., Fadnavis, S. (2009). Trends in NO₂ over the major global hotspot.

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

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.

Pagiatakis, S. D. (1999). Stochastic significance of peaks in the least- squares spectrum. Journal of Geodesy, 73(2), 67-78.

Samet JM and et al. The National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study. Health Effects Institute.

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.

Shepard, Ch.(2004). Sea surface temperature 1871-2009 in 14 cells around the United Kingdom. Marine Pollution Bulletin.

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 NO₂ over China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111(D12).

Vanicek, P. (1971). Further development and properties of the spectral analysis by leastsquares. Astrophysics and Space Science, 12(1), 10-33.

www.irimo.ir.

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. Pagiatakis, S. D. (1999). Stochastic significance of peaks in the least- squares spectrum. Journal of Geodesy, 73(2), 67-78.

Zhou, Y., Brunner, D., Hueglin, C., Henne, S. and 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.