

بررسی روند ازون تروپوسفری شهر کرمانشاه در بازه ۱۰ ساله با استفاده از پارامترهای

هواشناسی، پیش سازهای ازون و تصاویر سنجنده OMI

رسول باقرآبادی؛ دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
مظاهر معین الدینی^۱؛ استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۲۲

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۸

چکیده

امروزه با افزایش میزان آلودگی هوا، ضرورت شناخت بیشتر علل وقوع آن را مطرح ساخته است. در این میان ازون تروپوسفری می‌تواند بر سلامتی انسان و محیط زیست اثر گذار باشد. از این رو هدف این پژوهش بررسی روند تغییرات غلظت ازون تروپوسفری با پارامترهای هواشناسی، پیش سازهای ازون (دی اکسید نیتروژن و اکسیدهای نیتروژن) است. در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هواشناسی کرمانشاه و ایستگاه کیفیت هوای اداره کل حفاظت محیط زیست کرمانشاه (ایستگاه زیبا پارک) در بازه ۱۰ ساله (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵) استفاده شده است. در این پژوهش تغییرات غلظت ازون تروپوسفری و ارتباط آن با تغییرات NO_x ، NO_2 و پارامترهای هواشناسی شهر کرمانشاه انجام شده است. براساس نتایج، بیشترین غلظت ازون تروپوسفری در ساعت‌های ۱۴ تا ۱۶، ماه‌های خرداد، تیر و مرداد رخ داده است، بالاترین مقدار غلظت ازون تروپوسفری فصلی نیز در فصل تابستان و بهار ثبت شده است. مطالعه پارامترهای هواشناسی مانند دمای هوا و سرعت باد نشان داد که ارتباط مستقیمی با میزان غلظت ازون تروپوسفری دارد. از طرفی با افزایش میزان بارندگی غلظت ازون تروپوسفری کاهش پیدا می‌کند. نتایج بررسی رابطه بین ازون تروپوسفری، اکسیدهای نیتروژن و دی اکسید نیتروژن نشان داد که بیشترین مقدار ازون تروپوسفری در کمترین مقدار اکسیدهای نیتروژن و دی اکسید نیتروژن رخ می‌دهد و تغییرات غلظت ازون تروپوسفری در طول روز برعکس تغییرات اکسیدهای نیتروژن و دی اکسید نیتروژن است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، ازون تروپوسفری، پارامترهای هواشناسی، دی اکسید نیتروژن، اکسیدهای نیتروژن.

مقدمه

هوای پاک یک ضرورت برای رفاه و سلامتی انسان است. آلودگی هوا برای انسان و سایر موجودات یک خطر اصلی محسوب می‌شود و به عنوان یکی از چالش‌های محیط‌زیستی به شمار می‌رود (Abdul Aziz and Mohd Ali, ۲۰۱۹)؛ (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). شاخص آلودگی که عمده‌تاً مورد استفاده قرار گرفته شامل ذرات معلق، آلاینده‌های گازی مانند دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، آزون (O_3) و مونواکسید کربن (CO) است (Schwartz, ۲۰۰۵)؛ (Katsouyanni et al, ۱۹۹۷). آزون در تروپوسفر به عنوان یک آلاینده مهم و در استراتسفر به عنوان سپر حیات شناخته می‌شود. بنابراین، می‌توان آزون را به دو دسته آزون تروپوسفری و آزون استراتسفری تقسیم بندی کرد و هر یک را جداگانه مورد بررسی قرار داد (Demuzere and van Lipzig, ۲۰۱۰). آزون تروپوسفری یکی از آلاینده‌های معیار است. این آلاینده تهدید جدی برای سلامت انسان است برخی از خصوصیات آزون عبارتند از: بی رنگ، بوی نامطبوع، شکل سه اتمی مولکولی اکسیژن و مؤلفه اصلی مه دود فتوشیمیایی است (Masoudi, Behzadi, and Sakhaei, ۲۰۱۴). با واکنش پیش سازهای آزون شامل NO_x و VOCها (ترکیبات آلی فرار یا هیدروکربن‌ها) ناشی از خودروها، صنعت، بخارات گازی، حلال‌های شیمیایی، احتراق سوخت در حضور نور خورشید باعث افزایش تولید آزون می‌شوند (Masoudi, Behzadi, and Sakhaei, ۲۰۱۴).

این نوع آلودگی هوا که در مناطق مهم شهری و صنعتی رخ می‌دهد برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ در لس آنجلس شناخته شد. تحقیقات گسترده شیمیایی و هواشناسی آزون تروپوسفری در اوایل دهه ۱۹۸۰ به طور جامع و کامل در ایالات متحده مورد بررسی قرار گرفته است. اما تحقیقات سیستماتیک کمی و نظارتی آزون در اواسط دهه ۲۰۰۰ در چین انجام شد (Wang et al, ۲۰۱۷). از این‌رو، آزون تروپوسفری به‌عنوان یک آلاینده هوا در جهان شناخته می‌شود، که می‌تواند بر سلامتی انسان، و محیط‌زیست تأثیر بگذارد خصوصاً سبب مشکلات تنفسی و اختلال در عملکرد ریه و حملات آسمی شود (Abdul Aziz and Mohd Ali, ۲۰۱۹). از اثرات دیگر آزون تروپوسفری می‌توان به کاهش ظرفیت ریه، سرفه، درد قفسه سینه، سوزش گلو، حالت تهوع، آسیب بر گیاهان (اختلال در رشد و تأثیر بر جوانه زنی) و کاهش عمر لاستیک اشاره کرد (Abdul Aziz and Mohd Ali, ۲۰۱۹)؛ (اصغری جعفر آبادی، ۱۳۹۴).

درخصوص روند تغییرات غلظت آزون تروپوسفری در ایران و جهان گزارش‌های متعددی در چند دهه گذشته منتشر شده است که نتایج نشان از روند افزایشی غلظت آزون تروپوسفری در نقاط شهری مورد مطالعه بوده است که در این مقاله به برخی از آنها اشاره می‌شود. جیانگ و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی که بر تأثیرات عوامل هواشناسی را در فصل زمستان بر غلظت اکسیدهای نیتروژن که به عنوان عامل اولیه تشکیل آزون در اوکلند داشتند به این نتیجه رسیدند که شرایط هواشناسی بر غلظت آزون تأثیرگذار است (Jiang, Hay, and Fisher, ۲۰۰۵). ردی و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی که در منطقه‌ای در جنوب هند داشتند، به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت آزون تروپوسفری در آخر هفته نسبت به اواسط هفته در اثر کاهش پیش سازهای آزون مانند اکسیدهای نیتروژن در اواخر هفته است (Reddy et al, ۲۰۱۰). سوسایا و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی که در هفت شهر بزرگ کره جنوبی بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۰ انجام شد، افزایش غلظت میانگین سالانه آزون در طول ۲۲ سال گزارش شده و یکی از دلایل مهم آن، افزایش غلظت اکسیدهای نیتروژن در هوای شهرهای مورد مطالعه عنوان شده است (Susaya et al, ۲۰۱۳). استروزبوزکا و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی در هشت منطقه لهستان در سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۱ انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مقدار غلظت آزون با افزایش دمای هوا در ارتباط است و بیشترین مقدار غلظت آزون

در دمای بالای ۲۴ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد (Struzewska and Jefimow, ۲۰۱۶). گوو و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی که بر روی ازون تروپوسفری شانگهای چین در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ داشتند به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای هوا غلظت ازون سطحی نیز افزایش پیدا می‌کند و این مقدار در فصل تابستان به بیشترین مقدار می‌رسد (Gu et al, ۲۰۲۰).

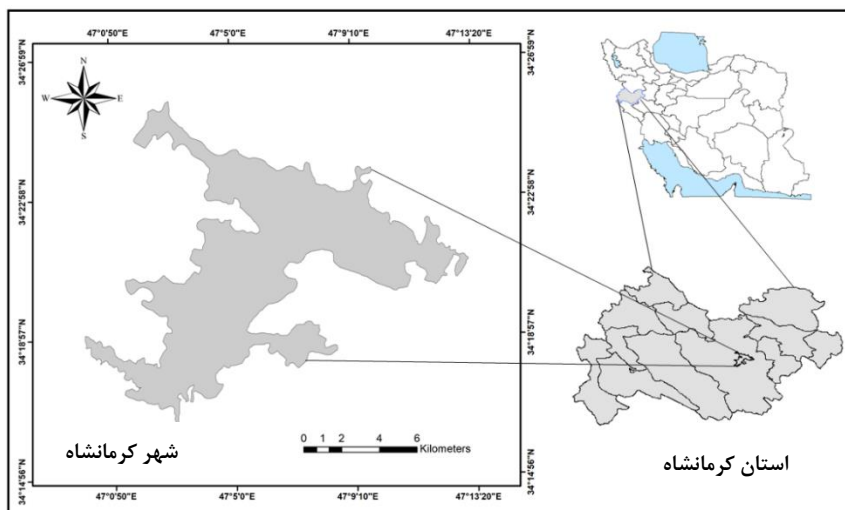
غیاث الدین و صورتی (۱۳۸۸) در پژوهشی که بر روی تغییرات غلظت ازون تروپوسفری و پارامترهای هواشناسی داشتند به این نتیجه رسیدند که تابش خورشید با غلظت ازون ارتباط مستقیمی دارند که در نتیجه فعالیت‌های فتوشیمیایی افزایش و به سبب آن افزایش غلظت ازون را به همراه داشته است (غیاث الدین و صورتی، ۱۳۸۸). مسعودی و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی که بر تجزیه و تحلیل ازون در شهر شیراز در ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ در دو مکان مختلف شهر شیراز داشتند به این نتیجه رسیدند که بیشترین غلظت ازون معمولاً در بعدازظهر اتفاق می‌افتد در حالیکه کمترین غلظت ازون در صبح و نیمه شب مشاهده می‌شود و کمترین غلظت فصلی ازون در پاییز است (Masoudi et al, ۲۰۱۶). شرعی‌پور (۱۳۹۶) در پژوهشی که به بررسی غلظت ازون در ایستگاه پونک شهر تهران داشت به این نتیجه رسید که غلظت ازون در تابستان و ساعت ۱۵ بعدازظهر بیشینه است و ارتباط مستقیمی بین مقدار ساعتی ازون تروپوسفری و پارامترهای روزانه وجود دارد (شرعی‌پور، ۱۳۹۶).

ازون تروپوسفری به‌عنوان یک آلاینده مهم برای سلامتی انسان و محیط‌زیست خطرناک است به همین دلیل در دهه‌های گذشته اهمیت آن بر کیفیت هوا، از طرف جوامع علمی و نظارتی مورد توجه قرار گرفته است. شهر کرمانشاه یکی از کلان شهرهای ایران است که منابع انتشار آلاینده‌های هوای آن شامل منابع صنعتی و شهری است. ازون تروپوسفری در شهر کرمانشاه به‌عنوان یک آلاینده شناخته شده است از این رو تاکنون مطالعاتی سیستماتیکی که در زمینه شناخت ازون تروپوسفری و ارتباط ازون تروپوسفری با پارامترهای هواشناسی در بازه زمانی طولانی در شهر کرمانشاه انجام نشده است. از این رو با توجه به اهمیت این موضوع، در این پژوهش رابطه بین غلظت ازون تروپوسفری با پارامترهای هواشناسی، دی اکسید نیتروژن و اکسیدهای نیتروژن در شهر کرمانشاه در بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵) مطالعه شده است.

داده و روش کار

الف) منطقه مورد مطالعه

شهر کرمانشاه با موقعیت ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ در شرق استان و تقریباً در مرکز شهرستان قرار گرفته است. شهر کرمانشاه دومین شهر بزرگ و پر جمعیت منطقه‌ی غرب و شمال‌غربی کشور و بزرگ‌ترین شهر استان کرمانشاه است. مساحت شهر کرمانشاه بالغ بر ۹۵۶۸/۶ هکتار و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۳۲۲ متر است. بر اساس طبقه بندی دوماتن که براساس میانگین بارش و متوسط دما است، در رده سرد قرار دارد دارای آب‌وهوای نیمه خشک با میانگین بارش سالانه ۴۴۴/۷ میلیمتر و میانگین دمای ۱۴/۳ درجه سلسیوس است (Zallaghi, ۲۰۱۴). شکل (۱) موقعیت جغرافیایی شهر کرمانشاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهر کرمانشاه

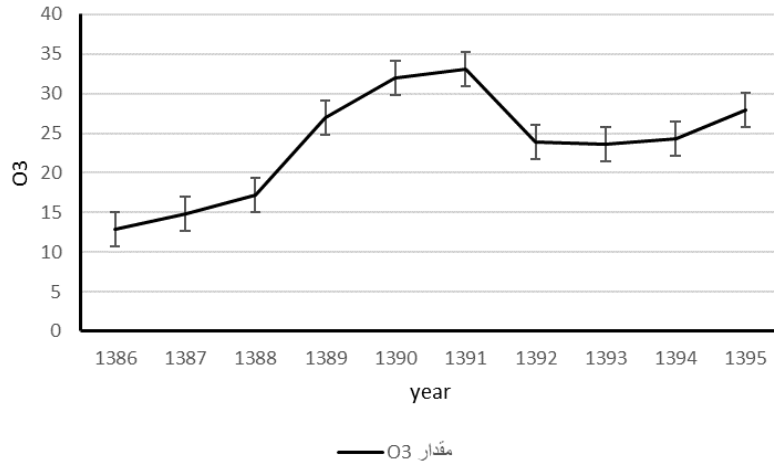
(ب) روش کار

در این پژوهش از داده‌های ایستگاه کنترل کیفیت هوا ایستگاه زیبا پارک شهر کرمانشاه با موقعیت جغرافیایی ۳۴ درجه ۱۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه ۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است. همچنین این ایستگاه یکی از مناطق پرتردد و آلوده در سطح شهر کرمانشاه است. داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه با کد ۴۰۷۶۶ از پارامترهای هواشناسی دمای روزانه و سرعت باد در بازه زمانی ۱۰ ساله (سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵) استفاده شده است.

همچنین از تصاویر سنجنده OMI ماهواره Aura، استفاده شده است. میدان دید سنجنده OMI، ۱۱۵ درجه است. به صورت روزانه از کل زمین داده برداری می‌کند. در این مقاله از داده‌های روزانه دی اکسید نیتروژن سنجنده OMI در برای بررسی آلودگی ناشی از دی اکسید نیتروژن و ارتباط آن با ازون تروپوسفری شهر کرمانشاه استفاده شده است. این داده‌ها از سایت <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.htm> گرفته شده است. با استفاده از آزمون پیرسون همبستگی بین غلظت ازون تروپوسفری و پارامترهای هواشناسی و از رگرسیون خطی رابطه بین آنها مورد مطالعه قرار گرفت.

شرح و تفسیر نتایج

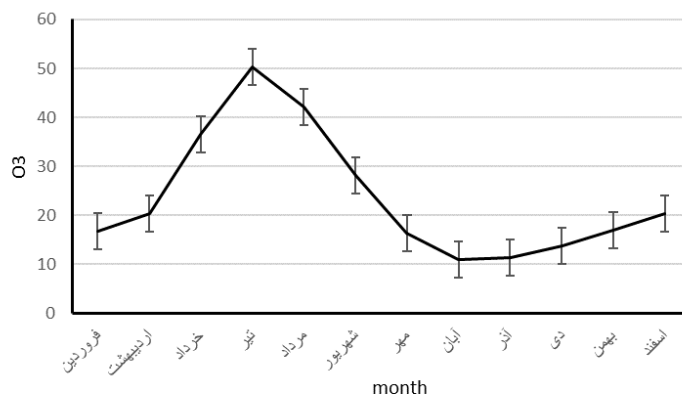
شکل (۲) تغییرات سالانه ازون برای شهر کرمانشاه در مدت ۱۰ سال نشان می‌دهد. در سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ دارد تغییرات غلظت ازون را نشان می‌دهد. از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ روندی افزایشی را داشته است از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۳۹۱ میزان ازون با افزایش چشمگیری قابل مشاهده است. از سال ۱۳۹۱ تا سال ۱۳۹۲ مقدار ازون نسبتاً کاهشی بوده و از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ افزایشی بوده است. در کل روند تغییرات ازون در بازه زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ روندی افزایشی دارد. بنابراین تصور می‌شود که علاوه بر اثرات جوی در توزیع ازون، پارامترهای صنعتی و منابع متحرک (خودروها) می‌توانند بر میزان ازون تأثیر گذار باشند. سال‌های میانی مورد مطالعه، بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند این توزیع، نشان دهنده وجود یک روند پولینومیال در تغییرات فراوانی ازون‌های تروپوسفری شهر کرمانشاه است.



شکل ۲. مقدار ازون سالانه

شکل (۳) مقایسه میانگین ماهانه آلاینده ازون تروپوسفری نشان می‌دهد که در شهر کرمانشاه، مقادیر بالای آلاینده ازون در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد رخ می‌دهد. بررسی‌های ماهانه نشان داد که بالاترین فراوانی ازون، مربوط به گرمترین ماه‌های سال بوده است دلیل آن، حاکمیت الگوهای کم فشار گرم سطحی در این ماه‌هاست که شرایط اقلیمی با درجه حرارت بالا و کم‌رطوبت به همراه تابش بالا را برای منطقه به همراه دارند. کمترین فراوانی نیز مربوط به ماه‌های مرطوب سال که همراه با بارش است. به دلیل پایداری و صاف بودن هوا در این شرایط، نور خورشید به راحتی وارد تروپوسفر شده و سبب افزایش فعالیت‌های شیمیایی و در نتیجه موجب افزایش غلظت ازون در سطح زمین می‌شود.

این وضعیت نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی و جوی مناسب برای افزایش غلظت‌های ازون تروپوسفری در هر فصلی از سال، شامل رطوبت نسبی پایین، دما و تابش نسبتاً بالاست. اما شدت غلظت‌های ازون تروپوسفری، با توجه به تأثیر جمعی همه عوامل مرتبط با آن، متفاوت است. نکته دیگر آنکه بیشتر فراوانی ازون تروپوسفری در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد در ساعات ۱۴ تا ۱۶ ثبت شده است.

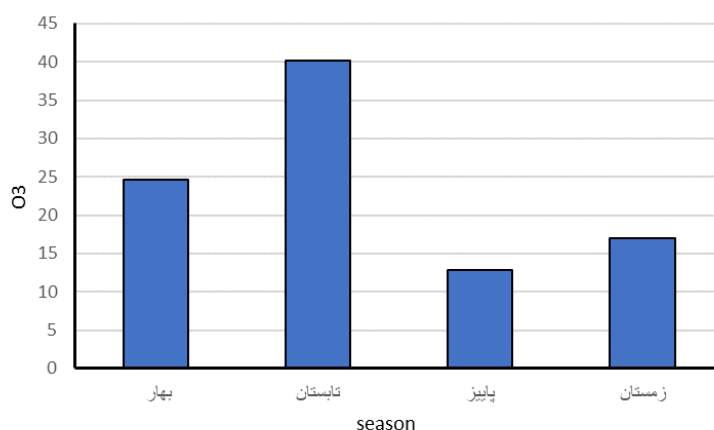


شکل ۳. مقدار ازون ماهانه

شکل (۴) تغییرات فصلی ازون کلی را برای شهر کرمانشاه نشان می‌دهد. تغییرات در فصل تابستان و بهار روندی افزایشی است که همزمان با افزایش دمای هوا است همانطور که در بررسی‌های ماهانه نتایج نشان داد که بیشترین مقدار ازون تروپوسفری در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد یعنی در بهار و تابستان رخ می‌دهد. بنابراین افزایش دمای در

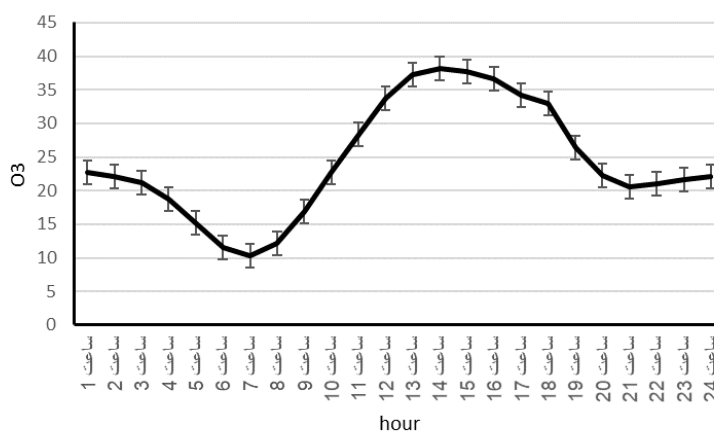
بهار و تابستان ارتباط مستقیمی با افزایش ازون تروپوسفری دارد که با نتایج (Gu et al, ۲۰۲۰)؛ (عزى مند و کاکرودی، ۱۳۹۶)؛ (Wang et al, ۲۰۱۲) یکسان بود.

در فصل تابستان، عوامل مختلفی از جمله دمای بالای هوا، تابش خورشید و طولانی بودن روز باعث افزایش فعالیت‌های فتوشیمیایی و در نتیجه افزایش غلظت ازون می‌شود. این موضوع برای فصل پاییز و زمستان روندی کاهشی را به دنبال داشته است. که همراه با کاهش دمای هوا، کاهش تابش خورشید، کاهش طول روز و کاهش فعالیت‌های فتوشیمیایی و در نتیجه کاهش غلظت ازون را به همراه دارد.



شکل ۴. مقدار ازون فصلی

با توجه به شکل (۵) روند تغییرات ازون ساعتی نشان داده شده است. بر اساس جدول شماره ۱ تغییر ازون در شبانه روز به چهار دوره زمانی تقسیم بندی می‌شود. الف) دوره زمانی اول که دارای کمترین مقدار ازون است از ساعت ۱ بامداد تا ساعت ۶ صبح شامل می‌شود که به دلیل نبود فعالیت‌های فتوشیمیایی در شب است. ب) دوره زمانی دوم شامل روند افزایشی ازون که همزمان با طلوع خورشید و آغاز فعالیت‌های انسانی از ساعت ۷ صبح تا ۱۲ ظهر است. ج) دوره زمانی سوم حداکثر مقدار ازون در طول شبانه روز است و همزمان با بیشترین مقدار دمای روزانه و فعالیت‌های انسانی است و از ساعت ۱۲ ظهر تا ۴ بعدازظهر شامل می‌گردد. د) دوره زمانی چهارم روند کاهشی ازون از ساعت ۴ بعدازظهر تا ۱۲ بامداد همزمان با کاهش دما و نور خورشید است.



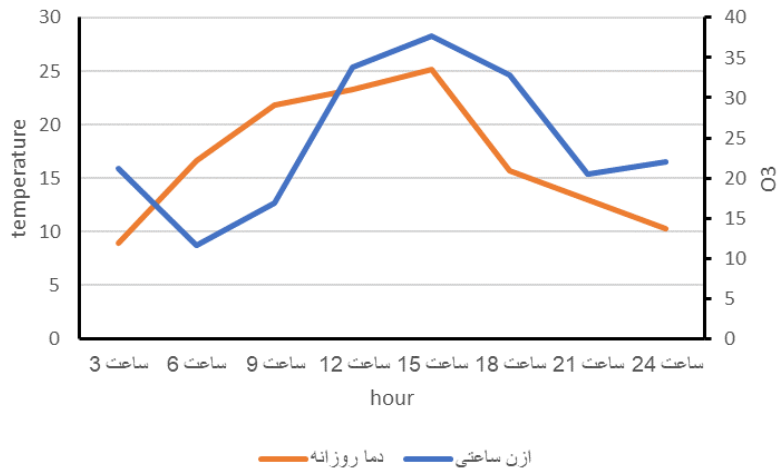
شکل ۵. مقدار ازون ساعتی

جدول ۱. تقسیم بندی روند تغییرات ازون شبانه روزی

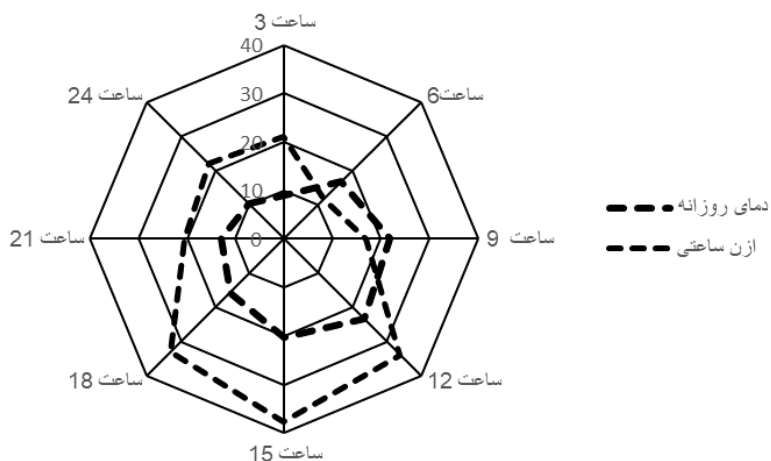
| مقدار ازون | کمترین مقدار شبانه | روند افزایشی روزانه | بیشترین مقدار روزانه | روند کاهشی شبانه |
|------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| ساعات شبانه روزی | از ساعت ۱ بامداد تا ۶ صبح | از ساعت ۷ صبح تا ۱۲ ظهر | از ساعت ۱۲ ظهر تا ۴ بعدازظهر | از ساعت ۴ بعدازظهر تا ۱۲ بامداد |

شکل (۶-۷) تغییرات ازون ساعتی با دمای روزانه را نشان می‌دهد. از آنجا که ازون در طول شبانه‌روز در حال تغییر است و همانطور که در شکل (۶-۷) قابل مشاهده است با دمای شبانه روز در ارتباط است ازون با افزایش دمای روزانه روندی افزایشی را داشته است و این افزایش ازون از ساعت ۶ صبح همراه با افزایش دما همراه است. و در ساعت ۱۵ به حداکثر می‌رسد سپس از ساعت ۱۸ روند کاهشی است. بنابراین تحلیل آماری ازون شهر کرمانشاه در طول شبانه‌روز نشان داد که بیشترین میزان فراوانی ازون در ساعت ۱۵ رخ می‌دهد یعنی کمی پس از اوج تابش خورشید و مطابق با بیشینه انرژی دریافتی از خورشید که ارتباط مستقیمی با میزان غلظت ازون دارد هم مقدار رطوبت هوا به حداقل است که با نتایج (غیاث‌الدین و صورتی، ۱۳۸۸؛ Struzewska and Jefimow, ۲۰۱۶) سازگاری دارد.

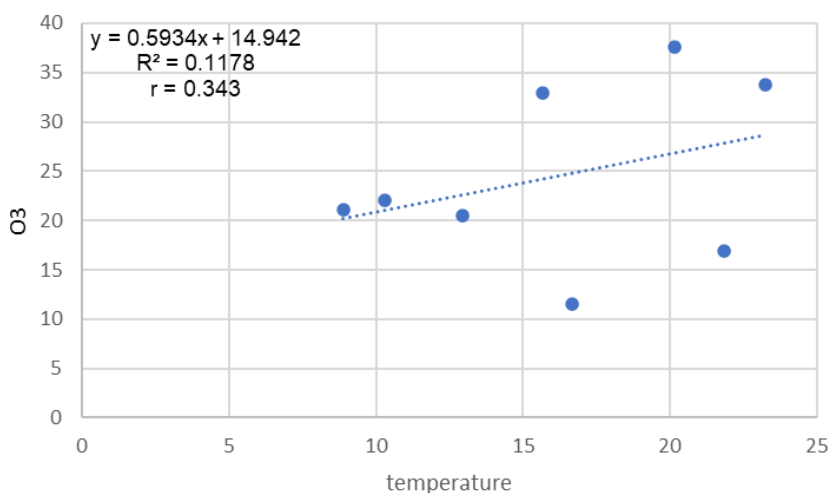
شکل (۸) و جدول (۲) نمودار رگرسیون خطی و آزمون همبستگی پیرسون بین غلظت ازون تروپوسفری و دمای روزانه در ایستگاه زیبا پارک شهر کرمانشاه نمایش می‌دهد. $r=0/343$ نشان از وجود ارتباط بین ازون ساعتی و دمای روزانه را نشان می‌دهد.



شکل ۶. ازون ساعتی و دمای روزانه



شکل ۷. نمودار تغییرات ازن ساعتی و دمای روزانه



شکل ۸. همبستگی خطی بین ازن ساعتی و دمای روزانه

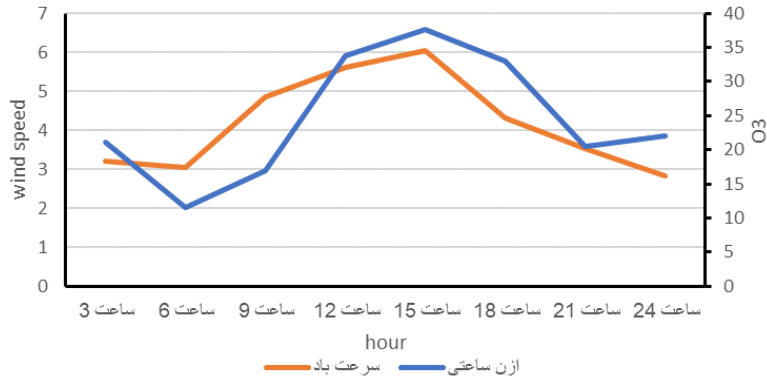
جدول ۲. آزمون پیرسون بین ازن ساعتی و دمای روزانه

| | ازن | دمای روزانه |
|---------------------|-------|-------------|
| Pearson Correlation | ۱ | ۰/۳۴۳ |
| Sig. (۲-tailed) | | ۰/۴۰۵ |
| N | ۸ | ۸ |
| Pearson Correlation | ۰/۳۴۳ | ۱ |
| Sig. (۲-tailed) | ۰/۴۰۵ | |
| N | ۸ | ۸ |

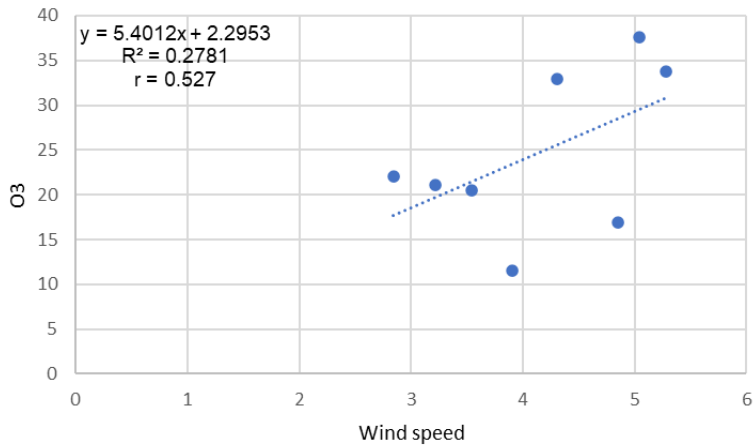
شکل (۹) تغییرات ازن ساعتی با تغییرات سرعت باد را نشان می دهد. که نشان می دهد سرعت باد با غلظت ازن ارتباط مستقیمی دارد. افزایش سرعت باد باعث اختلاط سریع تر و در نتیجه افزایش غلظت ازن می شود. همانطور که در شکل (۹) قابل مشاهده است تغییرات غلظت ازن و سرعت باد با یکدیگر منطبق هستند که در ساعت ۱۵ سرعت باد و غلظت ازن در بیشترین مقدار خود است. نتیجه سرعت باد نیز این موضوع را نشان داده که همراه با افزایش

سرعت باد غلظت ازون افزایشی و با کاهش سرعت باد غلظت ازون نیز روندی کاهشی است که با نتایج (شرعی پور و همکاران، ۱۳۹۸) ارتباط نزدیکی دارد.

شکل (۱۱) و جدول (۳) نمودار رگرسیون خطی و آزمون همبستگی پیرسون بین غلظت ازون ساعتی و سرعت با را نشان می‌دهد. این ضریب همبستگی $r=0/527$ نشان از ارتباط و همبستگی بین غلظت ازون ساعتی و سرعت باد است که سرعت باد سبب اختلاط سریع‌تر ازون و افزایش غلظت آن می‌شود.



شکل ۹. ازون ساعتی و سرعت باد



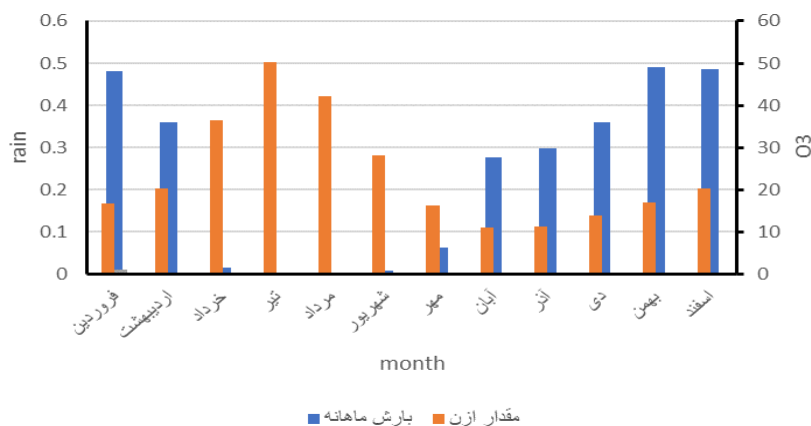
شکل ۱۰. همبستگی خطی بین ازون ساعتی و سرعت باد

جدول ۳. آزمون پیرسون بین ازون ساعتی و سرعت باد

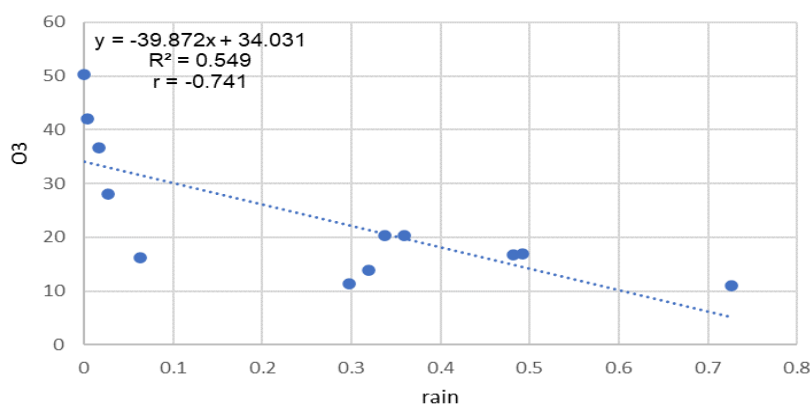
| | ازون | سرعت باد |
|---------------------|-------|----------|
| Pearson Correlation | ۱ | ۰/۵۲۷ |
| Sig. (۲-tailed) | | ۰/۱۷۹ |
| N | ۸ | ۸ |
| Pearson Correlation | ۰/۵۲۷ | ۱ |
| Sig. (۲-tailed) | ۰/۱۷۹ | |
| N | ۸ | ۸ |

شکل (۱۱) مقایسه تغییرات غلظت ازون با بارش را ماهانه نشان می‌دهد. همزمان با بارش نزولات جوی غلظت ازون کاهش می‌یابد ماه‌های خرداد تا مهر که ماه‌های بدون بارندگی سال هستند و با کاهش نزولات جوی مقدار غلظت ازون روندی افزایشی است و از ماه آبان به بعد که همزمان با آغاز بارندگی‌ها است مقدار غلظت ازون روندی کاهشی دارد.

شکل (۱۲) و جدول (۴) نمودار رگرسیون خطی و آزمون همبستگی پیرسون بین ازون ماهانه و بارش ماهانه را نشان می‌دهد. این ضریب همبستگی $r = -0.741$ نشان از همبستگی همبستگی معکوس بین ازون و بارش است که با آغاز بارش، ازون روندی کاهشی دارد و در نبود بارش غلظت ازون روندی افزایشی است.



شکل ۱۱. مقدار ازون و بارش ماهانه



شکل ۱۲. همبستگی خطی بین ازون ماهانه و بارش ماهانه

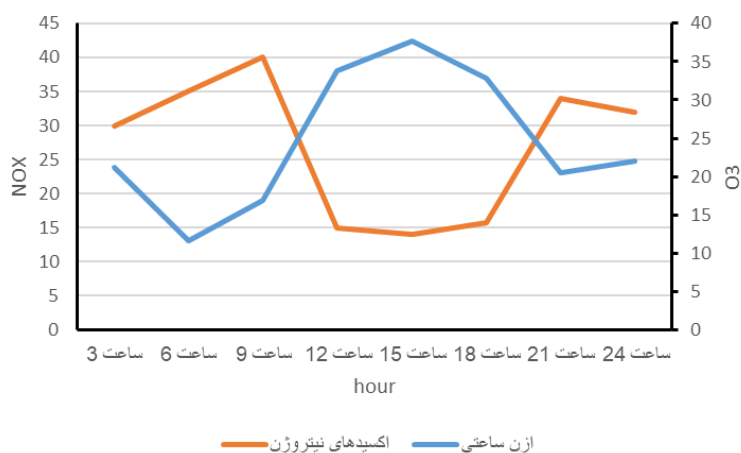
جدول ۴. آزمون پیرسون بین ازون و بارش ماهانه

| | بارش ماهانه | ازون |
|---------------------|---------------|---------------|
| Pearson Correlation | ۱ | -0.741^{**} |
| Sig. (۲-tailed) | | ۰/۰۰۶ |
| N | ۱۲ | ۱۲ |
| Pearson Correlation | -0.741^{**} | ۱ |
| Sig. (۲-tailed) | ۰/۰۰۶ | |
| N | ۱۲ | ۱۲ |

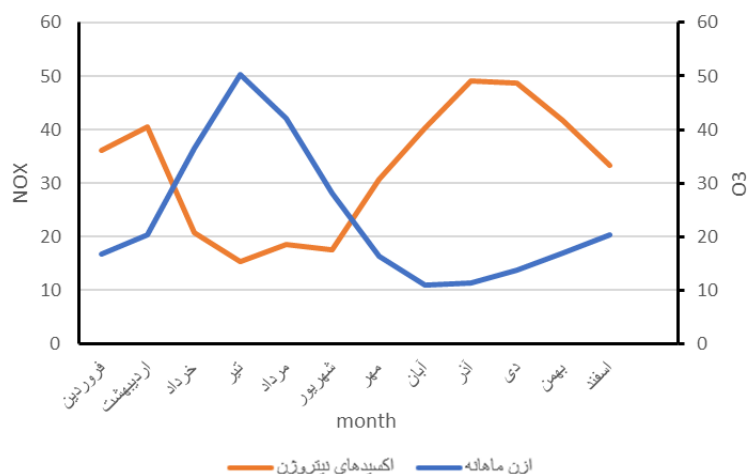
تغییرات غلظت ازن تروپوسفری و اکسیدهای نیتروژن در طول ساعات شبانه‌روز و ماه‌های سال با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ در شکل (۱۳-۱۴) نشان داده شده است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد، در ایستگاه زیبا پارک شهر کرمانشاه روند تغییرات این دو آلاینده مشابه بوده به طوری که در حضور نور خورشید با کاهش اکسیدهای نیتروژن غلظت ازن به حداکثر رسیده است.

الگوهای روزانه ازن نشان می‌دهد که غلظت ازن تروپوسفری بعد از ساعت ۶ صبح افزایش می‌یابد و به مقدار پیک خود در ساعت ۱۵ رسیده و سپس به آرامی کاهش می‌یابد تشکیل فتوشیمیایی آلاینده ازن تحت تأثیر غلظت اکسیدهای نیتروژن باعث ایجاد الگوی روزانه‌ای می‌شود بیشترین مقدار غلظت آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن با غلظت ازن همزمان بوده و در ساعت اولیه صبح و شب روی می‌دهد بیشترین مقدار غلظت ازن چند ساعت بعد از بیشترین مقدار نیتروژن اکسید رخ می‌دهد. بدین صورت که غلظت‌های بالای اکسیدهای نیتروژن، باعث حذف رادیکال‌های OH در واکنش بین OH و NO₂ می‌شود. بنابراین غلظت اکسیدهای نیتروژن با افزایش فعالیت‌های انسانی و منابع متحرک (خودروها) به بیشترین مقدار غلظت خود می‌رسد.

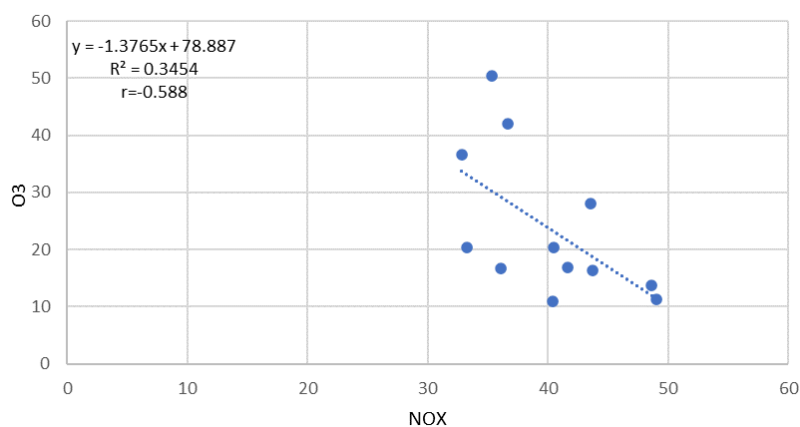
شکل (۱۵) و جدول (۵) نمودار رگرسیون خطی و آزمون همبستگی پیرسون بین غلظت ازن و اکسیدهای نیتروژن را نمایش می‌دهد. این ضریب همبستگی $r = -0.588$ نشان از رابطه معکوس بین غلظت ازن و اکسیدهای نیتروژن است که با افزایش غلظت ازن مقدار اکسیدهای نیتروژن روندی کاهشی پیدا می‌کند که نشان از مصرف اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان واکنش‌گرها است که با نتایج (محمدی و همکاران، ۱۳۹۶)؛ (Susaya et al, ۲۰۱۳)؛ (Nishanth, Kumar, and Valsaraj, ۲۰۱۲) سازگاری دارد.



شکل ۱۳. مقدار غلظت ازن ساعتی و اکسیدهای نیتروژن



شکل ۱۴. مقدار غلظت اوزن ماهانه و اکسیدهای نیتروژن



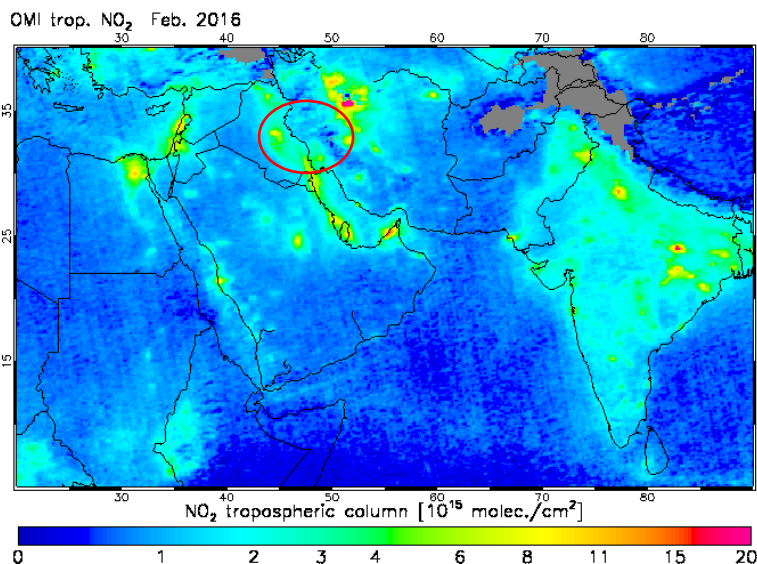
شکل ۱۵. همبستگی خطی بین اوزن و اکسیدهای نیتروژن

جدول ۵. آزمون پیرسون بین اوزن و اکسیدهای نیتروژن

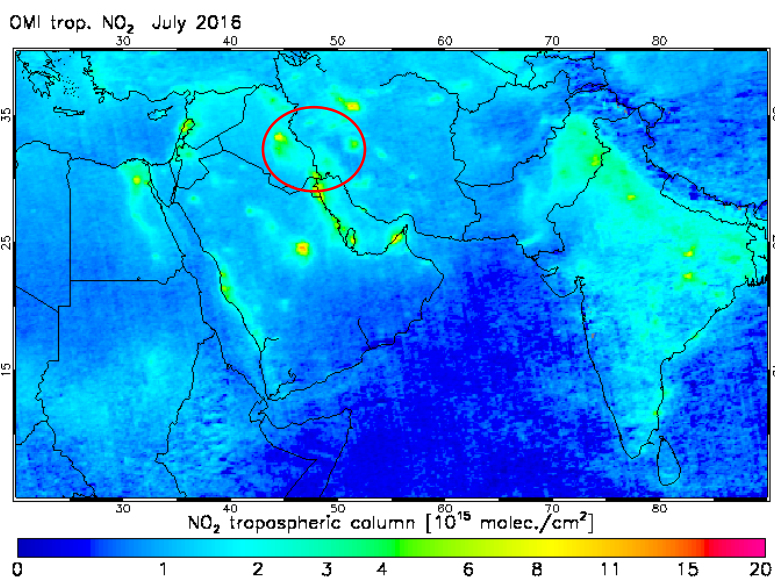
| | اکسیدهای نیتروژن | اوزن |
|---------------------|------------------|---------|
| Pearson Correlation | ۱ | -۰/۵۸۸* |
| Sig. (۲-tailed) | | ۰/۰۴۴ |
| N | ۱۲ | ۱۲ |
| Pearson Correlation | -۰/۵۸۸* | ۱ |
| Sig. (۲-tailed) | ۰/۰۴۴ | |
| N | ۱۲ | ۱۲ |

برای بررسی آلودگی هوای ناشی از دی اکسید نیتروژن و ارتباط آن با اوزن تروپوسفری در شهر کرمانشاه از داده‌های سنجنده OMI استفاده شده است. در شکل (۱۶-۱۷) نقشه میانگین دی اکسید نیتروژن در ۲ ماه از سال در زمستان و تابستان به عنوان نمونه ماه از ماه‌های سال انتخاب و با نرم افزار Arc Map^{۱۰،۲} برای منطقه مورد مطالعه ترسیم شده است. در شکل ۵ مقدار اوزن و دی اکسید نیتروژن نشان داده شده است. بیشترین مقدار غلظت آلاینده‌های دی اکسید نیتروژن با غلظت اوزن همزمان بوده و در ساعت اولیه صبح و شب روی می‌دهد بیشترین

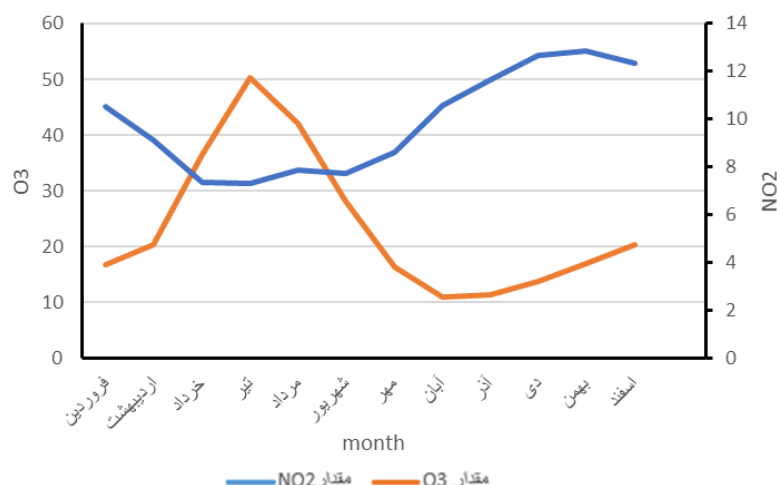
مقدار غلظت ازون چند ساعت بعد از بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن رخ می‌دهد. بدین صورت که غلظت‌های بالای اکسیدهای نیتروژن، باعث حذف رادیکال‌های OH در واکنش بین OH و NO₂ می‌شود. از این رو غلظت دی اکسید نیتروژن با افزایش فعالیت‌های انسانی و منابع متحرک (خودروها) به بیشترین مقدار غلظت خود می‌رسد. همانطور که در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار دی اکسید نیتروژن در فصل زمستان (ماه فوریه) و کمترین مقدار آن در فصل تابستان (ماه جولای) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶. نقشه میانگین ماهانه NO₂ تروپوسفری در ماه فوریه سال ۲۰۱۶



شکل ۱۷. نقشه میانگین ماهانه NO₂ تروپوسفری در ماه جولای سال ۲۰۱۶



شکل ۱۸. مقدار غلظت آزون ساعتی و دی اکسید نیتروژن

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر آلاینده‌های هوا سبب خطرات جدی بر سلامت انسان‌ها و محیط زیست شده است یکی از این آلاینده‌ها آزون تروپوسفری است که باعث ایجاد مشکلاتی در بخش بهداشت، محیط‌زیست و ... شده از این رو شناخت و مطالعه آزون تروپوسفری در سطح شهرهای بزرگ و صنعتی امری ضروری است.

در روند تغییرات غلظت آزون تروپوسفری، پارمترهای هواشناسی و اکسیدهای نیتروژن در ایستگاه زیبا شهر کرمانشاه در سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که بیشینه غلظت آزون در ساعات بعدازظهر بین ساعات ۱۴ تا ۱۷ و مقادیر بیشینه اکسیدهای نیتروژن در شب و ابتدای صبح در سال رخ می‌دهد. همچنین، بررسی تغییرات فصلی غلظت آزون نشان داد که در فصول گرم سال به دلیل فراهم بودن شرایط تشکیل آزون تروپوسفری از جمله شدت تابش نور خورشید، دما و زمان مناسب تابش و وجود آلاینده‌ها شامل اکسیدهای نیتروژن، غلظت آزون تروپوسفری به مراتب بالاتر بوده است و در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد و فصل‌های بهار و تابستان غلظت آزون در بیشترین مقدار ممکن است.

همچنین نتایج نشان داد که ارتباط مستقیمی بین تشعشع خورشید با غلظت آزون وجود دارد، همزمان با افزایش تشعشع خورشید سبب افزایش درجه حرارت هوا می‌شود که باعث افزایش فعالیت فتوشیمیایی و در نتیجه افزایش غلظت آزون می‌شود. این امر در ماه‌های گرم سال (خرداد، تیر و مرداد) قابل مشاهده است. سرعت باد نیز ارتباط مستقیمی با غلظت آزون تروپوسفری دارد، با افزایش سرعت باد اختلاط واکنش‌گرها سریع‌تر و غلظت آزون تروپوسفری افزایش می‌یابد. اما بارش ارتباط معکوسی با غلظت آزون تروپوسفری دارد که با وقوع بارندگی در ماه‌های که با آغاز بارش‌ها همراه است میزان غلظت آزون کاهش پیدا کرده و در ماه‌های خشک سال میزان غلظت روندی افزایشی است. بنابراین عوامل و پارمترهای هواشناسی نقش مهم و بسزایی در تغییرات آزون تروپوسفری دارند. که با رگرسیون خطی و آزمون پیرسون قابل مشاهده است.

نتایج بررسی دی اکسید نیتروژن و اکسیدهای نیتروژن نشان داد که بیشترین مقدار غلظت دی اکسید نیتروژن و اکسیدهای نیتروژن در طول روز برعکس غلظت آزون تروپوسفری است و کمترین غلظت آزون در فصل تابستان رخ می‌دهد که ناشی از افزایش شدت تابش خورشید، افزایش اکسیداسیون دی اکسید نیتروژن و اکسیدهای نیتروژن و در نتیجه سبب افزایش غلظت آزون تروپوسفری می‌شوند در فصل پاییز و زمستان این مقدار روندی افزایشی دارد.

بنابراین روند تغییرات غلظت ازون تروپوسفری برعکس غلظت دی اکسید نیتروژن و نیتروژن اکسیدها است که در بخش روزانه، ماهانه و فصلی قابل مشاهده است که رگرسیون خطی و آزمون پیرسون نیز این مهم را نشان می‌دهند و تصاویر سنجنده OMI نیز این واقعیت را تصدیق می‌کند.

منابع

شرعی‌پور، زهرا. ۱۳۹۱. بررسی غلظت آلاینده ازون و ارتباط آن با پارامترهای NOX و دمای هوا. ششمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا تهران.

شرعی‌پور، زهرا؛ عباسعلی علی اکبری بیدختی. ۱۳۹۸. بررسی عوامل هواشناسی مؤثر بر تغییرات آلاینده ازون سطح زمین طی فصل گرم در شهر تهران. هشتمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا تهران _ دانشگاه تهران.

عزی مند، کیوان؛ عبدالهی کاکرودی، عطاءاله. ۱۳۹۶. تخمین غلظت ازون در سطح زمین با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغییر و تعیین پارامترهای مؤثر. مجله سلامت و محیط‌زیست. فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران. ۴: ۵۳۵-۵۴۶.

غیاث‌الدین، منصور؛ لیلا صورتی. ۱۳۹۳. بررسی تغییرات آلاینده ازون در ایستگاه اقدسیه شرکت کنترل کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی طی مدت هفت ماه (مهر ۸۶ تا پایان فروردین ۸۷) در تهران. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۴: ۷۷-۸۳.

محمدی، ناهیده؛ خالد ظروفچی بنیس، مسعود شکری، محمد شاکر خطیبی، اسماعیل فاتحی فر، امیر محمودیان. ۱۳۹۶. تحلیل ارتباط بین ازون سطحی و اکسیدهای نیتروژن در هوای شهر تبریز. نشریه مهندسی و محیط‌زیست. ۴۷: ۱۰۷-۱۱۴.

اصغری جعفرآبادی، محمد؛ محمد شاکر خطیبی، رضیه ازک، مسعود شاکری. ۱۳۹۴. تأثیر آلودگی هوا بر پذیرش بیمارستانی با علائم تنفسی با استفاده از مدل شبکه عصبی. مجله دانشکده بهداشتی. ۱: ۸۷-۹۸.

محمدی، ناهیده؛ خالد ظروفچی، محمد شاکر خطیبی، اسماعیل چفاتحی فر، علیرضا بهروزسرنند، امیر محمودیان، فرید شیخ الاسلامی. ۱۳۹۵. پیش بینی غلظت آلاینده های گازی در هوای شهر تبریز با استفاده از شبکه عصبی. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست (دانشکده فنی). ۲: ۹۷-۱۰۴.

Abdul Aziz, F. A. B., and Mohd Ali, J. ۲۰۱۹. Tropospheric ozone formation estimation in urban city, bangi, using artificial neural network (ANN). *Computational intelligence and neuroscience*. DOI: ۱۰,۱۱۵۵/۲۰۱۹/۶۲۵۲۹۸۳.

Demuzere, M., and van Lipzig, N. P. ۲۰۱۰. A new method to estimate air-quality levels using a synoptic-regression approach. Part I: Present-day O₃ and PM₁₀ analysis. *Atmospheric Environment*, ۴۴(۱۰): ۱۳۴۱-۱۳۵۵. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.atmosenv.۲۰۰۹,۰۶,۰۲۹.

Gu, Y., Li, K., Xu, J., Liao, H., and Zhou, G. ۲۰۲۰. Observed dependence of surface ozone on increasing temperature in Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, ۲۲۱: ۱۱۷۱۰۸. DOI: ۱۰,۱۰۱۶/j.atmosenv.۲۰۱۹,۱۱۷۱۰۸.

Jiang, N., Hay, J. E., and Fisher, G. W. ۲۰۰۵. Effects of meteorological conditions on concentrations of nitrogen oxides in Auckland. *Weather and Climate*, ۲۴: ۱۵-۳۴. DOI: ۱۰,۲۳۰۷/۲۶۱۶۹۶۷۲.

Katsouyanni, K., Touloumi, G., Spix, C., Schwartz, J., Balducci, F., Medina, S., ... and Anderson, H. R. ۱۹۹۷. Short term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in ۱۲ European cities: results from time series data from the APHEA project. *Bmj*. ۳۱۴:(۷۰۹۵), ۱۶۵۸. DOI: ۱۰,۱۱۳۶/bmj.۳۱۴,۷۰۹۵,۱۶۵۸.

Masoudi, M., Behzadi, F., and Sakhaei, M. ۲۰۱۴. Status and prediction of Ozone as an air pollutant in Tehran, Iran. *Ecology Environment and Conservation*, ۲۰(۲), ۷۷۵-۷۸۰.

Masoudi, M., Ordibeheshti, F., Rajaiipoor, N., and Sakhaei, M. ۲۰۱۶. Status and preparation of prediction models for ozone as an air pollutant in Shiraz, Iran. *Pollution*, ۲(۴): ۳۸۷-۳۹۷. DOI: ۱۰,۷۵۰۸/PJ.۲۰۱۶,۰۴,۰۰۲.

Nishanth, T., Kumar, M. S., and Valsaraj, K. T. ۲۰۱۲. Variations in surface ozone and NO_x at Kannur: a tropical, coastal site in India. *Journal of Atmospheric Chemistry*, ۶۹(۲): ۱۰۱-۱۲۶. DOI: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۸۷۴-۰۱۲-۹۲۳۴-۵.

- Reddy, B. S. K., Kumar, K. R., Balakrishnaiah, G., Gopal, K. R., Reddy, R. R., Ahammed, Y. N., ... and Lal, S. ۲۰۱۰. Observational studies on the variations in surface ozone concentration at Anantapur in southern India. *Atmospheric Research*, ۹۸(۱):۱۲۵-۱۳۹. DOI:۱۰,۱۰۱۶/j.atmosres.۲۰۱۰,۰۶,۰۰۸.
- Schwartz, J. ۲۰۰۵. How sensitive is the association between ozone and daily deaths to control for temperature?. *American journal of respiratory and critical care medicine*, ۱۷۱(۶): ۶۲۷-۶۳۱. DOI:۱۰,۱۱۶۴/rccm.۲۰۰۴۰۷-۹۳۳OC.
- Struzewska, J., and Jefimow, M. ۲۰۱۶. A ۱۵-year analysis of surface ozone pollution in the context of hot spells episodes over Poland. *Acta Geophysica*, ۶۴(۵):۱۸۷۵-۱۹۰۲. DOI:۱۰,۱۵۱۵/acgeo-۲۰۱۶-۰۰۶۷.
- Susaya, J., Kim, K. H., Shon, Z. H., and Brown, R. J. ۲۰۱۲. Demonstration of long-term increases in tropospheric O₃ levels: Causes and potential impacts. *Chemosphere*, ۹۲(۱۱): ۱۵۲۰-۱۵۲۸. DOI:۱۰,۱۰۱۶/j.chemosphere.۲۰۱۳,۰۴,۰۱۷.
- Wang, T., Xue, L., Brimblecombe, P., Lam, Y. F., Li, L., and Zhang, L. ۲۰۱۷. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. *Science of the Total Environment*, ۵۷۵: ۱۵۸۲-۱۵۹۶. DOI:۱۰,۱۰۱۶/j.scitotenv.۲۰۱۶,۱۰,۰۸۱.
- Wang, X., Shen, Z., Cao, J., Zhang, L., Liu, L., Li, J., ... and Sun, Y. ۲۰۱۲. Characteristics of surface ozone at an urban site of Xi'an in Northwest China. *Journal of Environmental Monitoring*, ۱۴(۱): ۱۱۶-۱۲۶. DOI: ۱۰,۱۰۳۹/C1EM1۰۵۴1H.
- Zallaghi, E., Shirmardi, M., Soleimani, Z., Goudarzi, G., Heidari-Farsani, M., Al-Khamis, G., and Sameri, A. ۲۰۱۴. Assessment of health impacts attributed to PM_{۱۰} exposure during ۲۰۱۱ in Kermanshah City, Iran. *Journal of advances in environmental health research*, ۲(۴): ۲۴۲-۲۵۰. DOI: ۱۰,۲۲۱۰۲/JAEHR.۲۰۱۴,۴,۰۱۷۵.
<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.htm>.