

بررسی آلودگی هوای شهر اصفهان براساس آلاینده دی اکسید نیتروژن اندازه گیری شده با سنجنده اُمی

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۱۰ پذیرش نهایی: ۹۸/۶/۲۱

صفحات: ۴۱-۵۵

عاطفه شاه محمدی: کارشناس ارشد فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

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

علی بیات: استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۱.

Email: abayat@znu.ac.ir

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

Email: Saeed.mashhadizadeh@trn.ui.ac.ir

چکیده

یکی از مهم ترین مشکلات شهرهای بزرگ آلودگی هوا است که می تواند برای سلامت انسان ها و محیط زیست زیان آور باشد. اصفهان نیز یکی از شهرهای آلوده ایران است. موقعیت جغرافیایی آن، سرعت کم باد، فعالیت های صنعتی، حمل و نقل، کشاورزی و دیگر فعالیت های انسانی شرایط بحرانی آلودگی هوا را برای این شهر ایجاد کرده است. دی اکسید نیتروژن، یکی از آلاینده های مهم آلودگی هوا است که با استفاده از ایستگاه های زمینی و اندازه گیری های ماهواره ای پایش می شود. در این مقاله از داده های روزانه دی اکسید نیتروژن سنجنده اُمی، باد و دمای سطحی ایستگاه هواشناسی اصفهان بین بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ استفاده شده است. مقدار میانگین دی اکسید نیتروژن در بازه اندازه گیری شده $10^{15} \times 6/43$ مولکول بر سانتی متر مربع می باشد. بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن $10^{15} \times 14/78$ مولکول بر سانتی متر مربع در دسامبر و کمترین مقدار آن $10^{15} \times 6/93$ مولکول بر سانتی متر مربع در جولای مشاهده شد. انحراف معیار فصل زمستان، $10^{15} \times 5/97$ مولکول بر سانتی متر مربع، بیشتر از فصل تابستان، $10^{15} \times 1/66$ مولکول بر سانتی متر مربع است. ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن با باد و دما به ترتیب برابر $0/41$ و $-0/54$ به دست آمد که نشان دهنده اهمیت بیشتر دما در تغییرات دی اکسید نیتروژن می باشد. پس از تشکیل سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن با استفاده از آنالیز طیفی کمترین مربعات دوره های تناوب معنی دار شناخته شدند. این دوره های تناوب معنی دار از سری زمانی حذف شده و با برازش خطی بر روی سری زمانی باقیمانده، روند محاسبه شده است. روند دی اکسید نیتروژن برای اصفهان برابر $10^{14} \times 1/62$ مولکول بر سانتی متر مربع در هر سال به دست آمد که در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار است.

کلید واژگان: آلودگی هوا، دی اکسید نیتروژن، آنالیز طیفی کمترین مربعات، سنجنده اُمی، اصفهان

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

مقدمه

از مسائل مهم در بررسی آب و هوا که تاثیر زیادی در سلامتی موجودات زنده در یک منطقه دارد، مسئله آلودگی هوا است (یاوری و همکاران، ۱۳۹۰). وجود هر نوع آلاینده که برای زندگی انسان، گیاهان، جانوران و اموال مضر باشد و کیفیت زندگی را به خطر اندازد آلودگی هوا می‌گویند که می‌تواند منابع طبیعی یا مصنوعی داشته باشد (آلودگی هوا و سلامت انسان، ۱۳۹۴). مشکلات مربوط به آلودگی هوا به میزانی بوده که مدت‌ها است زنگ خطر برای شهرهای بزرگ به صدا در آمده است. اصفهان نیز شاهد مسائل متعدد جوی در رابطه با کیفیت محیط زیست طبیعی خود می‌باشد (کاظمی بومه، ۱۳۸۸). قرار گرفتن در معرض آلاینده‌ها و ذرات معلق در هوا منجر به تشدید بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی، کاهش ایمنی بدن، ابتلا به سرطان و مرگ زودرس می‌شود (آلودگی هوا و سلامت انسان، ۱۳۹۴). طبق گزارشات سازمان جهانی بهداشت، سالیانه حدود ۵۰۰ هزار نفر در اثر آلودگی هوا دچار مرگ زودرس می‌شوند (Cohen et al, 2005). از مهم‌ترین عوامل تشدید کننده آلودگی هوا در دهه‌های اخیر به‌خصوص در شهرهای بزرگ افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی، افزایش مراکز صنعتی، استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌باشد (<http://air.tehran.ir>). متأسفانه موقعیت جغرافیایی اصفهان، سرعت کم بادهای آن، فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی، حمل و نقل و دیگر فعالیت‌های انسانی مرتبط در برخی ایام سال شرایط بحرانی آلودگی هوا را برای این شهر ایجاد کرده است (نوریخس، ۱۳۹۱).

آلاینده‌های هوا را می‌توان به دو دسته آلاینده‌های اولیه و ثانویه طبقه‌بندی کرد. آلاینده‌های اولیه آلاینده‌هایی هستند که به طور مستقیم از منابع تولید کننده منتشر می‌شوند و آلاینده‌های ثانویه در اثر برهم کنش عواملی مانند نور خورشید 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، دی‌اکسید نیتروژن ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) و ترکیبات هیدروکربنی تولید می‌شوند (شاهمحمدی، ۱۳۹۴). دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) گازی به رنگ قهوه‌ای سرخ فام است و بویی بسیار زننده دارد و از گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌آید (آلودگی هوا و سلامت انسان، ۱۳۹۴). چشمه‌های اصلی دی‌اکسید نیتروژن فعالیت‌های انسانی مانند صنعت، ترافیک وسایل نقلیه موتوری و سوزاندن گیاهان می‌باشد. چشمه‌های طبیعی مثل برق ناشی از تخلیه الکتریکی رعد و برق ابرها، آتش‌سوزی جنگل، گسیل ناشی از خاک است (شرعی پور و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۸). غلظت دی‌اکسید نیتروژن شامل گسیل‌های اولیه از وسایل نقلیه و تشکیل ثانویه در اثر واکنش شیمیایی منوکسید نیتروژن با ازن است (Shon et al, 2011). دی‌اکسید نیتروژن در واکنش با بخار آب موجود در هوا اسید نیتریک تولید می‌کند که باعث پوسیدگی فلزات می‌شود. در شرایط جوی ساکن غلظت دی‌اکسید نیتروژن در جو افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند که در برخی موارد ایجاد مه-دود کرده و میدان دید را کاهش می‌دهد و موجب گرم شدن زمین می‌شود (Challen et al, 1958).

پارامترهای جوی و هواشناسی از جمله عوامل مهم و اساسی در شناخت آلودگی هوا به حساب می‌آیند که به کمک آن‌ها می‌توان ارزیابی و بررسی دقیق‌تری از وضعیت آلودگی هوا به دست آورد (کاظمی بومه، ۱۳۸۸). در حالت طبیعی با افزایش ارتفاع از سطح زمین، دما کاهش می‌یابد و هوای مجاور سطح زمین گرم‌تر و سبک‌تر از بخش‌های بالایی می‌شود. گاهی برخلاف حالت طبیعی، در مجاور سطح زمین با افزایش ارتفاع، دما نیز افزایش

می‌یابد. در چنین مواقعی، به علت سردتر و سنگین تر بودن هوای پایین، حرکت صعودی و جابه‌جایی هوا به سمت بالا وجود ندارد و هوا به حالت ساکن در می‌آید که به این وضعیت وارونگی دمایی^۱ گفته می‌شود. این وضعیت معمولاً در شب‌های آرام و بدون ابر زمستان اتفاق می‌افتد. با طلوع آفتاب و گرم شدن دوباره زمین بخش‌های سرد هوا نیز گرم شده و موجب رفع حالت وارونگی می‌شود. سمت و سرعت باد، وجود رشته کوه‌ها و جهت آن‌ها نسبت به باد غالب از عوامل موثر در وارونگی دما هستند. پدیده وارونگی دمایی در کلان شهرهایی مانند اصفهان و تهران اهمیت بسیاری دارد زیرا در این حالت هوا ساکن است و آلایندہ‌های هوا نمی‌توانند پراکنده شوند (زمین شناسی، ۱۳۹۰). آلودگی هوا یک مسئله در مقیاس ملی و فراملی است و از رویدادهایی است که توجه بسیاری از اندیشمندان را به خود جلب کرده است و پژوهش‌های علمی در رابطه با آلودگی هوا رو به افزایش است. برخی از پژوهش‌های علمی در زمینه‌ی آلودگی هوا در جهان به شرح زیر است:

روآ^۲ و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی روند و تغییرات فصلی آلایندہ‌های دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد در هوای اسپانیا پرداختند. هدف از مطالعه آن‌ها برآزش مدل مناسب برای روند این پارامترها بود. نتایج نشان دادند که مدل مناسب برای این دو پارامتر مدل خطی درجه یک می‌باشد. آلایندہ دی اکسید گوگرد روند کاهشی داشته و فاقد الگوی فصلی مشخص بوده است. در حالی که روند آلایندہ دی اکسید نیتروژن افزایشی بوده و دارای الگوی فصلی مشخص می‌باشد. ژانگ^۳ و همکاران (۲۰۰۳) نیز آثار چشمه‌های اکسیدهای نیتروژن ناشی از فعالیت‌های انسانی و طبیعی در آمریکا را بررسی کرده‌اند و نتایج آن‌ها نشان داده است که برق حاصل از تندر و آذرخش تابستانی در آمریکا نقش مهمی در غلظت اکسیدهای نیتروژن و ازن دارد. نتایج پژوهش‌های قوده^۴ و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد که غلظت دی اکسید نیتروژن در کشورهای در حال توسعه مانند چین، جنوب آسیا، خاورمیانه و جنوب آفریقا افزایش و در شرق آمریکا و اروپا کاهش یافته است. مهم‌ترین علت افزایش دی اکسید نیتروژن در کشورهای خاورمیانه مانند ایران، عراق، عربستان سعودی، کویت و ترکیه مصرف سوخت فسیلی بوده است. والاس^۵ و همکاران (۲۰۰۹) حساسیت داده‌های دی اکسید نیتروژن سنجنده OMI نسبت به تغییرات مقدار دی اکسید نیتروژن طی وارونگی دمایی را بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که افزایش مقدار دی اکسید نیتروژن به دست آمده از طریق سنجنده OMI کمتر از افزایش دی اکسید نیتروژن سطح زمین بوده است. کلینک^۶ (۲۰۱۲) روند سرعت باد طی دوره ۹۰_۱۹۶۱ در آمریکای شمالی را مورد بررسی قرار داد. نتایج او به کاهش سرعت باد در غرب و جنوب شرقی ایالات متحده آمریکا اشاره داشته است. تغییرات دما، افزایش شهرنشینی به عنوان دلایل کاهش سرعت باد در منطقه بیان شده است. ژو^۷ و همکاران (۲۰۱۲) روند بلند مدت تغییرات دی اکسید نیتروژن در اروپا را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده که دی اکسید نیتروژن در غرب اروپا به ویژه، آلمان دارای روند کاهشی بوده و بالاترین روندهای کاهشی مربوط به اسپانیا و انگلستان است. لامسال^۸

1 Inversion

2 Rua

3 Zhang

4 Ghude

5 Wallace

6 Klink

7 Zhou

8 Lamsal

و همکاران (۲۰۱۵) روند دی‌اکسید 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 دی‌اکسید نیتروژن را بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ نشان داد. اشنایدر^۱ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های SCIAMACHY روند دی‌اکسید نیتروژن را برای شهرهای بزرگ جهان در بازه آگوست ۲۰۰۲ تا مارس ۲۰۱۲ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در اروپا، آمریکای شمالی و برخی نقاط در شرق آسیا دی‌اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد در حالی که در آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی افزایش یافته است. بارکلی^۲ و همکاران (۲۰۱۷) کیفیت هوا در خاورمیانه را با استفاده از داده‌های سنجنده OMI در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه در ابتدا قابلیت سنجنده OMI را برای نظارت بلند مدت هوا در سطح محلی نشان داد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار NO₂ در مکان‌های شهری بیشترین مقدار است و بیشترین مقدار در شهرهای بحرین، کویت و امارات متحده عربی دیده شده است.

در ایران کریمی و همکاران (۱۳۸۴) دریافتند که طی دوره مورد پژوهش در شهر اصفهان وارونگی دمایی در تمام فصول سال برقرار بوده است و به دلیل مساعد بودن شرایط وارونگی دمایی پایداری جوی در سطح زمین ایجاد می‌شود. در ۸۰ درصد از روزهای ۳ سال مورد بررسی شرایط وارونگی دمایی حاکم بوده است. اما ارتفاع لایه وارونگی با تغییر فصل تغییراتی داشته است. بیشترین ارتفاع لایه وارونگی در ماه نوامبر بوده است. همچنین بررسی‌های گندم‌کار (۱۳۹۱) نشان داد که شهر اصفهان در زمستان بیشترین آلاینده را دارد و در بیشتر روزهای زمستان در سطح زمین در این شهر یک مرکز پرفشار حاکم است که ناشی از تقویت مرکز پرفشار سیبری می‌باشد. سنجنده اُمی^۳ در جولای ۲۰۰۴ به منظور داده برداری از لایه ازن و گازهای آلاینده مانند دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد بر روی ماهواره آئورا^۴ ناسا قرار گرفته است و به طور روزانه با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از کل زمین داده برداری می‌کند (شاهمحمدی، ۱۳۹۷). در این مقاله از داده‌های دی‌اکسید نیتروژن سنجنده اُمی برای بررسی آلودگی هوای اصفهان استفاده شده است. همچنین ارتباط آلودگی هوا ناشی از دی‌اکسید نیتروژن با دمای سطح زمین و باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی اصفهان محاسبه شده است.

روش تحقیق

معرفی محدوده مورد مطالعه

استان تاریخی اصفهان در موقعیت جغرافیایی ۳۰/۴۳ تا ۳۴/۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹/۳۶ تا ۵۵/۳۱ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است که حدود ۶/۵ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است (فخرایی، ۱۳۹۰). شهر اصفهان در ۳۲/۳۸ دقیقه عرض شمالی ۵۱/۳۹ دقیقه طول شرقی در مرکز ایران (ضرابی و همکاران، ۱۳۸۸) با مساحت ۳۰۰ کیلومتر مربع واقع شده است (حسین آبادی، ۱۳۹۳). این استان در چهار راه شمالی- جنوبی و شرقی- غربی کشور قرار دارد. اصفهان از شمال و شرق به کویر محدود می‌شود و قسمت غربی و جنوبی آن به ارتفاعات زاگرس منتهی می‌شود (کاظمی بومه، ۱۳۸۸). توپوگرافی شهر اصفهان در شکل (۱) آورده شده

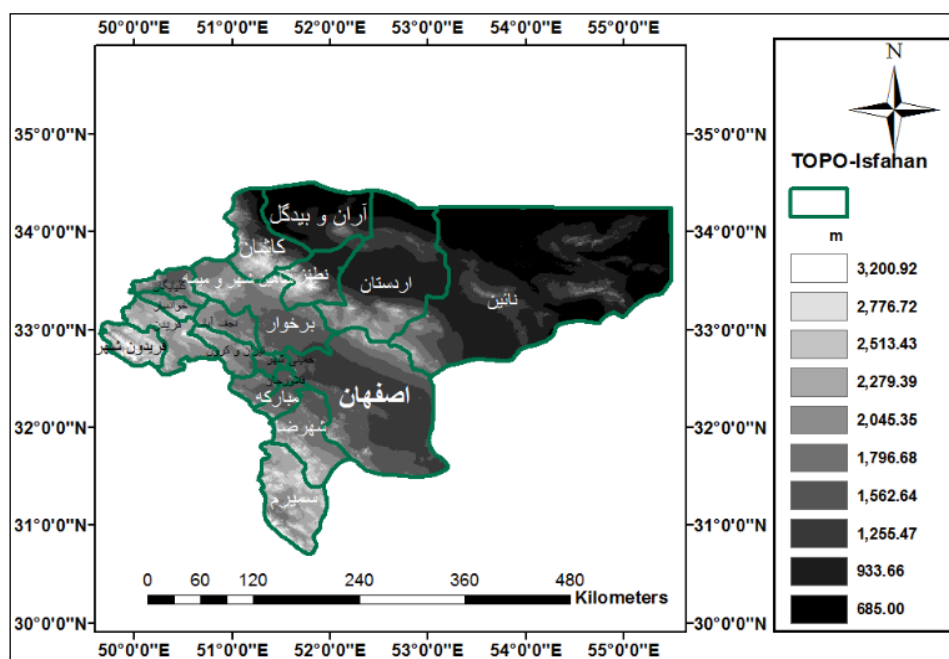
1 Schneider

2 Barkley

3 OMI: Ozone Monitoring Instrument

4 Aura

است و نوار رنگ ارتفاع برحسب متر از سطح آب‌های آزاد را نشان می‌دهد. با توجه به توپوگرافی ایران قسمت اعظم استان اصفهان در بخش خشک و نیمه خشک قرار دارد. به دلیل قرار گرفتن در عرض جغرافیایی پایین دارای آب و هوای گرم می‌باشد و به علت وجود سامانه‌های پرفشار حاره‌ای در فصول گرم سال امکان بارندگی ندارد. اصفهان بیش از ۵ ماه از سال با مشکل آلودگی هوا ناشی از تجمع گازهای آلاینده در زیر لایه وارونگی دما روبه‌رو است (آمار نامه اصفهان، ۱۳۹۱). از طرفی وجود رشته کوه‌های زاگرس در قسمت غرب استان مانع نفوذ رطوبت به نواحی مرکزی و شرق استان شده و از طرفی وجود نواحی این شهر به دلیل نزدیکی به صنایع مختلف مشکلات زیست محیطی زیادی دارد که از مهم‌ترین آن‌ها آلودگی هوا است. آلودگی هوا در این شهر ناشی از صنایع، خودروها و ریزگردها می‌باشد (اسد، ۱۳۹۴). بنابراین اصفهان یکی از شهرهای بزرگ و صنعتی ایران است. به طوری که موقعیت جغرافیایی این شهر و قرارگیری آن در یک گودال و تجمع مواد آلاینده در هوای سطحی، افزایش روز افزون جمعیت و وجود مراکز بزرگ صنعتی سبب افزایش روز افزون آلاینده‌ها در هوای این شهر شده است و این شهر را به یکی از آلوده‌ترین شهرهای کشور تبدیل کرده است (حسین آبادی، ۱۳۹۳).



شکل (۱). توپوگرافی استان اصفهان و شهرستان‌ها و نوار رنگ ارتفاع بر حسب متر از سطح آب‌های آزاد را نشان می‌دهد (منبع: نگارندگان).

داده و روش کار

سنجنده آمی بر روی ماهواره آئورا ناسا قرار دارد که به منظور مطالعه جو طراحی شده است. ماهواره آئورا در یک مدار خورشید آهنگ ۱ در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد و لحظه گذر آن ساعت ۱۳:۴۵ به وقت محلی می‌باشد. سنجنده آمی یک سیستم تصویربرداری طیفی است که پراکنش نور اتمسفر و سطح زمین را در

دو محدوده طیفی شامل ۳۸۰-۲۷۰ نانومتر و ۵۰۰-۳۵۰ نانومتر با رزولوشن ۰/۴۲ و ۰/۶۳ نانومتر اندازه‌گیری می‌کند (بازری، ۱۳۹۵). میدان دید این سنجنده ۱۱۵ درجه و عرض آن ۲۶۰۰ کیلومتر می‌باشد. تصاویر اُمی به صورت روزانه با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از کل زمین داده برداری می‌کند به طوری که با قدرت تفکیک مکانی ۱۳×۲۴ کیلومتر در سمت‌القدم^۱ گرفته می‌شوند (بازری، ۱۳۹۵). این تصاویر برای پایش چندین گاز مهم موجود در جو از جمله دی‌اکسید نیتروژن، ازن، فرمالدئید، دی‌اکسید کلر و منوکسید برم استفاده می‌شوند (بازری، ۱۳۹۵). در این پژوهش از داده‌های روزانه دی‌اکسید نیتروژن سنجنده اُمی در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای مطالعه آلودگی هوای شهر اصفهان استفاده شده است. این داده‌ها از سایت <https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/SSW> تهیه شده‌اند.

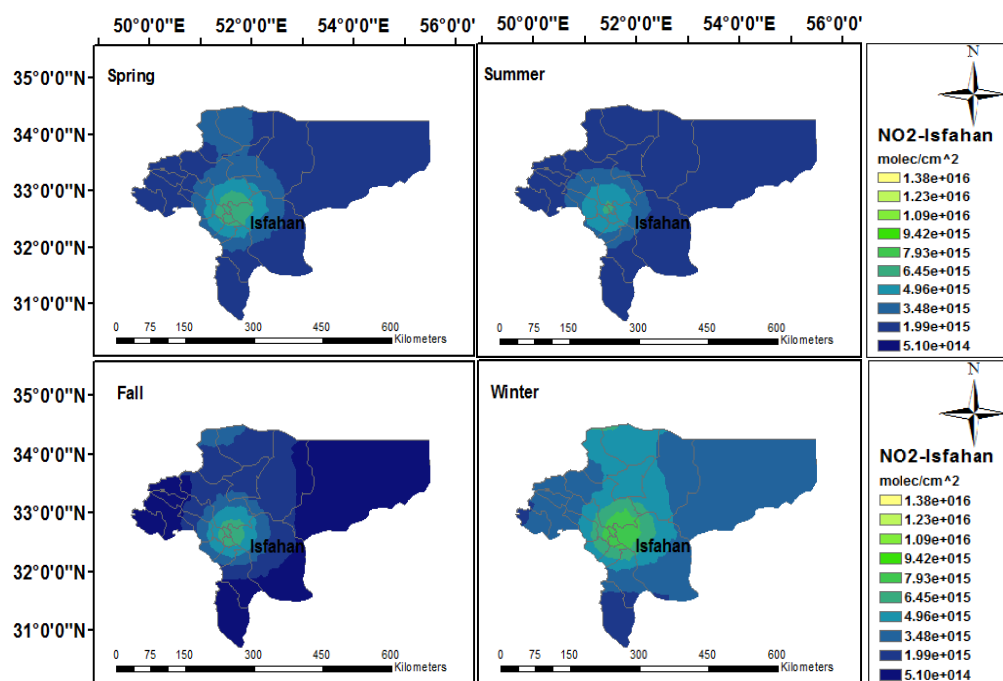
برای بررسی دقیق‌تر تغییرات دی‌اکسید نیتروژن، داده‌های روزانه دمای سطحی و باد برای بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ از سایت سازمان هواشناسی برای شهر اصفهان گرفته شده است مورد بررسی قرار گرفته شده است (<http://www.irimo.ir>). طبق پروتکل سازمان جهانی هواشناسی هر ۳ ساعت یکبار براساس زمان جهانی دما، باد، فشار، رطوبت و تابش خورشیدی توسط سایت‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود. از آنجایی که لحظه گذر سنجنده اُمی ساعت ۱۳:۴۵ به وقت محلی می‌باشد به همین دلیل ما از نزدیک‌ترین داده‌های باد و دمای سطحی ثبت شده استفاده کرده‌ایم.

نتایج

دی‌اکسید نیتروژن، باد و دما و همبستگی بین آن‌ها

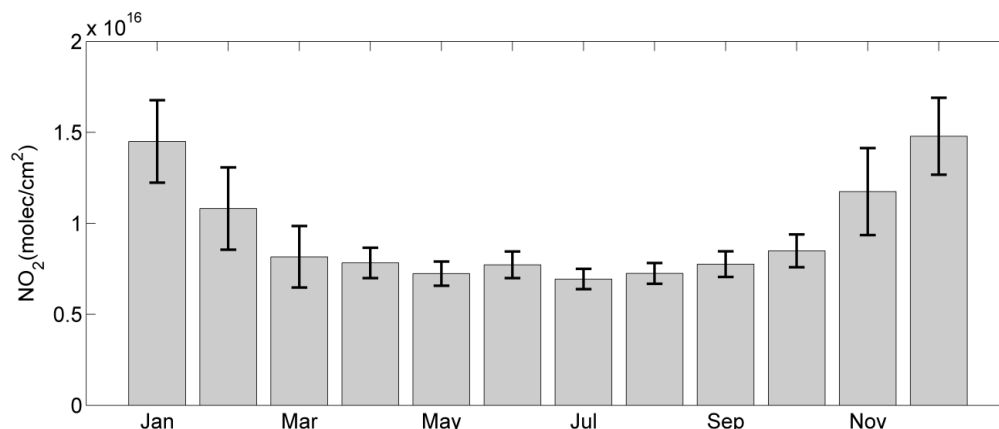
پیشرفت تکنولوژی و افزایش روز افزون جمعیت و همچنین تمایل مردم به زندگی شهری، از جمله عوامل مهم افزایش آلاینده‌ها به حساب می‌آیند. آلودگی هوا همواره به عنوان یکی از معضلات شهرهای صنعتی و بزرگ جهان مطرح بوده است. به همین منظور در این مطالعه از داده‌های روزانه دی‌اکسید نیتروژن سنجنده اُمی بین بازه اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای پیکسل بالاسر شهر اصفهان استفاده شده است.

در شکل (۲) نقشه میانگین دی اکسید نیتروژن برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان برای بازه اندازه گیری اکتبر ۲۰۱۴ تا می ۲۰۱۶ برای استان اصفهان ترسیم شده است. نوار رنگ برای همه شکل ها مقدار کمینه و بیشینه یکسانی دارد. مشاهده می شود که بیشترین (کمترین) مقدار دی اکسید نیتروژن در فصل زمستان (تابستان) اتفاق می افتد.



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

دی اکسید نیتروژن ماهانه شهر اصفهان برای بازه اندازه گیری شده در شکل (۳) آمده است. بیشینه مقدار دی اکسید نیتروژن در ماه دسامبر $14/78 \times 10^{15}$ مولکول بر سانتی متر مربع و کمینه آن در ماه جولای $6/93 \times 10^{15}$ مولکول بر سانتی متر مربع رخ می دهد. دمای سطح زمین در زمستان پایین تر از تابستان است و این شرایط را برای وارونگی دما فراهم می کند به همین دلیل بیشترین (کمترین) مقدار آلودگی در فصل زمستان (تابستان) رخ می دهد. انحراف معیار فصل زمستان ($5/97 \times 10^{15}$) بیشتر از فصل تابستان ($1/66 \times 10^{15}$) است که به دلیل تغییرات زیاد جو در زمستان می باشد.



شکل (۳). دی اکسید نیتروژن ماهانه شهر اصفهان برای بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ اندازه گیری شده توسط سنجنده آمی (منبع: نگارندگان).

همان طور که گفته شد، پارامترهای جوی و هواشناسی از جمله عوامل مهم و اساسی در شناخت آلودگی هوا به حساب می آیند که به کمک آن ها می توان ارزیابی و بررسی دقیق تری از وضعیت آلودگی هوا به دست آورد (کاظمی بومه، ۱۳۸۸). به همین منظور، برای بررسی بیشتر، داده های دمای سطحی و باد که از سایت سازمان هواشناسی برای استان اصفهان گرفته شده است مورد بررسی قرار می گیرد.

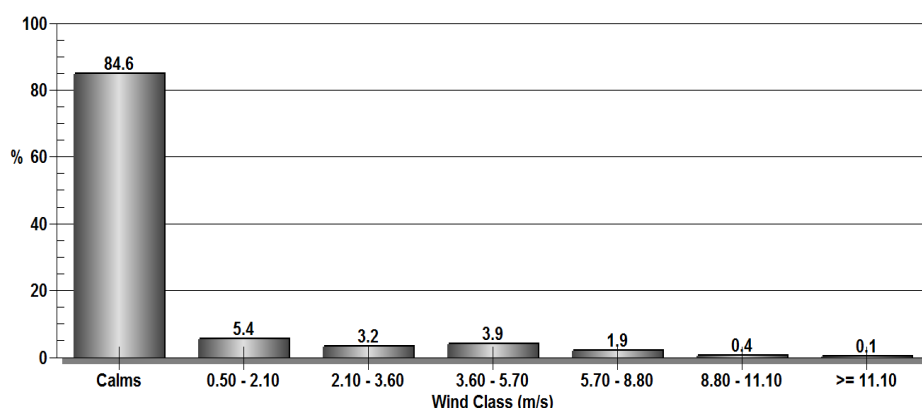
جریان باد در طول سال اهمیت بسیار زیادی در انتشار آلودگی ها دارد. جریان هوا علاوه بر نقش انتقال، پراکنش و تغییرات آلودگی ها یکی از فاکتورهای عمده در برنامه ریزی های شهری و منطقه ای است. زیرا جریان باد غالب این امکان را در اختیار ما قرار می دهد تا مسیر آلودگی را شناسایی کرده و در احداث مناطق مسکونی و صنعتی مورد مطالعه و مد نظر قرار دهیم (کاظمی بومه، ۱۳۸۸).

در شکل (۴)، توزیع تندی باد شهر اصفهان در بازه زمانی اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ آورده شده است. محور افقی کلاس های باد بر حسب متر بر ثانیه و محور عمودی درصد را نشان می دهد. مشاهده می شود که تقریباً ۸۵ درصد بادهای استان اصفهان آرام (کوچک تر از ۰/۵ متر بر ثانیه) هستند.

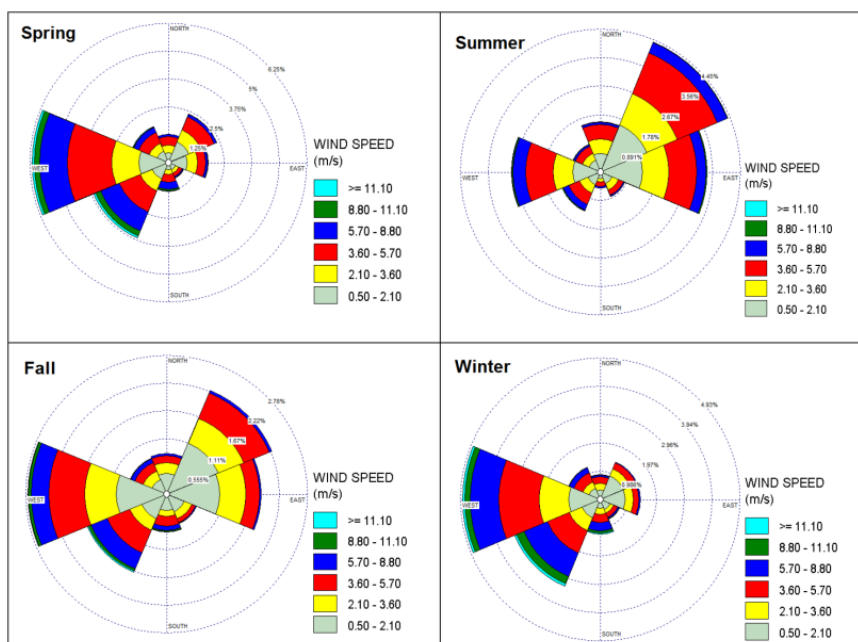
در شکل (۵) جهت وزش باد غالب در شهر اصفهان نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می کنیم در فصل بهار باد غالب به ترتیب غربی و جنوب غربی می باشد. در فصل تابستان به ترتیب بادهای شمال شرقی، شرقی و غربی دارای بیشترین مقدار هستند. غالب بادهای فصل پاییز به ترتیب غربی، شمال شرقی، شرقی و جنوب غربی است. در فصل زمستان نیز مشاهده می کنیم باد غالب غربی و جنوب غربی می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت باد غالب در شهر اصفهان غربی و جنوب غربی می باشد. با توجه به توپوگرافی شهر اصفهان و قرارگیری ارتفاعات در غرب و جنوب آن، وزش بادهای غربی و جنوب غربی جهت مناسبی دارند زیرا می توانند آلودگی هوای ناشی از صنایع که مهم ترین مشکل شهر می باشد را از بالای سطح شهر خارج کند. ولی از آن جایی که گفته شد اغلب بادهای شهر اصفهان آرام هستند و توانایی جا به جایی هوا را ندارند. به خصوص در فصل های سرد سال که هوای سطح زمین سنگین تر است و وارونگی دمایی نیز اغلب در این فصول اتفاق می افتد و سبب می شوند آلاینده ها در

بالای سطح زمین باقی بمانند. بنابراین هوای شهر آلوده می شود و مشکلات زیست محیطی برای افراد ایجاد می کند.

بررسی های انجام شده در شهر اصفهان نشان دادند، نزدیک به ۶۰ درصد روزها هوا پایدار و باد آرام است. که این امر بررسی آلودگی هوای شهر را ضروری می کند. از طرفی سامانه های همدیدی غالب، ارتفاع سازه های شهری و توپوگرافی نیز بر کیفیت هوای شهر اثر دارند لذا با برنامه ریزی مناسب شهری، زیست محیطی و اقلیمی می توان تا حدودی از آثار سو آلودگی هوا بر انسان و محیط زیست کاست (کاظمی بومه، ۱۳۸۸).

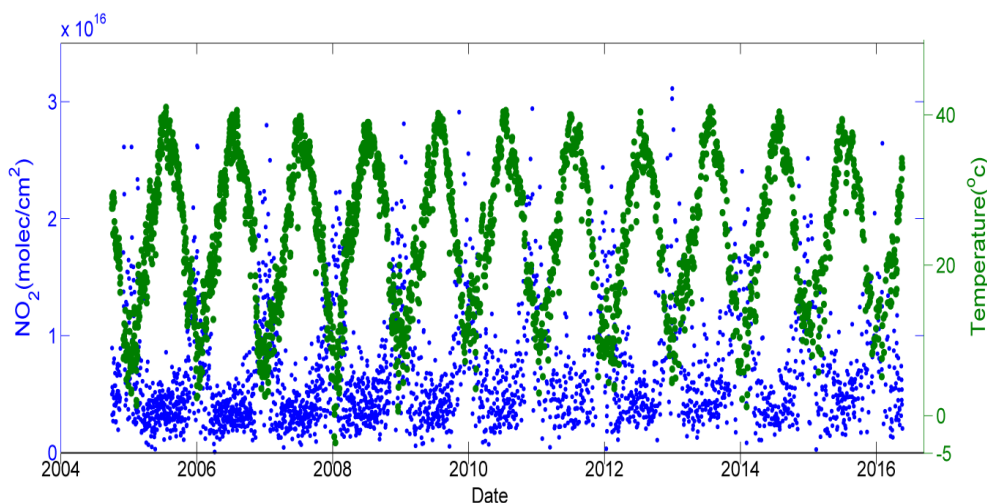


شکل (۴). توزیع تندی باد استان اصفهان در بازه زمانی بین ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ (منبع: نگارندگان).



شکل (۵). جهت وزش باد برای ایستگاه هواشناسی اصفهان در بازه بین ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶. باد غالب غربی و جنوب غربی است

شکل (۶) سری‌های زمانی دی‌اکسید نیتروژن و دما را به صورت روزانه برای شهر اصفهان در بازه اندازه‌گیری مد نظر را نشان می‌دهد. محور افقی سال و محور عمودی سمت چپ مقدار دی‌اکسید نیتروژن برحسب مولکول بر سانتی‌متر مربع و محور عمودی سمت راست دما را برحسب درجه نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنیم که در روزهای ابتدایی و انتهایی هر سال میلادی که هوا سردتر است دی‌اکسید نیتروژن بیشترین و دما کمترین مقدار را دارد و در روزهای میانی سال میلادی بالعکس می‌باشد. در نتیجه بین دما و دی‌اکسید نیتروژن رابطه معکوس برقرار است.



شکل (۶). سری‌های زمانی روزانه دی‌اکسید نیتروژن و دما در بازه زمانی بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر اصفهان (منبع: نگارندگان).

جدول (۱). میانگین و انحراف معیار تندى باد (m/s)، دما ($^{\circ}C$) و دی‌اکسید نیتروژن ($molec/cm^2$) و ضریب همبستگی بین دی‌اکسید نیتروژن با باد و دما برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان و کل بازه اندازه‌گیری بین سال‌های اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ برای شهر اصفهان (منبع: نگارندگان).

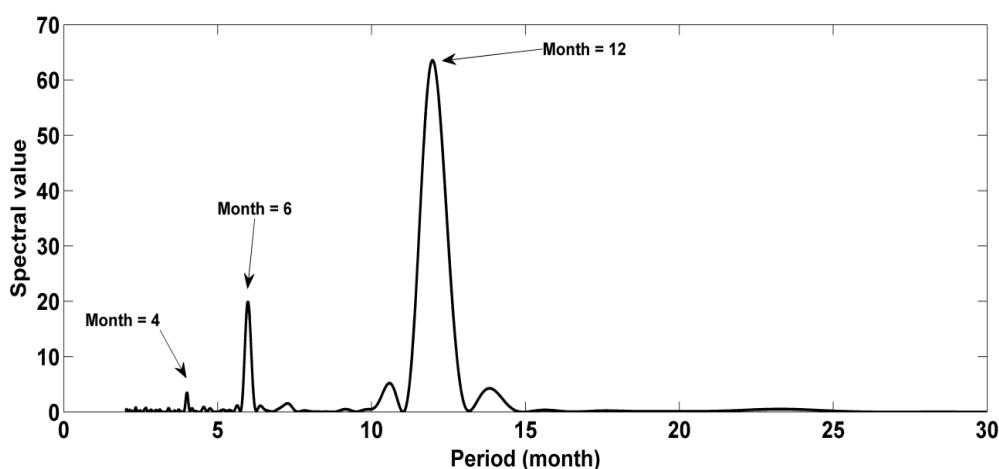
کل	زمستان	پاییز	تابستان	بهار	
۳/۳۲	۳/۲۲	۳/۲۹	۳/۵۴	۴/۱۰	میانگین باد
۲۴/۵۴	۱۲/۵۶	۲۰/۵۸	۳۵/۴۲	۲۷/۱۳	میانگین دما
۶/۴۳	۹/۵۴	۸/۳۰	۴/۲۰	۴/۳۷	میانگین دی‌اکسید نیتروژن
۲/۵۸	۳/۱۰	۲/۲۴	۱/۹۸	۲/۶۲	انحراف معیار باد
۱۰/۰۰	۵/۱۳	۷/۱۷	۲/۸۸	۵/۸۱	انحراف معیار دما
۴/۶۷	۵/۹۷	۵/۰۵	۱/۶۶	۲/۲۹	انحراف معیار دی‌اکسید نیتروژن
-۰/۵۴	-۰/۳۵	-۰/۴۹	-۰/۰۳	-۰/۰۳	ضریب همبستگی دی‌اکسید نیتروژن با دما
-۰/۴۱	-۰/۵۵	-۰/۳۵	-۰/۲۱	-۰/۲۶	ضریب همبستگی دی‌اکسید نیتروژن با باد

میانگین و انحراف معیار باد، دما و دی‌اکسید نیتروژن و همچنین ضریب همبستگی بین دی‌اکسید نیتروژن با باد و دما برای چهار فصل بهار و تابستان، پاییز، زمستان و نیز کل بازه اندازه‌گیری بین اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ در جدول (۱) آورده شده است. ضریب همبستگی دما و دی‌اکسید نیتروژن برای کل بازه اندازه‌گیری برابر $-۰/۵۴$

به دست آمد. مشاهده می شود که در بهار و تابستان میانگین دما بیشتر از پاییز و زمستان است و انحراف معیار دما در تابستان کمترین و در پاییز بیشترین مقدار را دارد. بنابراین در پاییز و زمستان هوا پایداری بیشتری نسبت به بهار و تابستان دارد. در نتیجه میانگین و انحراف معیار دی اکسید نیتروژن در دو فصل پاییز و زمستان بیشتر از دو فصل دیگر است. همچنین، ضریب همبستگی دی اکسید نیتروژن و دما در فصل پاییز و زمستان بیشتر از دو فصل دیگر است، زیرا تغییرات دما در این دو فصل بیشتر می باشد. بررسی سری های زمانی روزانه دی اکسید نیتروژن با باد نیز نشان می دهد که رابطه معکوسی بین آن ها برقرار است. زمانی که باد افزایش می یابد، دی اکسید نیتروژن کمتر شده و بالعکس. ضریب همبستگی باد و دی اکسید نیتروژن برای بازه ذکر شده $-0/41$ به دست آمد. بیشترین (کمترین) مقدار همبستگی در فصل زمستان (بهار و تابستان) است.

نتایج تحلیل طیفی دی اکسید نیتروژن برای شهر اصفهان

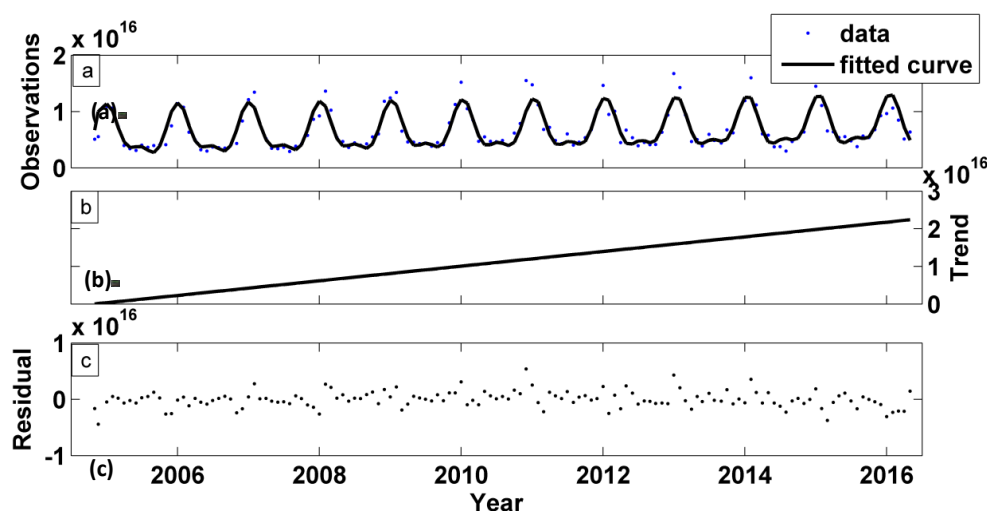
همان طور که گفته شد آنالیز طیفی کمترین مربعات ابزاری ریاضی است برای این که سری های زمانی در حوزه فرکانس بررسی شود. در اینجا با کمک آنالیز طیفی کمترین مربعات روند سری زمانی دی اکسید نیتروژن در بازه اندازه گیری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ توسط سنجنده اُمی بررسی می شود. پس از تشکیل سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن بین بازه اندازه گیری ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ با استفاده از آنالیز طیفی کمترین مربعات دوره های تناوب دوازده، شش و چهار ماهه مشاهده شد.



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

در شکل (۷) طیف سری های زمانی دی اکسید نیتروژن برای پیکسل بالاسر شهر اصفهان نشان داده شده است. محور افقی شکل (۷) نشان دهنده دوره تناوب و محور عمودی آن مقدار (قدرت) طیف به دست آمده از روش آنالیز طیفی کمترین مربعات است. پس از محاسبه طیف، تست آماری ارائه شده توسط پاگیا تاکیس^{۱۶} در سال ۱۹۹۹ روی طیف اعمال شد (Pagiatakis, 1999) و مولفه های دوازده، شش و چهار ماهه از نظر آماری نیز معنی دار شناخته شدند. این مولفه ها در سطح معنی داری ۹۵ درصد مولفه های معنی دار هستند. بایستی برای محاسبه

روند، این مولفه‌ها از سری زمانی برداشته شوند و پس از آن روند محاسبه شود. پس از حذف مولفه‌های معنی‌دار از سری زمانی میانگین ماهانه دی‌اکسید نیتروژن، روند با استفاده از برازش خطی بر روی سری زمانی باقیمانده حساب شده است.



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

در شکل (۸) سری‌های زمانی میانگین ماهانه دی‌اکسید نیتروژن اندازه‌گیری شده برای پیکسل بالا سر شهر اصفهان و سری زمانی مدل شده آن (a)، روند (b) و سری زمانی باقیمانده (c) ترسیم شده است. پس از حذف دوره‌های تناوب معنی‌دار از سری زمانی، سری زمانی باقیمانده حاصل می‌شود. مشاهده می‌کنیم که سری زمانی باقیمانده دارای روند افزایشی در طول دوره داده‌برداری است. همچنین روند مشابهی برای سری زمانی مدل شده با مشاهدات دیده می‌شود. نرخ افزایش دی‌اکسید نیتروژن در سال $1/62 \times 10^{14}$ مولکول بر سانتی‌متر مربع به دست آمد و با استفاده از آزمون ودرهد اعتبارسنجی شد (Weatherhead et al, 1998) که در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد معتبر است. اشنایدر و همکارانش نشان دادند، روند دی‌اکسید نیتروژن در بازه زمانی آگوست ۲۰۰۲ تا مارس ۲۰۱۲ برای شهر تهران برابر $6/34 \times 10^{14}$ مولکول بر سانتی‌متر مربع می‌باشد (Schneider et al, 2015). همچنین شاه‌محمدی و همکاران نیز روند دی‌اکسید نیتروژن برای شهر تهران را $6/57 \times 10^{14}$ مولکول بر سانتی‌متر مربع در سال گزارش کرده‌اند (شاه‌محمدی، ۱۳۹۷).

نتیجه‌گیری

در این مقاله از داده‌های روزانه سنجنده اُمی، داده‌های باد و دمای سطحی سازمان هواشناسی کشور برای بررسی آلودگی شهر اصفهان و محاسبه روند تغییرات دی‌اکسید نیتروژن در بازه اندازه‌گیری اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ استفاده شده است. مقدار میانگین دی‌اکسید نیتروژن در بازه اندازه‌گیری شده برای پیکسل بالا سر شهر اصفهان $6/43 \times 10^{15}$ مولکول بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده، مقدار دی‌اکسید نیتروژن برای این

شهر در ماه‌های گرم سال کمترین و در ماه‌های سرد سال بیشترین مقدار را دارد. به طوری که بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن $14/78 \times 10^{-15}$ مولکول بر سانتی متر مربع در دسامبر و کمترین مقدار آن $6/93 \times 10^{-15}$ مولکول بر سانتی متر مربع در جولای مشاهده شد. همچنین مقدار آلاینده دی اکسید نیتروژن با پارامترهای باد و دما رابطه عکس دارد. با افزایش (کاهش) باد و دما، مقدار دی اکسید نیتروژن کاهش (افزایش) می‌یابد. ضریب همبستگی باد و دما با دی اکسید نیتروژن به ترتیب $-0/41$ و $-0/54$ برآورد گردید. پس از تشکیل سری زمانی میانگین ماهانه دی اکسید نیتروژن بین بازه اندازه‌گیری اکتبر ۲۰۰۴ تا می ۲۰۱۶ با استفاده از آنالیز طیفی کمترین مربعات دوره‌های تناوب دوازده، شش و چهار ماهه معنی‌دار شناخته شدند. برای محاسبه روند این دوره‌های تناوب معنی‌دار از سری زمانی حذف شده و با برازش خطی بر روی سری زمانی باقیمانده مقدار روند محاسبه شد که برابر $1/62 \times 10^{-15}$ مولکول بر سانتی متر مربع در هر سال به دست آمد که در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد دارای اعتبار است.

بنابراین روند افزایش دی اکسید نیتروژن برای کلان شهرها از جمله اصفهان می‌تواند به دلیل افزایش شهرنشینی، گسترش جمعیت، استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی و وسایل نقلیه باشد. توپوگرافی و وارونگی دمایی و سرعت کم باد در افزایش این آلاینده بی‌تأثیر نیستند. نتایج بررسی‌های کاظمی بومه نیز نشان داد، در آلوده‌ترین روزها در شهر اصفهان در اکثر این روزها پدیده وارونگی دما رخ داده است. بنابراین می‌توان گفت که به دلیل رخداد پدیده وارونگی دما در آلوده‌ترین روزها این عامل را می‌توان یکی از عوامل موثر در ایجاد آلودگی هوای شهر اصفهان دانست (کاظمی بومه، ۱۳۸۸).

شاخص کیفیت هوا در شهر اصفهان در بیشتر روزهای سال وضعیت نامطلوبی را نشان می‌دهند. براساس گزارش انجام شده در طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ به طور متوسط ۲۲ روز در سال شهر اصفهان از هوای پاک برخوردار بوده است. با توجه به این آمار کاملاً روشن است که وضعیت هوای اصفهان بسیار نامناسب است. همچنین بیان کردند که آشفته‌گی شهری و وضعیت حاد آن در شهر اصفهان، موجب افزایش استفاده از اتومبیل و در نتیجه آن اثرگذاری مستقیم بر آلودگی هوا و افزایش آلاینده‌ها گردیده است. با توجه به وخامت وضعیت آلودگی هوا طی سال‌های اخیر، اهمیت درک این مسئله و لزوم چاره‌اندیشی چندین برابر می‌گردد (فخرایی، ۱۳۹۰). صالحی نیز نشان داد، میزان آلاینده‌های مختلف در شهر اصفهان در ماه‌ها و فصول سرد سال نسبت به ماه‌ها و فصول گرم بیشتر بود. این امر می‌تواند ناشی از وابستگی میزان آلاینده‌ها با شرایط جوی باشد که در میزان واکنش‌های جوی و ماندگاری آلاینده‌ها در هوا موثر می‌باشد. از طرفی استفاده از وسایل گرمایشی در هوای سرد در مقایسه با هوای گرم بیشتر است (صالحی، ۱۳۹۰).

بنابراین وضعیت هوای این کلان شهر از نظر حفظ سلامت افراد جامعه به خصوص افراد حساس کیفیت مطلوبی ندارد و نیازمند توجه بیشتر و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مناسب جهت کاهش غلظت آلاینده‌های هوا می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده از اقدامات موثر در جهت کاهش آلودگی هوا افزایش فضای سبز و درختکاری می‌باشد.

منابع

- ابازری، مرتضی. (۱۳۹۵). آشکارسازی مناطق متأثر از گرد و غبار با استفاده از تغییرات بازتابندگی سطح و خصوصیات طیفی گرد و غبار، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی خاوران، رشته عمران، گرایش سنجش از دور.
- اسد، مریم. (۱۳۹۴). تحلیل اثرات عناصر اقلیمی و آلودگی هوا بر بیماری آسم کودکان در شهر اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه یزد.
- آمار نامه شهر اصفهان (۱۳۹۱). شهرداری اصفهان.
- جمعی از پژوهشگران، آلودگی هوا و سلامت انسان، ارائه شده در چهارمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، دی ۱۳۹۴.
- حسین آبادی (۱۳۹۳). اثرات فراسنج‌های آب و هوایی و آلاینده‌های هوا بر ازون سطحی و تابش فرابنفش در اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد-آلودگی محیط زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- دفتر برنامه‌ریزی و تالیف کتب درسی ایران (۱۳۹۰). زمین شناسی، انتشارات شرکت چاپ کتاب‌های درسی ایران.
- شاهمحمدی، عاطفه. بررسی روند دی‌اکسید نیتروژن به عنوان شاخص آلودگی هوا با استفاده از داده‌های سنجنده OMI برای چهار کلان شهر تهران، اصفهان، مشهد و تبریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۳۹۷.
- شرعی‌پور، زهرا و علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی (۱۳۹۳). بررسی وضعیت NO_2 تروپوسفری ایران طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲. محیط شناسی، ۴۰(۱): ۶۵-۷۸.
- صالحی، بنفشه. (۱۳۹۰). پهنه‌بندی آلودگی هوای شهر اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ضرابی، اصغر، محمدی، جمال، عبداللهی، اصغر. (۱۳۸۸). بررسی و ارزیابی کاربری اراضی مناطق چهارده‌گانه شهر اصفهان با استفاده از روش مقایسه‌ای و مدل LQI با استفاده از نرم افزار GIS، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۰(۱۳): ۱۷۳-۲۰۲.
- فخرایی، شراره (۱۳۹۰). تاثیر آشفستگی شهری بر آلودگی هوا (نمونه موردی: شهر اصفهان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری.
- کاظمی بومه (۱۳۸۸)، سمیه. تحلیل عناصر اقلیمی موثر بر روی آلودگی هوای شهر اصفهان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیا.
- کریمی، محسن و درخشان، حسین (۱۳۸۴)، بررسی وارونگی دمایی در شهر اصفهان، دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک، تهران، سازمان زمین شناسی.
- گندم‌کار، امیر (۱۳۹۱). مدیریت بحران وقوع سیل در شهر اصفهان با استفاده از سامانه‌های جوی. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. ۲۷(۲): ۱۱۵-۱۲۷.
- نوربخش، سیده اعظم (۱۳۹۱). بررسی آماری -همدیدی پدیده آلودگی هوا در شهر اصفهان. همایش ملی آب و هوا، دانشگاه تهران.

- یاوری، حسین، سلیقه، محمد. (۱۳۹). **سطوح وارونگی در آلودگی های شهر تهران**. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷(۲۰): ۸۹-۱۰۵.
- Barkley, M. P., González Abad, G., Kurosu, T. P., Spurr, R., Torbatian, S., Lerot, C. **OMI air-quality monitoring over the Middle East**. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(7), 4687-4709.
- Challen, P. J. R., Hickish, D. E., & Bedford, J. (1958). **An Investigation of Some Health Hazards in an Inert-gas Tungsten-arc Welding-shop**. British journal of industrial medicine, 15(4), 276.
- Cohen, A. J., Ross Anderson, H., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., ...& Smith, K. (2005). **The global burden of disease due to outdoor air pollution**. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 68(13-14), 1301-1307.
- Ghude, S. D., Van der A, R. J., Beig, G., Fadnavis, S. and Polade, S. D. **Satellite derived 2009, trends in NO₂ over the major global hotspot regions during the past decade and their inter-comparison**, Environmental Pollution, 157, 1873-1878.
[http:// air.tehran.ir](http://air.tehran.ir).
<http://www.irimo.ir>.
- Klink, K., (1999). **Trends in mean monthly maximum and minimum surface wind speeds in the coterminous United States 1961 to 1990**. Climate Research. 13:193-205.
- Lamsal, L. N., Duncan, B. N., Yoshida, Y., Krotkov, N. A., Pickering, k. E., Streets, D. G., Lu, Z. **US NO₂ trends (2005-2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI)**. Atmospheric Environment, 2015, 110, 130-143.
- Pagiatakis, S. D., (1999). **Stochastic significance of peaks in the least-squares spectrum**. Journal of Geodesy. 73, 67-78.
- Rua, A., Gimeno, L. and Hernoandez, E. **Trends and seasonal variation of SO₂, NO_x, SO₄²⁻ and NO₃⁻ concentration in the air of the Spanish Emep station**, 1998.
- Schneider, P., Lahoz, W. A., van der A, R. **Recent satellite-based trends of tropospheric nitrogen dioxide over large urban agglomerations worldwide**. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(3), 1205-1220.
- Shon, Z. H., Kim, K. H., & 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(18), 3120-3131.
- Wallace, J. and Kanaroglou, P. **The sensitivity of OMI-derived nitrogen dioxide to boundary layer temperature inversions**, Atmospheric Environment, 2009. 43, 3596-3604.
- Weatherhead, E. C., Reinsel, G. C., Tiao, G. C., Meng, X. L., Choi, D., Cheang, W. K., ... , Miller, A. J (1998). **Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103(D14), 17149-17161.
- Zhang, R., Tie, X., and Bond, D. W. **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), 2003. 100, 1505-1509.
- Zhou, Y., Brunner, D., Hueglin, C., Henne, S. and Staehelin, J. **Changes in OMI tropospheric NO₂ columns over Europe from 2004 to 2009 and the influence of meteorological variability**, Atmospheric Environment, 2012, 46, 482-495.