



بررسی تحلیلی تاثیر تغییرات اکسیدهای نیتروژن، ترکیبات آلی فرار و دما بر آلودگی ازن تهران

احمد طاهری، بابک خورسندی*، سید محمدرضا علوی مقدم

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

کلمات کلیدی:

آلودگی هوا
ازن
اکسیدهای نیتروژن
ترکیبات آلی فرار
دما
تهران

خلاصه: هدف این مطالعه بررسی تحلیلی تاثیر تغییرات اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ترکیبات آلی فرار (VOC) و دمای محیط بر آلودگی ازن (O_3) در شهر تهران می باشد. در این راستا برای آلاینده های NO_x و O_3 از داده های غلظت ساعتی در شش ماهه نخست سال های ۹۶ تا ۹۸، آلاینده VOC از داده های غلظت میانگین دو هفته ای در مرداد ماه سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸ و دما از داده های ۳۰ دقیقه ای هواشناسی استفاده شده است. ابتدا تغییرات روزانه غلظت آلاینده ها به همراه شاخص متناظر آن ها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نقش تغییرات غلظت نیتروژن اکسید (NO) و نیتروژن دی اکسید (NO_2) بر غلظت O_3 با استفاده از تحلیل آماری بررسی شد. بررسی روند تغییرات روزانه O_3 با NO و NO_2 ، ارتباطی معنی دار با ضریب همبستگی (R^2) به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۸ نشان داد. نتایج نشان داد که علی رغم افزایش روزهای ناسالم از منظر O_3 از سال ۹۶ تا ۹۸، تغییرات مشابهی در NO و NO_2 مشاهده نشده است. سپس مشخص شد گروه BTEX از مجموع VOC، ۱۷/۳ درصد در مرداد سال ۹۸ نسبت به مرداد سال ۹۴ به صورت میانگین افزایش داشته است. همچنین با بررسی تغییرات دما در ساعات روز (ساعت ۷ تا ۱۹) در بازه شش ماهه اول سال های ۹۶ تا ۹۸ مشخص گردید ۳۰ روز با بیشترین غلظت O_3 روزانه، دماهای بالاتری را در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷ و در سال ۹۷ نسبت به سال ۹۶ تجربه کرده اند. لذا افزایش غلظت VOC و دما را می توان یکی از عوامل موثر در روند افزایشی غلظت O_3 دانست.

۱- مقدمه

افزایش دقت و کیفیت اندازه گیری آلودگی هوا در شهر تهران، آلاینده ازن^۱ (به عنوان یک آلاینده ثانویه^۲) نیز در زمره آلاینده های شاخص این شهر، علی الخصوص در نیمه اول سال مطرح شده است. ازن یکی از رایج ترین گونه های آلاینده هوا بوده که اثرات سوء زیادی که بر سلامت انسان، علی الخصوص سیستم تنفسی دارد. ازنی که در نزدیکی سطح زمین وجود دارد (ازن تروپوسفری^۳)، از هیچ منبعی به صورت مستقیم وارد جو نمی شود، بلکه در اثر واکنش های فتوشیمیایی^۴ پیچیده که بین این آلاینده و سایر پیش سازهای^۵ آن (عمدتاً اکسیدهای نیتروژن^۶ (شامل نیتروژن اکسید و نیتروژن دی اکسید) و ترکیبات آلی فرار^۷) در حضور نور خورشید رخ می دهد، تشکیل می شود، از این رو می توان گفت کارآمدترین راه جهت کاهش غلظت

شهر تهران با بیش از ۸/۵ میلیون جمعیت در شب و بیش از ۱۱ میلیون جمعیت در روز با چالش های زیست محیطی متعددی از جمله آلودگی هوا درگیر می باشد [۱]. معضل آلودگی هوا در کلانشهر تهران سابقه ای بیش از چهل سال دارد که با رشد بی رویه تعداد وسایل نقلیه و افزایش چشمگیر مصرف سوخت های فسیلی، بر شدت آن افزوده شده است. هر چند مواردی مانند ارتقاء تکنولوژی احتراق در خودروها، تجهیزات کنترل میزان انتشار در آن ها و جایگزینی سیستم های گرمایشی با گاز طبیعی به جای سیستم های سنتی که آلودگی بسیار زیادی به همراه داشتند، موجب کاهش انتشار از هر یک از منابع به صورت مستقل شده است، اما با افزایش جمعیت و تعداد ناوگان حمل و نقل و صنایع، در مجموع بهبود قابل ملاحظه ای در کیفیت هوای این شهر مشاهده نگردیده است.

در سال های اخیر و با افزایش دما و تشعشع نور خورشید و همچنین

- 1 Ozone
- 2 Secondary Pollutant
- 3 Tropospheric Ozone
- 4 Photochemical Reactions
- 5 Precursor
- 6 Nitrogen Oxides
- 7 Volatile Organic Compounds (VOCs)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: b.khorsandi@aut.ac.ir



این آلاینده، کاهش انتشار پیش‌سازهای آن می‌باشد.

پژوهش‌ها و مطالعات متعددی بر روی آلاینده ازن و اکسیدهای نیتروژن به عنوان مهم‌ترین پیش‌ساز آن به انجام رسیده است. در مطالعات انجام شده توسط اونثو و نوبمیتسو برای منطقه کانتوی ژاپن در سال ۲۰۱۹ [۲]، وی و همکاران با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده جنگل‌های آمازون در سال ۲۰۱۹ [۳] و تحقیقات مشابه دیگری [۱۳-۴] در زمینه بررسی تاثیر تغییرات غلظت اکسیدهای نیتروژن (شامل NO، NO₂ و NO_x) بر ازن بر اساس داده‌های تاریخی پرداخته شده است.

ارتباط بین غلظت ازن به پیش‌سازهای اصلی آن، شامل ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن در مطالعات متعددی [۲۱-۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات با استفاده از مفهوم ozone isopleth خطوط هم‌تراز با غلظت‌های مختلف ازن رسم و نحوه وابستگی غلظت ازن به این دو پیش‌ساز تعیین می‌گردد. در محیط‌های شهری، تعادل بین پیش‌سازهای ازن به گونه‌ایست که اکسیدهای نیتروژن بیش از حد تعادل وجود دارد (NO_x-saturated) که نقش ترکیبات آلی فرار در کاهش غلظت ازن را بیشتر نشان می‌دهد [۲۲]. در این حالت کاهش غلظت ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن می‌تواند به ترتیب کاهش و افزایش غلظت ازن را به همراه داشته باشند.

همچنین در سال‌های گذشته، مطالعات متعددی جهت شناخت آلاینده ازن و ارتباط آن با اکسیدهای نیتروژن برای شهر تهران انجام شده است. بر اساس مطالعات نویسندگان، مهم‌ترین مطالعات انجام شده، توسط شرعی‌پور در سال ۱۳۹۵ [۲۳]، متصدی زرنندی و همکاران در بازه سال‌های ۹۰-۱۳۸۰ [۲۴] و رفیع‌پور و همکاران در سال ۱۳۹۲ [۲۵] انجام شده است. در این مطالعات به بررسی روند تغییرات آلاینده‌های ازن و اکسیدهای نیتروژن (شامل NO، NO₂ و NO_x) به صورت روزانه و سالانه پرداخته شده و همبستگی مناسبی بین آلاینده‌های مذکور نشان داده شده است. همچنین نقش اکسیدهای نیتروژن در تولید ازن بررسی شده و کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن به عنوان کارآمدترین راه کاهش ازن پیشنهاد شده است. با توجه به ماهیت پیچیده آلاینده ازن و واکنش‌های تشکیل دهنده آن، ارائه راهکارهای کنترل غلظت آن نیازمند بررسی متغیرهای متعددی می‌باشد. تعیین غلظت ازن، پیش‌سازهای متعدد آن و متغیرهای هواشناسی با تفکیک‌پذیری زمانی و مکانی بالا برای تعیین وضعیت این آلاینده در جو مورد نیاز می‌باشد. در شهر تهران علی‌رغم افزایش قابل ملاحظه غلظت ازن در سال‌های اخیر و قرار دادن آن در جایگاه دومین آلاینده مهم شهر تهران،

تاکنون بررسی جامعی در زمینه تعیین عوامل افزایش غلظت آن با بررسی تمامی داده‌های موجود صورت نگرفته است.

اگر چه در مطالعات قبلی انجام شده، غلظت ازن و ارتباط آماری آن با اکسیدهای نیتروژن و دما در شهر تهران، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است، اما به نقش ترکیبات آلی فرار به عنوان عاملی موثر در غلظت آلاینده ازن پرداخته نشده است. در این مطالعه برای اولین بار نقش این متغیر بر غلظت ازن در سال‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی با توجه به افزایش قابل ملاحظه غلظت ازن در سال‌های اخیر و افزایش تعداد روزهای ناسالم از منظر این آلاینده از ۷ روز در سال ۹۶ به ۲۵ روز در سال ۹۸، بررسی نقش اکسیدهای نیتروژن، ترکیبات آلی فرار و دمای محیط بر این افزایش نیازمند بررسی مجدد می‌باشد. لذا هدف از انجام این تحقیق، بررسی تحلیلی تاثیر تغییرات غلظت‌های نیتروژن اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و ترکیبات آلی فرار، و دمای محیط بر آلاینده ازن در هوای شهر تهران در بازه سال‌های ۹۸-۹۶ است.

۲- داده و روش انجام کار

متغیرهای هواشناسی از جمله دما و میزان تشعشع، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر تولید آلاینده ازن دارند، به طوری که کنترل سرعت واکنش و همچنین غلظت گونه‌های مختلف در تعادل نهایی توسط این متغیرها تعیین می‌گردد. به عبارتی هر چه دما و میزان تشعشع بالاتر باشد، غلظت ازن تولیدی در جو بالاتر خواهد بود. به همین دلیل این آلاینده به آلاینده فصول گرم شناخته شده و معمولاً در بازه اواسط خرداد تا اواخر مرداد بیشترین مقادیر خود را تجربه می‌کند. لذا به منظور بررسی دقیق‌تر آلاینده ازن، داده‌های مربوط به شش ماه اول سال‌های ۹۶ تا ۹۸ مورد بررسی قرار گرفته است.

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، محدوده شهر تهران، شامل ۲۲ منطقه شهری تعیین شده توسط شهرداری تهران در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، داده‌های آلودگی هوا، شامل داده‌های ساعتی آلاینده‌های ازن و اکسیدهای نیتروژن از ۲۱ ایستگاه سنجش کیفیت هوا، متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا (وابسته به شهرداری تهران) از طریق سامانه اطلاع‌رسانی کیفیت هوا^۱ در بازه زمانی ابتدای سال ۹۶ تا انتهای شهریور ۹۸ استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین اطلاعات مرتبط از گزارش‌های سالانه کیفیت هوا مربوط به سال‌های ۹۶ [۲۶] و ۹۷ [۲۷] چاپ شده توسط شرکت کنترل کیفیت هوا استخراج شده‌اند. داده‌های ترکیبات

داده می‌شود. پس از ۶۰ دقیقه حلال به اتوسمپلر^۱ منتقل شده و محکم بسته می‌شود. در اثر پخش هوا به داخل تیوب، BTEX^۲ توسط زغال فعال جذب شده و سپس در آزمایشگاه، این ترکیبات با استفاده از کربن دی سولفید استخراج می‌گردند. در نهایت آنالیز این مواد با استفاده از Gas (chromatography – flame) ionization detector (GC) (FID –) کلید می‌خورد. در این روش ترکیبات بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلین اندازه‌گیری شده است [۳۲]. یکی از محدودیت‌های این روش، عدم ارائه داده با تفکیک‌پذیری زمانی بالا بوده به طوری که برای هر دو هفته تنها یک مقدار به عنوان میانگین غلظت گزارش می‌گردد. همچنین محدودیت دیگر داده موجود، عدم پیوستگی آن بوده به طوری که تنها برای سال‌های ۹۴ و ۹۸ (بعد از شهریور) داده موجود می‌باشد.

داده‌های دما، مورد استفاده در این پژوهش برای بازه مورد مطالعه با تفکیک زمانی ۳۰ دقیقه برای ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد، متعلق به سازمان هواشناسی کشور، از درگاه سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده آمریکا^۳ استخراج گردیده است.

شاخص کیفیت هوا در این مطالعه به دو صورت شاخص روزانه (۲۴ ساعته) و شاخص ساعتی گزارش شده است. در شهر تهران، شاخص روزانه بر اساس داده‌های ۲۴ ساعته، بر اساس دستورالعمل تهیه شده توسط وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی محاسبه و در ساعت ۱۱ صبح هر روز اعلام می‌گردد، در حالی که شاخص ساعتی در هر ساعت و با استفاده از داده‌های ۱۲ ساعت گذشته (با تاکید بر ۳ ساعت گذشته) محاسبه و اعلام می‌گردد.

بررسی روند تغییرات و انجام آنالیزهای آماری در این مطالعه با استفاده از نرم افزارهای MATLAB و SPSS به انجام رسیده است. از نرم‌افزار مذکور جهت تعیین روندهای روزانه و سالانه و همچنین تعیین همبستگی میان داده‌های غلظت آلاینده‌های ازن و اکسیدهای نیتروژن و از نرم‌افزار SPSS به برای انجام آنالیزهای آماری استفاده شده است.

۳- بحث و بررسی

۳-۱- بررسی آلاینده ازن در بازه سال‌های ۹۶-۹۸

بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در ۲۱ ایستگاه اندازه‌گیری کیفیت هوا در سطح شهر تهران، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در

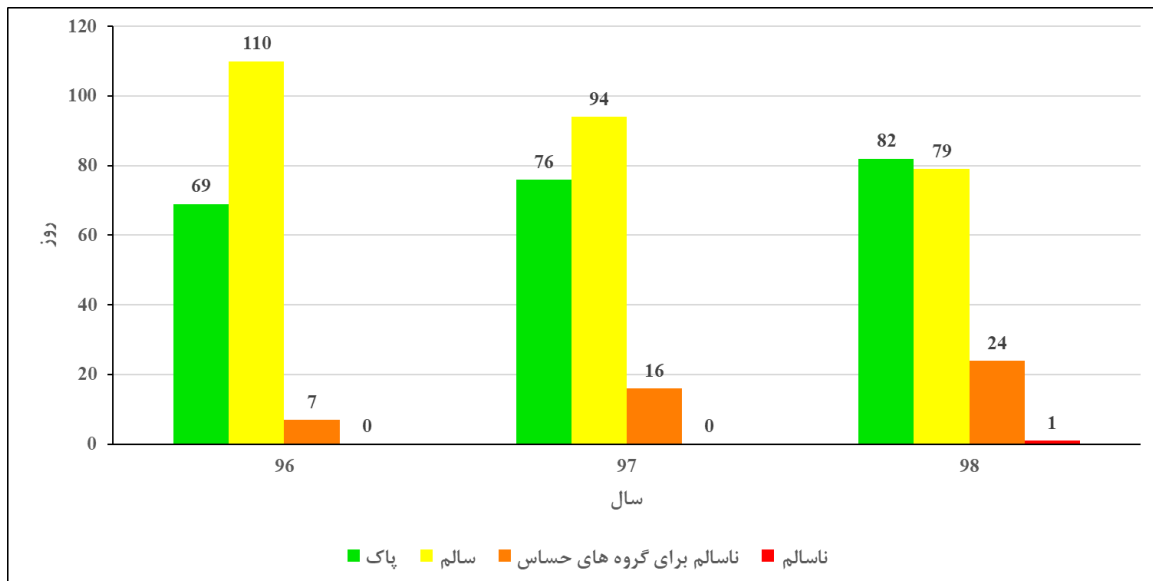
آلی فرار اندازه‌گیری شده با روش پسیو با میانگین دو هفته‌ای و دمای محیط با تفکیک زمانی ۳۰ دقیقه مربوط به ایستگاه هواشناسی مهرآباد مورد استفاده قرار گرفته است.

بر اساس اطلاعات اخذ شده از درگاه اینترنتی شرکت کنترل کیفیت هوا در تاریخ ۹۸/۸/۱، داده‌های ساعتی آلاینده‌های ازن و اکسیدهای نیتروژن در ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، با استفاده از تجهیزات سنجش، به صورت خودکار و پیوسته اندازه‌گیری و به صورت برخط گزارش می‌شوند. تجهیزات اندازه‌گیری آلاینده ازن مورد استفاده در ایستگاه‌های مذکور از برند Ecotech, Australia و مدل Serinus10 و همچنین برند Environment S.A, France مدل O342 می‌باشند که مبنای اندازه‌گیری در آن‌ها روش جذب ماوراء بنفش و استفاده از رابطه Lambert می‌باشد [۲۹ و ۲۸].

همچنین بر اساس اطلاعات مذکور، اندازه‌گیری اکسیدهای نیتروژن نیز به صورت پیوسته با استفاده از تجهیزات Ecotech, Australia مدل Serinus40 و Environment S.A, France مدل AC32M بر مبنای روش Chemiluminescence انجام می‌شود [۳۱ و ۳۰]. لازم به ذکر است که هر سیکل اندازه‌گیری در آنالیزهای اکسیدهای نیتروژن (بسته به نوع آنالیز) بین ۳۶ تا ۴۸ ثانیه می‌باشد. همچنین یک سیکل اندازه‌گیری در آنالیزهای ازن به ۲۰ ثانیه زمان نیاز دارد. منظور از "داده‌های ساعتی" گزارش شده در این تحقیق، میانگین تمامی داده‌های غلظت اندازه‌گیری شده در بازه‌های اشاره شده (طی یک ساعت) می‌باشد.

داده‌های ترکیبات آلی فرار گزارش شده توسط شرکت کنترل کیفیت هوا با روش اندازه‌گیری پسیو با تفکیک زمانی دو هفته‌ای به دست آمده است. در این روش فیلترهای جاذب به مدت دو هفته در معرض هوای محیط قرار گرفته و سپس میزان آلاینده در معرض آن در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار می‌گیرد. داده‌های حاضر توسط اندازه‌گیری با استفاده از نمونه‌بردارهای ساخت شرکت Passam Co. Männedorf, Swit-) Passam (zerland) به دست آمده است. این نمونه‌بردارها از یک لوله شیشه‌ای دو سر باز حاوی زغال تشکیل و توسط سلولز استات پوشیده شده‌اند. سپس به منظور حفظ نمونه‌بردارها در محیط از عواملی همچون باد و باران، در هنگام نصب پوشش مناسب بر روی آن‌ها قرار می‌گیرد. نمونه‌بردارها پس از جمع‌آوری، باز شده و پس از اضافه کردن زغال فعال به مجرا، ۱/۵ میلی‌لیتر کربن دی سولفید اضافه می‌شود. سپس مجرا بسته شده و به آرامی تکان

1 Auto sampler vial
2 Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene
3 ncdc.noaa.gov



شکل ۱. وضعیت کیفیت هوای شهر تهران از نظر آلاینده ازن در شش ماه نخست سال های ۹۶-۹۸ بر اساس داده های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا

Fig. 1. Air quality index in terms of ozone in Tehran in the first half of 1396-98 based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company

۲ نشان می دهد که انحراف معیار داده های ساعتی، نسبت به میانگین آن ها مقادیر بزرگی می باشند که با توجه به پراکندگی ایستگاه های اندازه گیری در ۲۱ نقطه از سطح شهر و با کاربری های کاملاً متفاوت از مسکونی تا ترافیکی، اختلاف نسبتاً زیاد مقادیر غلظت آلاینده ها از یکدیگر و به دنبال آن، مقادیر زیاد انحراف معیار قابل توجهی می باشند. همچنین با توجه به اعداد جدول ۲ می توان افزایش غلظت ازن را در ساعات ظهر با حداکثر تابش نور خورشید را مشاهده نمود.

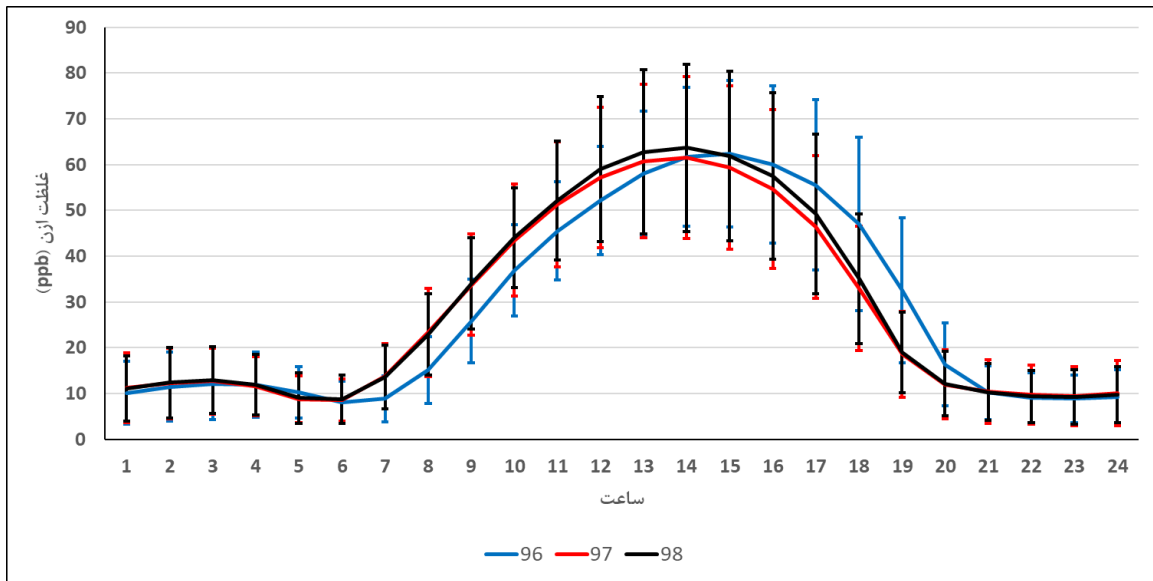
شکل ۲ میانگین تجمعی آلاینده ازن در شش ماه اول سال های ۹۶-۹۸ را نشان می دهد. بر اساس روند کاملاً مشابه نمودارها، می توان گفت با شروع روز و آغاز تابش خورشید، غلظت آلاینده ازن شروع به افزایش می کند و با رسیدن به ساعات شب و کاهش شدت تابش، غلظت این آلاینده به شدت کاهش می یابد. روند مذکور با توجه به تولید آلاینده ازن توسط واکنش های فتوشیمیایی و تاثیر بالای تشعشع خورشید در کنترل واکنش های مذکور، مورد انتظار و قابل توجیه می باشد.

بر اساس نمودارهای رسم شده در شکل ۲، حداکثر مقادیر غلظت ازن در سال ۹۶ در بازه ساعات ۱۶-۱۴ (میانگین ساعتی ۶۱/۳ ppb) مشاهده شده است. این در حالی است که در سال های ۹۷ و ۹۸، حداکثر مقادیر غلظت ازن

شش ماهه اول سال ۹۶ کیفیت هوای شهر تهران از نظر آلاینده ازن، ۶۹ روز در وضعیت پاک، ۱۱۰ روز در وضعیت سالم و ۷ روز در وضعیت ناسالم برای گروه های حساس قرار داشته است.

در شش ماه اول سال ۹۷، وضعیت هوای شهر تهران ۷۶ روز در وضعیت پاک، ۹۴ روز در وضعیت سالم و ۱۶ روز در وضعیت ناسالم برای گروه های حساس قرار داشته است. این در حالی است که شش ماهه اول سال ۹۸، ۸۲ روز پاک، ۷۹ روز سالم و ۲۴ روز ناسالم برای گروه های حساس را نشان می دهد. لازم به ذکر است که در سال ۹۸ یک روز نیز شاخص کیفیت هوا از نظر آلاینده ازن در وضعیت ناسالم برای کلیه اقشار جامعه را نشان می دهد که بالاترین شاخص از زمان اندازه گیری غلظت ازن در شهر تهران (۱۳۸۵) تا به امروز می باشد.

بر اساس توضیحات ارائه شده، تعداد روزهای ناسالم از نظر آلاینده ازن در شهر تهران در سه سال گذشته افزایش قابل ملاحظه ای را نشان می دهد. همچنین میانگین غلظت آلاینده های ازن و اکسیدهای نیتروژن در شش ماه نخست سال های ۹۶-۹۸ بر اساس داده های شرکت کنترل کیفیت هوا در جدول ۲ (پیوست) آمده است. با استفاده از این جدول می توان میانگین داده ها به همراه انحراف معیار تغییرات آن ها را مشاهده نمود. همچنین جدول



شکل ۲. میانگین تجمعی ساعتی غلظت آلاینده ازن در شش ماه نخست سال‌های ۹۶-۹۸ بر اساس داده‌های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا

Fig. 2. Hourly cumulative average ozone concentration in the first half of 1396-98 based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company

برخلاف اختلاف قابل ملاحظه تعداد روزهای ناسالم از نظر آلاینده ازن در بازه سال‌های ۹۶ تا ۹۸ در شهر تهران، با استفاده از آزمون کروسکال-والیس^۲ می‌توان مشاهده کرد که غلظت‌های میانگین تجمعی ساعتی ازن که در شکل ۲ و جدول ۲ نشان داده شده‌اند، در این سال‌ها اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند. بنابراین با توجه به تعریف شاخص کیفیت هوا و نحوه محاسبه آن، می‌توان افزایش تعداد روزهای ناسالم را در اثر افزایش حداکثر مقادیر ساعتی روزانه آلاینده ازن دانست.

بر اساس تعریف شاخص کیفیت هوا برای آلاینده ازن در استانداردهای رایج مورد استفاده، در غلظت‌های بالا و در حالی که شاخص بالای ۱۰۰ باشد، شاخص می‌تواند بر اساس داده یک ساعته محاسبه گردد؛ در حالی که برای غلظت‌های پایین‌تر و شاخص زیر ۱۰۰، شاخص روزانه بر اساس میانگین ۸ ساعته محاسبه می‌گردد. لذا افزایش روزهای با شاخص بالای ۱۰۰ (ناسالم برای گروه‌های حساس و ناسالم) را می‌توان به افزایش حداکثر غلظت ساعتی در مقابل افزایش کلی سطح این آلاینده نسبت داد. شکل ۳ تغییرات شاخص برخط که تاثیرپذیری بیشتری از تغییرات ساعتی غلظت آلاینده ازن دارد را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود،

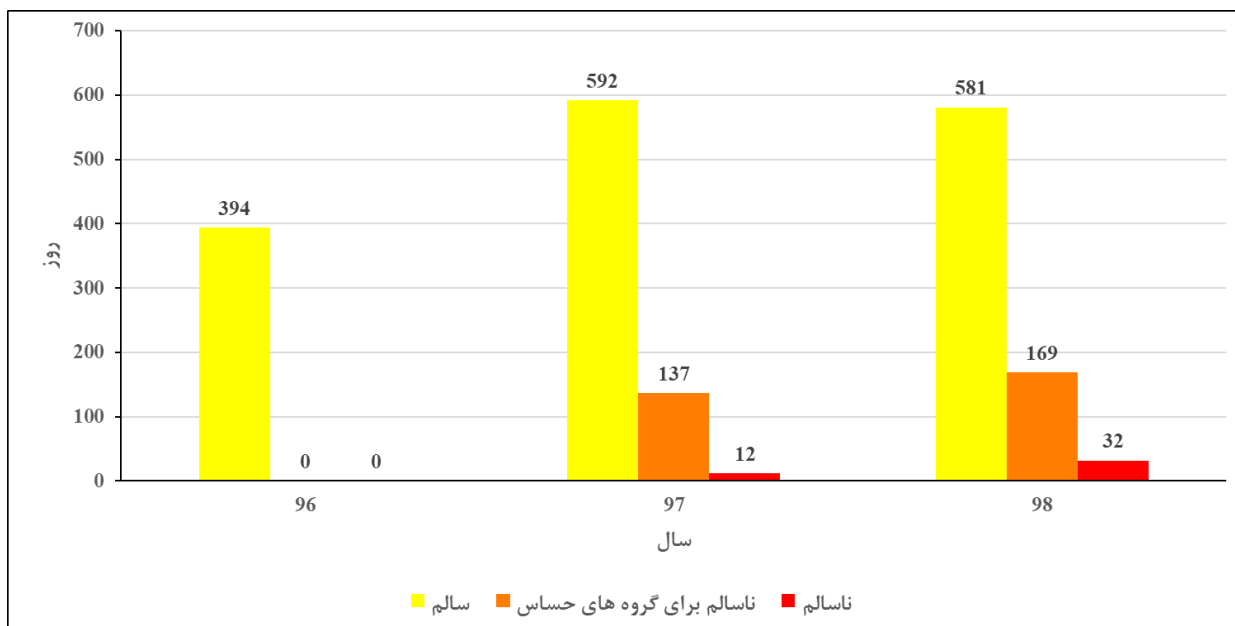
بازه ساعات ۱۳-۱۵ (به ترتیب با میانگین‌های ساعتی ۶۰/۵ ppb و ۶۰/۵ ppb و ۶۱/۸) به ثبت رسیده است. ضمناً حداکثر مطلق غلظت ازن در سال‌های ۹۶، ۹۷ و ۹۸ به ترتیب برابر با ۱۶۳ ppb (ایستگاه صدر)، ۱۸۸ ppb (ایستگاه شریف) و ۱۷۸ ppb (ایستگاه شهرداری منطقه ۲۱) بوده است.

لازم به ذکر است که روند مشابهی در مطالعات مشابه از جمله مطالعه وی و همکاران در سال ۲۰۱۹ در آمازون [۳] با پیک در بازه زمانی ۱۳-۱۵ (میانگین ساعتی ۳۵ ppb) مشاهده شده است. همچنین مطالعه پلوکوسته و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۶] در منطقه لس‌آنتیلس^۱ پیک غلظت ازن را در بازه زمانی ۱۲-۱۴ (میانگین ساعتی ۴۵ ppb) نشان داد. در مطالعه دیگری که توسط تونگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۰] در منطقه نینگبو چین انجام شد، پیک غلظت ازن در بازه زمانی ۱۶-۱۴ (میانگین ساعتی ۵۳ ppb) مشاهده شده است.

با مقایسه روند تغییرات روزانه و بازه‌های دارای حداکثر مقادیر غلظت ازن در تهران با سایر مناطق بررسی شده، می‌توان مشاهده نمود که علی‌رغم روند یکسان و ساعات پیک مشابه، حداکثر مقادیر غلظت ازن در شهر تهران نسبت به سایر مناطق به مراتب بالاتر می‌باشد.

2 Kruskal-wallis test

1 Lesser Antilles



شکل ۳. وضعیت کیفیت هوای شهر تهران از نظر آلاینده ازن بر اساس شاخص ساعته در شش ماه نخست سال های ۹۶-۹۸ بر اساس داده های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا

Fig. 3. Hourly air quality index in terms of ozone in Tehran in the first half of 1396-98 based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company

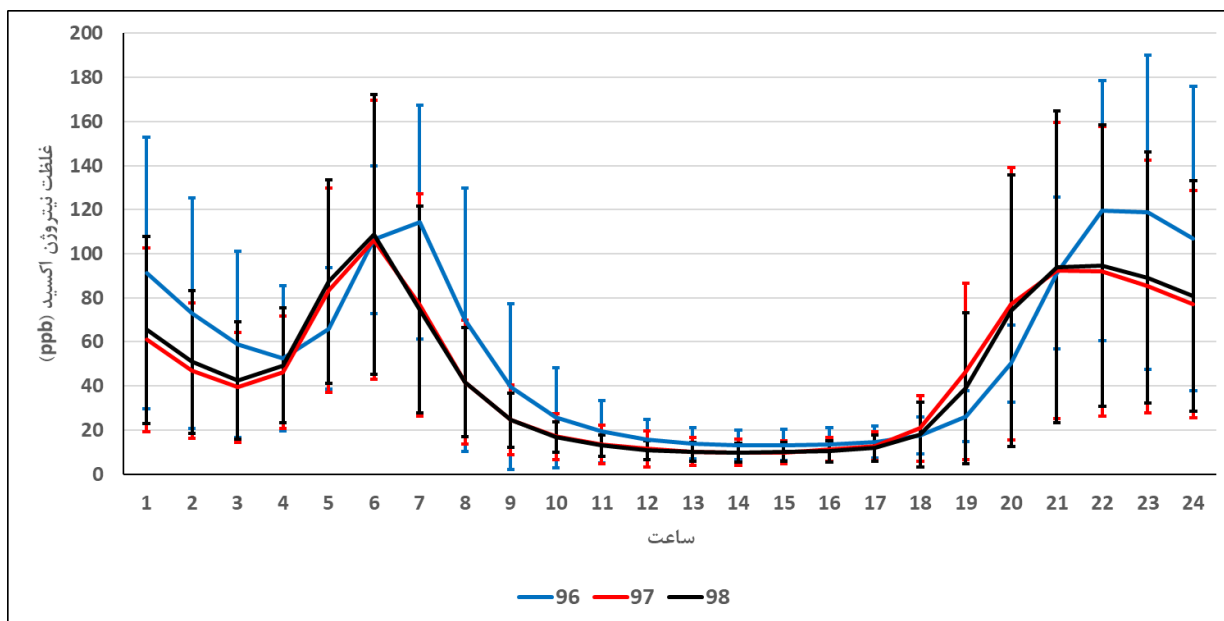
آلاینده به شدت از حجم تردد ناوگان حمل و نقل، به عنوان منبع اصلی انتشار این آلاینده، تاثیر می پذیرد. لذا در روند روزانه آلاینده نیتروژن اکسید، دو روند صعودی در بازه های ۷-۵ صبح و ۲۳-۱۸ عصر مشاهده می شود که بر پیک ترافیک صبح و عصر منطبق می باشند. تفاوت دیگری که در پیک عصر نسبت به پیک روز مشاهده می شود، کاهش کمتر آن پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود می باشد که می توان آغاز تردد ناوگان دیزل از ساعت ۲۲ و همچنین کاهش ارتفاع لایه مرزی در ساعات شب نسبت به روز را از مهم ترین دلایل آن دانست. همچنین لازم به ذکر است که در شکل ۴ روند ثابتی را در کاهش و یا افزایش غلظت این آلاینده از سال ۹۶ تا سال ۹۸ نمی توان مشاهده نمود، همچنین آزمون کروسکال-والیس نیز نشان می دهد غلظت آلاینده نیتروژن اکسید در سه سال مورد بررسی تفاوت معناداری با یکدیگر ندارد.

بر اساس نمودارهای رسم شده در شکل ۴، حداکثر مقادیر غلظت نیتروژن اکسید در سال ۹۶ در پیک صبح در بازه ساعات ۸-۶ (میانگین ساعتی ۹۷ ppb) و در پیک عصر در بازه ساعات ۲۴-۲۲ (میانگین ساعتی ۱۱۵/۱ ppb) به ثبت رسیده است. این در حالی است که در سال های ۹۷ و

تعداد ساعات با شاخص ناسالم برای گروه های حساس و ناسالم در شش ماه نخست سال ۹۸ برابر با ۲۰۱ ساعت بوده در حالی که این مقدار در بازه مشابه در سال ۹۷، ۱۴۹ ساعت بوده و در سال ۹۶ هیچ مقداری در محدوده مذکور به ثبت نرسیده است.

۳-۲- بررسی غلظت اکسیدهای نیتروژن در بازه سال های ۹۶-۹۸

در استانداردهای رایج بین المللی، نیتروژن دی اکسید به عنوان گونه مرجع از بین اکسیدهای نیتروژن، جهت تعریف شاخص کیفیت هوا تعیین شده است. لذا غلظت آلاینده نیتروژن اکسید به صورت مستقیم نقشی در روابط محاسبه شاخص کیفیت هوا ندارد. بر اساس اطلاعات اخذ شده از درگاه اینترنتی شرکت کنترل کیفیت هوا در شش ماهه نخست سال ۹۸، ۳ روز هوای شهر تهران از نظر آلاینده نیتروژن دی اکسید در وضعیت ناسالم برای گروه های حساس قرار گرفته است، در حالی که در بازه مشابه در سال های ۹۶ و ۹۷ تمامی مقادیر ثبت شده در محدوده پاک و سالم می باشند. شکل ۴ تغییرات میانگین جمعی غلظت آلاینده نیتروژن اکسید را در شش ماهه نخست سال، طی سال های ۹۶-۹۸ نشان می دهد. همانطور که در این شکل و داده های جدول ۲ مشخص است، روند تغییرات روزانه این



شکل ۴. تغییرات میانگین تجمعی غلظت نیتروژن اکسید (NO) را در شش ماهه نخست سال، طی سال‌های ۹۶-۹۸ بر اساس داده‌های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا

Fig. 4. NO cumulative mean concentration in the first half of 1396-98, based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company

احتراقی غالباً به شکل نیتروژن اکسید انتشار می‌یابد و بخشی از آن در جو به نیتروژن دی‌اکسید تبدیل می‌شود. از این رو می‌توان گفت بخش غالب نیتروژن اکسید به صورت آلاینده اولیه^۱ بوده در حالی که نیتروژن دی‌اکسید عمدتاً به عنوان آلاینده ثانویه وجود دارد. لذا انتظار می‌رود تغییرات غلظت ساعتی نیتروژن دی‌اکسید، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برخلاف نیتروژن اکسید، وابستگی کمتری به منابع انتشار داشته باشد با این وجود این آلاینده روندی مشابه نیتروژن اکسید با دو پیک صبح و عصر را نشان دهد.

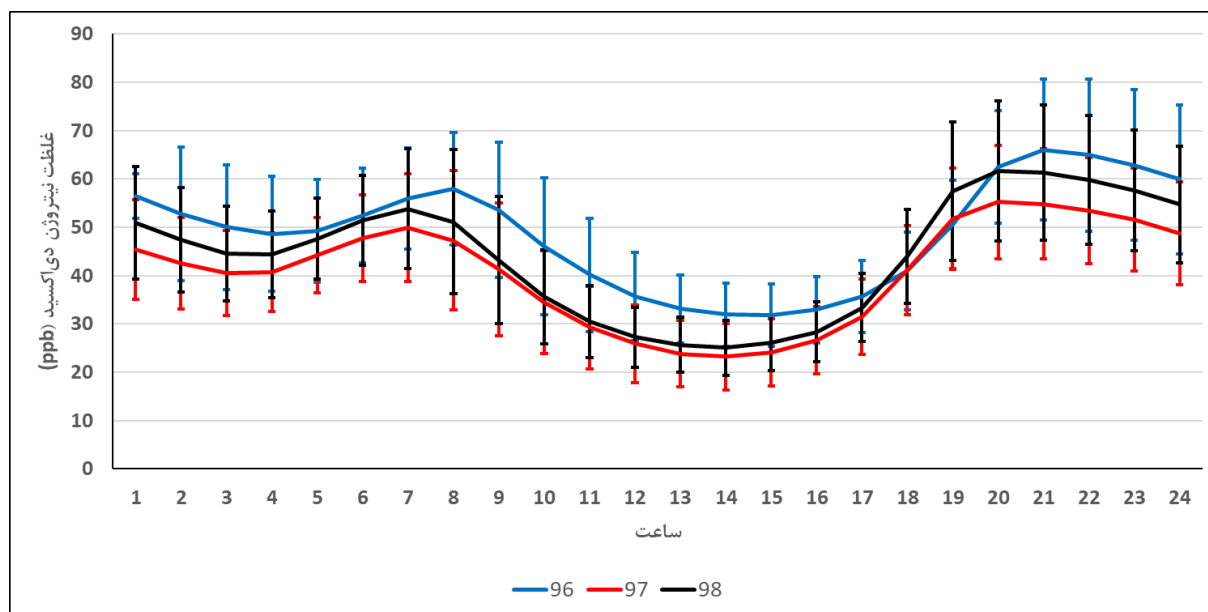
بر اساس نمودارهای رسم شده در شکل ۵، حداکثر مقادیر غلظت نیتروژن دی‌اکسید در سال ۹۶ در پیک صبح در بازه ساعات ۷-۹ (میانگین ساعتی ۵۵/۸ ppb) و در پیک عصر در بازه ساعات ۲۱-۲۳ (میانگین ساعتی ۶۴/۶ ppb) مشاهده شده است. این در حالی است که در سال‌های ۹۷ و ۹۸، پیک صبح در بازه ساعات ۶-۸ (به ترتیب با میانگین‌های ساعتی ۴۸/۳ ppb و ۵۲/۱ ppb) و برای پیک عصر نیز حداکثر مقادیر در بازه ساعات ۲۰-۲۲ برای سال‌های ۹۷ و ۹۸ (به ترتیب با میانگین‌های ساعتی ۵۴/۵ ppb

۹۸ پیک صبح در بازه ساعات ۷-۵ (به ترتیب با میانگین‌های ساعتی ۸۸/۸ و ۹۰/۳ ppb) و پیک عصر در بازه ساعات ۲۲-۲۴ (به ترتیب با میانگین‌های ساعتی ۸۹/۸ ppb و ۹۲/۶ ppb) مشاهده شده است. ضمناً حداکثر مطلق غلظت نیتروژن اکسید ثبت شده در سال‌های ۹۶، ۹۷ و ۹۸ به ترتیب برابر با ۱۲۰۹ ppb (ایستگاه فتح)، ۱۱۲۱ ppb (ایستگاه شریف) و ۱۰۳۷ ppb (ایستگاه فتح) می‌باشند.

تغییرات میانگین تجمعی غلظت آلاینده نیتروژن دی‌اکسید در شش ماهه نخست سال، طی سال‌های ۹۶-۹۸ در شکل ۵ نشان داده شده است. برای این آلاینده نیز همانند آلاینده نیتروژن اکسید، تغییرات مشخص و قابل توجهی در سه سال گذشته مشاهده نمی‌شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که شرایط تعادل بین گونه‌های اکسیدهای نیتروژن در طول سه سال گذشته تغییرات قابل ملاحظه‌ای را تجربه نکرده است. همچنین بر اساس آزمون کروسکال-والیس، تفاوت معناداری بین غلظت آلاینده نیتروژن دی‌اکسید در سال‌های ۹۶ تا ۹۸ وجود ندارد.

وجه تمایز مهم آلاینده‌های نیتروژن دی‌اکسید و نیتروژن اکسید مربوط به ماهیت انتشار و تغییرات آن‌ها در جو می‌باشد. اکسیدهای نیتروژن از منابع

1 Primary Pollutant



شکل ۵. تغییرات میانگین تجمعی غلظت نیتروژن دی اکسید (NO₂) را در شش ماهه نخست سال، طی سال‌های ۹۶-۹۸ بر اساس داده‌های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا

Fig. 5. NO₂ cumulative mean concentration in the first half of 1396-98, based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company

مشاهده کرد که غلظت این آلاینده‌ها در شهر تهران مقادیر بسیار بالاتری نسبت به سایر نقاط بررسی شده دارند.

۳-۳- بررسی ارتباط آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و ازن

غلظت نهایی ازن در جو تابع عوامل مختلفی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- ۱) شرایط محیطی (دما، شدت تابش نور خورشید، رطوبت و...)
- ۲) غلظت سایر آلاینده‌ها (اکسیدهای نیتروژن، ترکیبات آلی فرار، کربن منوکسید و...)

۳) فعل و انفعالات شیمیایی [۳۳-۳۵]

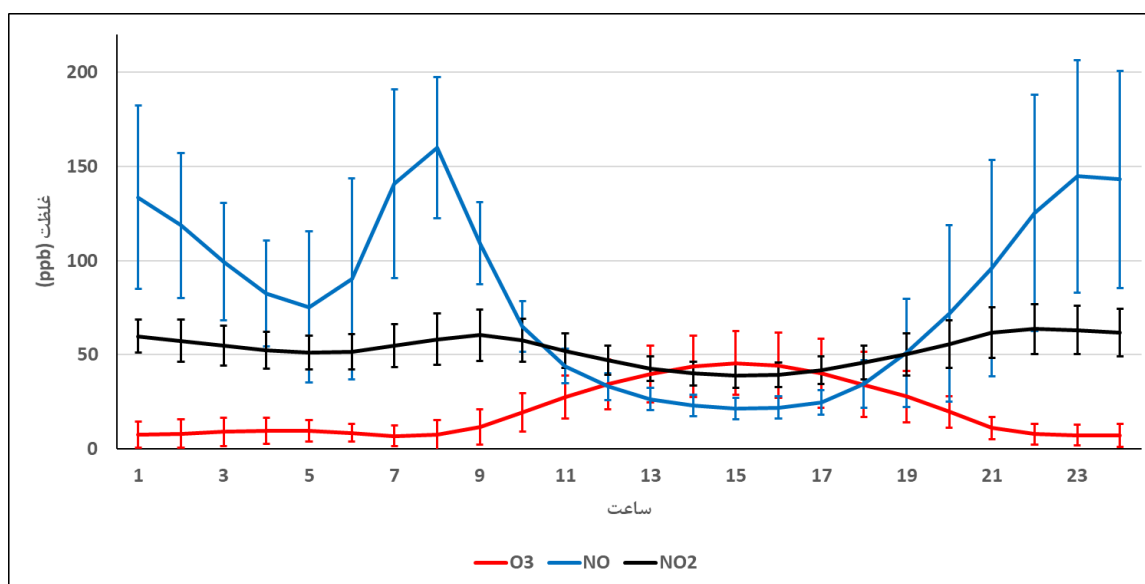
فعل و انفعالات شیمیایی دارای ماهیت بسیار پیچیده‌ای هستند. با این وجود می‌توان با تقریب خوبی این فرآیندها را ساده‌سازی کرد. به طور کلی می‌توان گفت که واکنش‌های بین ازن و گونه‌های اکسیدهای نیتروژن، شامل نیتروژن اکسید و نیتروژن دی اکسید به شکل زیر قابل بیان می‌باشند

[۳۳-۳۵]



و ۶۰/۹ ppb) به ثبت رسیده است. ضمناً حداکثر مطلق غلظت نیتروژن دی اکسید ثبت شده در سال‌های ۹۶، ۹۷ و ۹۸ به ترتیب برابر با ۳۲۹ ppb (ایستگاه منطقه ۱۶)، ۳۴۴ ppb (ایستگاه شهر ری) و ۱۷۸ ppb (ایستگاه مسعودیه) می‌باشند.

لازم به ذکر است که روندهای متفاوتی در مطالعات مشابه همچون مطالعه تونگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۰] برای نیتروژن اکسید با تنها یک پیک مشخص در محدوده زمانی ۸-۹ صبح (میانگین ساعتی ppb ۲۰) قابل مشاهده می‌باشد در حالی که برای نیتروژن دی اکسید دو پیک در بازه‌های زمانی ۲۱-۱۹ و ۹-۷ (به ترتیب با میانگین‌های ساعتی ۳۰ و ۲۵) نشان داده شده است. همچنین روندی مشابه در مطالعه پلوکوسته و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۶] با یک پیک نیتروژن اکسید در بازه زمانی ۸-۷ صبح (با میانگین ساعتی ۱۲ μg/m³) و دو پیک در بازه‌های زمانی ۹-۸ صبح و ۲۱-۲۰ (با مقادیر تقریباً برابر با ۱۱ μg/m³) قابل مشاهده می‌باشد. با مقایسه مقادیر غلظت اکسیدهای نیتروژن در شهر تهران با سایر مناطق بررسی شده، می‌توان مشاهده نمود که روند تغییرات غلظت برخلاف آلاینده ازن، متفاوت بوده و هر منطقه روندی مشخص و متناسب با منابع انتشار خود دارد. البته در مورد آلاینده اکسیدهای نیتروژن نیز می‌توان



شکل ۶. میانگین تجمعی تغییرات اکسیدهای نیتروژن شامل نیتروژن اکسید (NO) و نیتروژن دی اکسید (NO₂) را به همراه ازن (O₃) در شش ماهه اول سال‌های ۹۸-۹۶ بر اساس داده‌های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا

Fig. 6. NO, NO₂, and O₃ cumulative mean concentration in the first half of 1396-98, based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company

۹۸-۹۶ نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودارها مشخص است، در طول روز و با افزایش تابش خورشید، از غلظت اکسیدهای نیتروژن کاهش و به غلظت ازن تولیدی از آن‌ها توسط واکنش‌های فتوشیمیایی افزوده می‌شود. همچنین علی‌رغم واکنش (۲) که تولید ازن را بر اساس مصرف نیتروژن دی اکسید توصیف می‌کند، شکل ۶ کاهش بیشتر غلظت نیتروژن اکسید را با افزایش غلظت ازن نشان می‌دهد. این در حالی است که بر اساس شکل ۶، غلظت نیتروژن دی اکسید تغییرات کمتری را در طول روز تجربه می‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در واکنش‌های فتوشیمیایی با حضور نیتروژن اکسید، نیتروژن دی اکسید و ازن در جو، نیتروژن دی اکسید بیشتر به عنوان یک گونه تعادلی عمل کرده و با مصرف آن توسط رابطه (۲)، کاهش غلظت آن توسط رابطه (۱) جبران می‌گردد.

بر اساس شکل ۶، فاصله زمانی تقریباً یک ساعته بین روندهای نیتروژن اکسید و نیتروژن دی اکسید وجود دارد. از آنجا که نیتروژن اکسید موجود در جو بیشتر به صورت اولیه انتشار می‌یابد ولی نیتروژن دی اکسید بیشتر طی فرآیندهای شیمیایی و با محوریت نیتروژن اکسید به صورت ثانویه شکل می‌گیرد، این اختلاف فاز قابل توجیه می‌باشد.

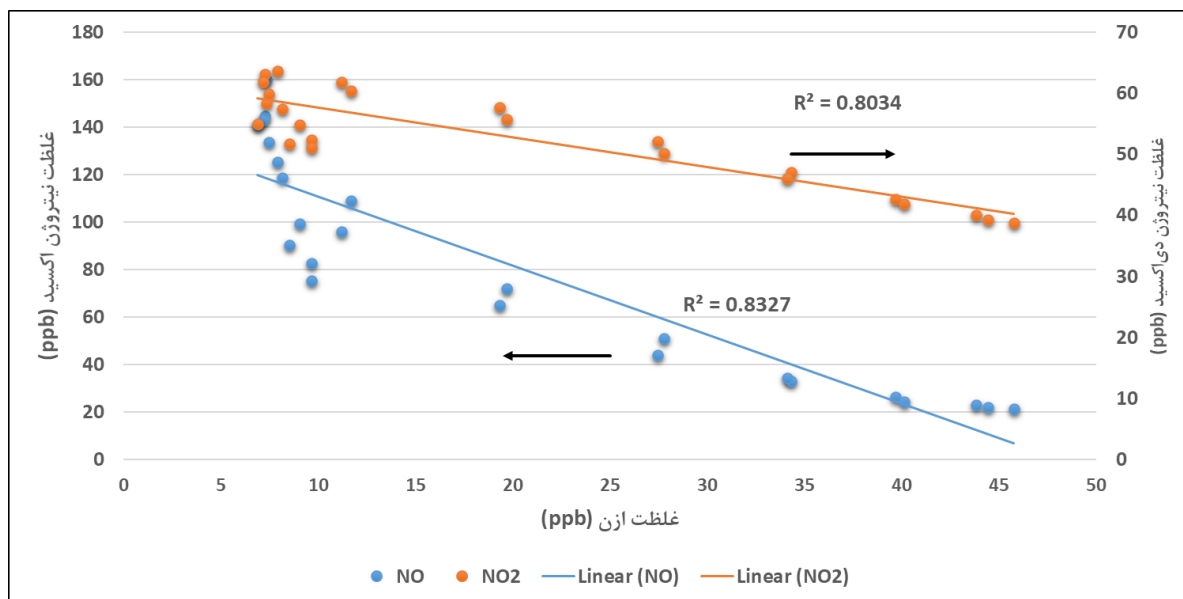
در شکل ۷ مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی (R²) نیتروژن اکسید



بنابراین همانطور که در روابط فوق مشاهده می‌شود، ازن به طور مستقیم از نیتروژن دی اکسید در حضور نور خورشید تولید می‌شود، سپس فرآورده‌های واکنش (۲) به عنوان واکنش دهنده‌ها در واکنش (۱) شرکت کرده و ازن تولیدی را مصرف کرده و مجدداً تولید نیتروژن دی اکسید می‌کنند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که این دو واکنش در حقیقت یک سیکل بسته و بدون خروجی شیمیایی خالصی می‌باشند و تنها یک رابطه تعادلی بین گونه‌های درگیر در واکنش را تشکیل می‌دهند. تشکیل تعادل مذکور و غلظت هر یک از گونه‌ها در این تعادل به سایر عوامل از جمله متغیرهای محیطی و غلظت ترکیبات آلی فرار نیز بستگی دارد.

با توجه به اطلاعات فوق‌الذکر، در این مطالعه با هدف بررسی آماری و تحلیلی ارتباط ازن با نیتروژن اکسید و نیتروژن دی اکسید، فرض بر ثبات روند سایر گونه و عدم تاثیر آن‌ها بر غلظت ازن در بازه مورد مطالعه در شهر تهران شده است.

شکل ۶ نمودار میانگین تجمعی تغییرات نیتروژن اکسید و نیتروژن دی اکسید را به همراه ازن در شش ماهه اول سال‌های



شکل ۷. همبستگی آلاینده‌های نیتروژن اکسید و نیتروژن دی‌اکسید با ازن در شش ماهه اول سال‌های ۹۸-۹۶ بر اساس داده‌های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا

Fig. 7. Correlation of NO and NO2 with O3 in the first half of 1396-98 based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company

آن قابل توجه نیست. با توجه به آنچه که در جدول ۱ نیز قابل مشاهده است، به صورت کلی ترکیبات آلی فرار گروه BTEX در مرداد سال ۱۳۹۸ نسبت به مرداد سال ۱۳۹۴، ۱۷/۳ درصد افزایش داشته است که همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، عامل اصلی تغییرات محسوس میانگین غلظت این گروه از آلاینده‌ها در بازه مورد بررسی، افزایش غلظت آلاینده‌های تولوئن و زایلن می‌باشد. البته آزمون U مان-ویتنی^۱ نشان داد که غلظت هر پنج آلاینده BTEX اندازه‌گیری شده در سال‌های ۹۴ و ۹۸ با یکدیگر اختلاف معناداری دارند ($p > 0.05$). لذا با توجه به اینکه در بازه مورد مطالعه داده پیوسته ترکیبات آلی فرار در شهر تهران وجود نداشته و تنها داده مذکور در سال‌های ۹۴ و ۹۸ موجود است، در صورت فرض افزایش تدریجی غلظت ترکیبات آلی فرار از سال ۹۴ تا ۹۸، روند مذکور را می‌توان یکی از عوامل مهم افزایش غلظت آلاینده ازن در این بازه دانست.

۳-۵- بررسی ارتباط ازن با اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات آلی فرار با توجه به حدود غلظت اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات آلی فرار در شهر تهران، می‌توان نتیجه‌گیری گفت وضعیت تعادل این گونه‌ها برای

و نیتروژن دی‌اکسید با ازن به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۸ است. به علاوه شیب منفی خطوط برازش شده نیز تایید کننده مصرف دو گونه نیتروژن اکسید و نیتروژن دی‌اکسید در جهت تولید ازن می‌باشد.

۳-۴- بررسی تغییرات آلاینده‌های ترکیبات آلی فرار همانطور که پیش‌تر نیز مورد اشاره قرار گرفت، نیتروژن دی‌اکسید، ترکیبات آلی فرار و کربن مونوکسید در حضور نور خورشید عامل اصلی شکل‌گیری آلاینده ازن است. ترکیبات آلی فرار که از پیش‌سازهای مهم آلاینده ازن به شمار می‌آیند هم به صورت طبیعی وجود دارند و هم توسط انسان ساخته می‌شوند.

در جدول ۱ تغییرات غلظت آلاینده‌های ترکیبات آلی فرار و مجموع آلاینده‌های BTEX در مرداد ماه سال‌های ۹۴ و ۹۸ بر اساس داده‌های دریافتی از شرکت کنترل کیفیت هوا نشان داده شده است. بر اساس داده‌های ثبت شده، میانگین غلظت آلاینده بنزن در مرداد سال ۹۴ نسبت به میانگین آن در مرداد سال ۹۸ تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. برای آلاینده‌های تولوئن و زایلن در مرداد سال ۹۸ نسبت به مرداد سال ۹۴، به ترتیب حدود ۲۴/۵ و ۲۰ درصد افزایش به ثبت رسیده است. در مورد آلاینده اتیل بنزن، اگر چه در مرداد ۹۸ نسبت به ۹۴ افزایش غلظت مشاهده می‌شود، اما مقدار

1 Mann-Whitney U test

جدول ۱. تغییرات غلظت آلاینده‌های ترکیبات آلی فرار در مرداد ماه سال‌های ۹۴ و ۹۸ به دست آمده از داده‌های دریافت شده از شرکت کنترل کیفیت هوا

Table 1. VOCs concentrations in 1394 and 1398 based on the data received from Air Quality Control Company

آلاینده	بازه اندازه‌گیری	منطقه ۱۰	اقدسیه	شهرری	میانگین
بنزن ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	مرداد ۱۳۹۴	۱۲/۷۹	۶/۴۶	۹/۶۶	۹/۶۴
	مرداد ۱۳۹۸	۱۲/۲۳	۵/۷۷	۱۰/۳۷	۹/۴۶
تولون ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	مرداد ۱۳۹۴	۳۴/۲۷	۱۶/۸۸	۳۰/۳۵	۲۷/۱۷
	مرداد ۱۳۹۸	۴۶/۷۷	۱۸/۹۷	۳۵/۷۳	۳۳/۸۲
اتیل بنزن ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	مرداد ۱۳۹۴	۸/۱۹	۴/۰۶	۷/۵۲	۶/۵۹
	مرداد ۱۳۹۸	۱۰/۴	۳/۹۳	۶/۵۳	۶/۹۶
زایلن ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	مرداد ۱۳۹۴	۳۳/۸۹	۱۶/۵۱	۲۸/۲۱	۲۶/۲
	مرداد ۱۳۹۸	۴۶/۸۷	۱۷/۰۷	۳۰/۳	۳۱/۴
BTEX ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	مرداد ۱۳۹۴	۸۹/۱۴	۴۳/۹۲	۷۵/۷۵	۶۹/۶
	مرداد ۱۳۹۸	۱۱۶/۲۷	۴۵/۷۳	۴۲/۹۳	۸۱/۶۴

دلیل در ساعات شب غلظت بسیار کاهش می‌یابد. از این رو بازه زمانی ۷-۱۹ که در شش ماه اول تابش خورشید وجود دارد به عنوان زمان روز در نظر گرفته می‌شود. لذا به منظور بررسی دقیق‌تر سهم دما در ازن تولید شده، با توجه به اینکه روزهای با غلظت بالای ازن در هر سه سال، کمتر از سی روز بوده است، سی روز با بیشترین غلظت ازن در زمان روز در سه سال مورد بررسی انتخاب شده است.

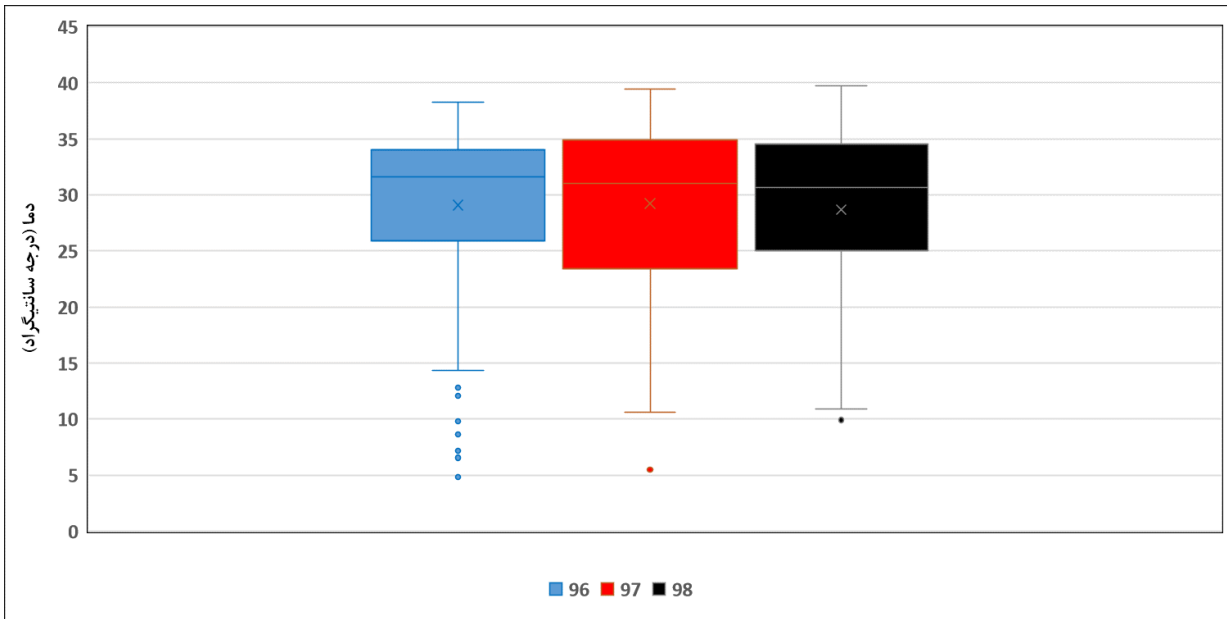
شکل ۹ نمودار جعبه‌ای دمای ثبت شده در زمان روز، برای سی روز با بیشترین میانگین غلظت ازن در زمان روز را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، در سی روز با بالاترین غلظت میانگین ازن در ساعات روز، میانه دما از سال ۹۶ تا ۹۸ روند صعودی داشته است. به طوری که از ۳۲/۷ درجه سانتی‌گراد در سال ۹۶ به ۳۳/۵ در سال ۹۷ و ۳۴/۲ در سال ۹۸ رسیده است. همچنین با توجه به افزایش میانه از سال ۹۶ تا ۹۸، می‌توان نتیجه گرفت نیمه بالایی دما یا به عبارتی ۱۵ روز با بیشترین غلظت ازن روزانه، دماهای بالاتری را در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۷ و در سال ۹۷ نسبت به سال ۹۶ تجربه کرده‌اند. از این رو افزایش دما را می‌توان یکی از عوامل افزایش غلظت ازن در سال‌های ۹۶ تا ۹۸ دانست.

تولید ازن در وضعیت اشباع اکسیدهای نیتروژن^۱ می‌باشد. از این رو انتظار می‌رود با کاهش غلظت اکسیدهای نیتروژن و افزایش غلظت ترکیبات آلی فرار، غلظت ازن افزایش یابد. همچنین افزایش غلظت اکسیدهای نیتروژن و کاهش غلظت ترکیبات آلی فرار، غلظت ازن را کاهش دهد. با بررسی‌های انجام شده در بازه مورد مطالعه، غلظت اکسیدهای نیتروژن تغییرات قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد، در حالی که غلظت ترکیبات آلی فرار افزایش یافته است که می‌تواند از دلایل افزایش غلظت ازن در این بازه باشد.

۳-۶- تغییرات دما

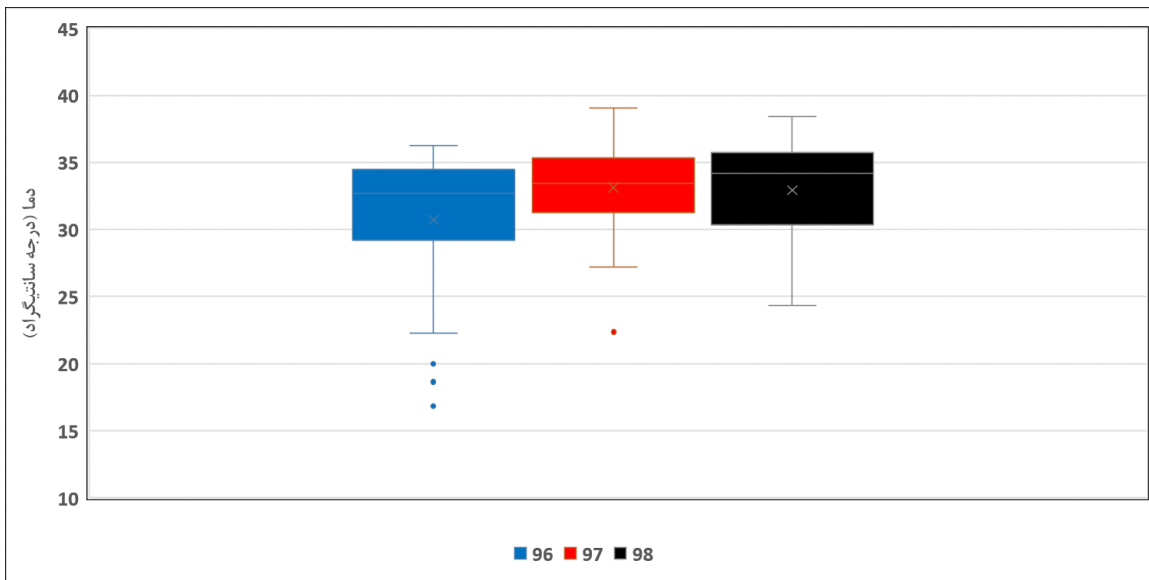
شکل ۸ نمودار جعبه‌ای تغییرات دما برای شش ماه اول سال‌های ۹۶، ۹۷ و ۹۸ را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نیز مشخص است، میانه داده از سال ۹۶ تا ۹۸ کاهش را نشان می‌دهد این در حالیست که انتظار می‌رود با کاهش دما، سرعت واکنش کاهش یافته و غلظت ازن تولید شده کاهش یابد، در حالی که اندازه‌گیری‌ها افزایش غلظت ازن را نشان می‌دهند. تابش خورشید عامل بسیار مهمی در تولید ازن در جو است، به همین

1 NO_x-saturated



شکل ۸. تغییرات دما برای شش ماهه اول سال‌های ۹۶، ۹۷ و ۹۸ (به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه مهرآباد)

Fig. 8. Temperature variations for the first half of 1396, 1397 and 1398 (Mehrabad station)



شکل ۹. تغییرات دما در زمان روز برای سی روز با بالاترین غلظت ازن در زمان روز در شش ماهه اول سال‌های ۹۶، ۹۷ و ۹۸ (به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه مهرآباد و ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا)

Fig. 9. Temperature variations during daytime for thirty days with the highest O₃ concentration during daytime in the first half of 1396, 1397 and 1398 (obtained from Mehrabad station and 21 stations owned by Air Quality Control Company)

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف از انجام این مطالعه، بررسی تحلیلی تاثیر تغییرات غلظت اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات آلی فرار، و دما بر آلودگی ازن در هوای شهر تهران در بازه شش ماهه نخست سال‌های ۹۶ تا ۹۸ بوده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، نتایج به شرح ذیل بیان می‌گردد:

- بر اساس شاخص روزانه آلاینده ازن، در سال‌های ۹۶ تا ۹۸ به ترتیب ۶۹، ۷۶ و ۸۲ روز در وضعیت پاک، ۱۱۰، ۹۴ و ۷۹ روز در وضعیت سالم و ۷، ۱۶ و ۲۴ روز در وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس بر اساس آلاینده ازن قرار داشته است. همچنین در سال ۹۸ نیز یک روز با شاخص ناسالم گزارش شده است. داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت ازن در بازه مورد مطالعه، میانگین $۶۱/۳$ ، $۶۰/۵$ و $۶۱/۸$ ppb را در ساعات پیک غلظت برای سال‌های ۹۶ تا ۹۸ نشان می‌دهند.

- بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، آلاینده‌های نیتروژن اکسید و نیتروژن دی‌اکسید دارای دو پیک صبح و عصر، متناسب با الگوی ترافیک می‌باشند. میانگین غلظت ساعتی نیتروژن اکسید در ساعات پیک صبح برای سال‌های ۹۶ تا ۹۸ به ترتیب برابر با $۸۸/۸$ ، ۹۷ و $۹۰/۳$ ppb و در ساعات پیک عصر برابر با $۱۱۵/۱$ ، $۸۹/۸$ و $۹۲/۶$ ppb می‌باشد. همچنین مقادیر متناظر برای نیتروژن دی‌اکسید در ساعات پیک صبح برابر با $۵۵/۸$ ، $۴۸/۳$ و $۵۲/۱$ و در ساعات پیک عصر برابر با $۶۴/۶$ ، $۵۴/۵$ و $۶۰/۹$ ppb می‌باشند.

- بررسی آماری روند تغییرات روزانه ازن با نیتروژن اکسید و نیتروژن دی‌اکسید، ارتباط معنی‌دار آن‌ها در شهر تهران را با ضریب همبستگی (R^2) نیتروژن اکسید و نیتروژن دی‌اکسید با ازن به ترتیب برابر با $۰/۸۳$ و $۰/۸$ نشان داد. همچنین روند معکوس آن‌ها، حاکی از تولید ازن در قبال مصرف دو گونه دیگر می‌باشد.

- برخلاف روند افزایشی ملاحظه شده در آلاینده ازن، روند تغییرات مشخصی برای اکسیدهای نیتروژن (شامل نیتروژن اکسید و نیتروژن دی‌اکسید) قابل مشاهده نیست. از این رو می‌توان نتیجه‌گیری کرد که

تغییرات ازن در بازه زمانی مذکور در اثر افزایش و یا کاهش اکسیدهای نیتروژن نبوده است.

- با بررسی میانگین غلظتی گروه BTEX از ترکیبات آلی فرار دیده شد در بازه مورد مطالعه مرداد سال ۹۴ و ۹۸ دو آلاینده بنزن و اتیل بنزن با تقریب بالایی ثابت بوده است اما آلاینده تولوئن و زایلین به ترتیب در سال ۹۸ نسبت به سال ۹۴، $۲۴/۵$ و ۲۰ درصد افزایش داشته‌اند. همچنین به صورت کلی میانگین ترکیبات آلی فرار در بازه مورد مطالعه $۱۷/۳$ درصد افزایش داشته است. لذا با فرض افزایش تدریجی آلاینده مذکور در بازه سال‌های ۹۴ تا ۹۸، این مورد را نیز می‌توان از دلایل افزایش غلظت ازن دانست.

- بر اساس تحلیل داده‌های دما، در روزهای با بالاترین غلظت ازن، دمای هوای محیط در سال ۹۸ مقادیر بیشتری از سال ۹۷ در سال ۹۷ مقادیر بیشتری از سال ۹۶ به ثبت رسانده است. از این رو افزایش دما را می‌توان از عوامل افزایش غلظت ازن در بازه سال‌های ۹۸-۹۶ دانست.

- با دیده نشدن تغییرات محسوس در غلظت اکسیدهای نیتروژن و با افزایش میانه دما در بازه مورد بررسی و همچنین با وجود تغییرات چشمگیر آلاینده BTEX در شهر تهران در بازه مورد مطالعه، می‌توان عامل اصلی تغییرات به وجود آمده در آلاینده ازن و افزایش غلظت این آلاینده در جو شهر تهران را تغییرات در ترکیبات آلی فرار و دما دانست.

پیشنهاد می‌شود با توجه به تغییر بازه با حداکثر غلظت آلاینده‌های ازن و اکسیدهای نیتروژن در سال ۹۶ نسبت به سال‌های ۹۷ و ۹۸ و با عنایت به اثرگذاری تغییر زاویه تابش نور خورشید و میزان تشعشع در طول روز بر سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی، تاثیر تغییرات مذکور بر غلظت آلاینده ازن در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

از شرکت کنترل کیفیت هوا که داده‌های اندازه‌گیری شده آلودگی هوا را در اختیار نویسندگان قرار داده است، قدردانی می‌گردد.

جدول ۲. میانگین غلظت آلاینده‌های ازن و اکسیدهای نیتروژن در شش ماه شش ماه نخست سال‌های ۹۸-۹۶ بر اساس داده‌های ۲۱ ایستگاه متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا، دریافت شده از شرکت کنترل کیفیت هوا

Table 2. Cumulative average concentration of O3 and NOx in the first half of 1396-98 based on data from 21 stations, owned by Air Quality Control Company.

سال	۹۶						۹۷						۹۸						
	O ₃	NO ₂	NO _x	O ₃	NO ₂	NO _x	O ₃	NO ₂	NO _x	O ₃	NO ₂	NO _x	O ₃	NO ₂	NO _x	O ₃	NO ₂	NO _x	
۱	۱۷/۱±۷/۱	۶۵/۵±۲۲/۴	۱۱۵/۴±۵۰/۳	۱۱/۳±۶/۸	۶۰/۹±۴۱/۶	۴۵/۴±۱۰/۳	۱۰۵/۱±۴۸/۳	۱۰/۲±۶/۸	۹۱/۳±۶/۷	۵۶/۴±۱۴/۶	۱۳۷/۱±۷۱/۳	۱۲/۴±۷/۷	۵۰/۹±۲۲/۵	۴۷/۴±۱۱/۶	۱۱۵/۴±۵۰/۳	۱۱/۳±۶/۸	۶۰/۹±۴۱/۶	۴۵/۴±۱۰/۳	۱۰۵/۱±۴۸/۳
۲	۱۳/۰±۷/۳	۴۷/۴±۱۰/۸	۹۷/۵±۴۰/۳	۱۲/۲±۷/۵	۴۶/۹±۳۰/۷	۴۲/۵±۹/۵	۸۸/۳±۳۶/۸	۱۱/۵±۲/۵	۷۲/۹±۵/۳	۵۲/۸±۱۳/۸	۱۲۵/۴±۶۱/۹	۱۳/۰±۷/۳	۴۷/۴±۱۱/۶	۱۱۵/۴±۵۰/۳	۱۱/۳±۶/۸	۶۰/۹±۴۱/۶	۴۵/۴±۱۰/۳	۱۰۵/۱±۴۸/۳	
۳	۱۳/۰±۷/۳	۴۷/۴±۱۰/۸	۹۷/۵±۴۰/۳	۱۲/۲±۷/۵	۴۶/۹±۳۰/۷	۴۲/۵±۹/۵	۸۸/۳±۳۶/۸	۱۱/۵±۲/۵	۷۲/۹±۵/۳	۵۲/۸±۱۳/۸	۱۲۵/۴±۶۱/۹	۱۳/۰±۷/۳	۴۷/۴±۱۱/۶	۱۱۵/۴±۵۰/۳	۱۱/۳±۶/۸	۶۰/۹±۴۱/۶	۴۵/۴±۱۰/۳	۱۰۵/۱±۴۸/۳	
۴	۱۳/۰±۷/۳	۴۷/۴±۱۰/۸	۹۷/۵±۴۰/۳	۱۲/۲±۷/۵	۴۶/۹±۳۰/۷	۴۲/۵±۹/۵	۸۸/۳±۳۶/۸	۱۱/۵±۲/۵	۷۲/۹±۵/۳	۵۲/۸±۱۳/۸	۱۲۵/۴±۶۱/۹	۱۳/۰±۷/۳	۴۷/۴±۱۱/۶	۱۱۵/۴±۵۰/۳	۱۱/۳±۶/۸	۶۰/۹±۴۱/۶	۴۵/۴±۱۰/۳	۱۰۵/۱±۴۸/۳	
۵	۹/۰±۵/۵	۸۷/۵±۲۶/۲	۱۳۳/۵±۵۰/۷	۸/۸±۵/۶	۸۳/۵±۴۶/۵	۴۴/۲±۷/۸	۱۲۵/۹±۵۰/۴	۱۰/۳±۵/۶	۶۶/۲±۷/۶	۴۹/۲±۱۰/۶	۱۱۴/۹±۳۴/۵	۹/۰±۵/۵	۸۷/۵±۲۶/۲	۱۳۳/۵±۵۰/۷	۸/۸±۵/۶	۸۳/۵±۴۶/۵	۴۴/۲±۷/۸	۱۲۵/۹±۵۰/۴	
۶	۸/۷±۵/۳	۱۰۰/۷±۶۳/۴	۱۵۸/۳±۶۸/۳	۸/۴±۹/۳	۱۰۶/۳±۶۳/۴	۴۷/۷±۹/۰	۱۵۱/۹±۶۶/۵	۸/۱±۴/۶	۱۰۶/۴±۳۳/۵	۵۲/۵±۹/۸	۱۵۸/۱±۳۹/۸	۸/۷±۵/۳	۱۰۰/۷±۶۳/۴	۱۵۸/۳±۶۸/۳	۸/۴±۹/۳	۱۰۶/۳±۶۳/۴	۴۷/۷±۹/۰	۱۵۱/۹±۶۶/۵	
۷	۱۳/۶±۶/۹	۷۴/۷±۴۶/۸	۱۲۸/۰±۵۵/۷	۱۳/۸±۵/۰	۷۶/۷±۵۰/۴	۴۹/۹±۱۱/۱	۱۲۵/۱±۵۷/۸	۸/۹±۵/۰	۱۱۴/۴±۵۲/۹	۵۵/۹±۱۰/۵	۱۶۹/۴±۵۹/۳	۱۳/۶±۶/۹	۷۴/۷±۴۶/۸	۱۲۸/۰±۵۵/۷	۱۳/۸±۵/۰	۷۶/۷±۵۰/۴	۴۹/۹±۱۱/۱	۱۲۵/۱±۵۷/۸	
۸	۲۲/۹±۸/۹	۴۱/۷±۲۴/۹	۹۲/۳±۲۶/۶	۲۳/۴±۷/۳	۴۱/۸±۲۸/۰	۴۷/۴±۱۴/۴	۸۸/۰±۴۰/۱	۱۵/۲±۲/۳	۷۰/۸±۵۹/۸	۵۸/۰±۱۱/۷	۱۳۷/۷±۶۷/۴	۲۲/۹±۸/۹	۴۱/۷±۲۴/۹	۹۲/۳±۲۶/۶	۲۳/۴±۷/۳	۴۱/۸±۲۸/۰	۴۷/۴±۱۴/۴	۸۸/۰±۴۰/۱	
۹	۳۴/۱±۱۰/۰	۲۴/۵±۱۲/۳	۶۷/۳±۲۳/۳	۳۳/۸±۹/۱	۲۴/۶±۱۵/۷	۴۱/۲±۱۳/۷	۶۵/۰±۲۷/۴	۲۵/۹±۹/۱	۳۹/۷±۳۷/۵	۵۳/۵±۱۴/۰	۹۳/۰±۴۷/۰	۳۴/۱±۱۰/۰	۲۴/۵±۱۲/۳	۶۷/۳±۲۳/۳	۳۳/۸±۹/۱	۲۴/۶±۱۵/۷	۴۱/۲±۱۳/۷	۶۵/۰±۲۷/۴	
۱۰	۴۴/۱±۱۰/۹	۱۶/۸±۷/۰	۵۱/۹±۱۵/۰	۴۳/۵±۹/۹	۱۷/۱±۱۰/۳	۳۴/۵±۱۰/۶	۵۰/۳±۱۸/۸	۳۶/۹±۹/۹	۲۵/۶±۲۲/۶	۴۶/۰±۱۴/۲	۷۱/۵±۳۲/۵	۴۴/۱±۱۰/۹	۱۶/۸±۷/۰	۵۱/۹±۱۵/۰	۴۳/۵±۹/۹	۱۷/۱±۱۰/۳	۳۴/۵±۱۰/۶	۵۰/۳±۱۸/۸	
۱۱	۵۲/۸±۱۲/۹	۱۳/۰±۴/۹	۴۲/۸±۱۰/۹	۵۱/۶±۱۰/۸	۱۳/۵±۸/۷	۲۹/۶±۸/۵	۴۱/۶±۱۶/۱	۴۵/۵±۱۰/۸	۱۹/۳±۱۴/۱	۴۰/۱±۱۱/۷	۵۹/۴±۲۲/۱	۵۲/۸±۱۲/۹	۱۳/۰±۴/۹	۴۲/۸±۱۰/۹	۵۱/۶±۱۰/۸	۱۳/۵±۸/۷	۲۹/۶±۸/۵	۴۱/۶±۱۶/۱	
۱۲	۵۹/۰±۱۵/۸	۱۰/۰±۴/۳	۳۷/۴±۹/۱	۵۷/۴±۱۱/۸	۱۱/۵±۸/۲	۲۵/۹±۸/۰	۳۶/۸±۱۴/۹	۵۲/۲±۱۱/۸	۱۵/۸±۹/۲	۳۵/۷±۹/۱	۵۱/۴±۱۵/۵	۵۹/۰±۱۵/۸	۱۰/۰±۴/۳	۳۷/۴±۹/۱	۵۷/۴±۱۱/۸	۱۱/۵±۸/۲	۲۵/۹±۸/۰	۳۶/۸±۱۴/۹	
۱۳	۶۲/۸±۱۷/۹	۱۰/۰±۴/۳	۲۵/۶±۵/۷	۶۰/۷±۱۳/۶	۱۰/۳±۶/۴	۲۳/۹±۶/۹	۳۲/۸±۱۲/۴	۵۸/۰±۱۳/۶	۱۴/۰±۷/۱	۳۳/۸±۷/۰	۴۷/۰±۱۲/۱	۶۲/۸±۱۷/۹	۱۰/۰±۴/۳	۲۵/۶±۵/۷	۶۰/۷±۱۳/۶	۱۰/۳±۶/۴	۲۳/۹±۶/۹	۳۲/۸±۱۲/۴	
۱۴	۶۳/۶±۱۸/۳	۹/۷±۴/۴	۲۵/۱±۵/۷	۶۱/۵±۱۵/۲	۹/۹±۵/۸	۲۳/۶±۶/۹	۳۱/۶±۱۱/۸	۶۱/۷±۱۵/۲	۱۳/۲±۶/۸	۳۱/۹±۶/۵	۴۴/۹±۱۱/۷	۶۳/۶±۱۸/۳	۹/۷±۴/۴	۲۵/۱±۵/۷	۶۱/۵±۱۵/۲	۹/۹±۵/۸	۲۳/۶±۶/۹	۳۱/۶±۱۱/۸	
۱۵	۶۱/۸±۱۸/۵	۱۰/۰±۴/۳	۲۶/۱±۵/۸	۵۹/۴±۱۶/۰	۹/۹±۵/۳	۲۴/۸±۷/۰	۳۲/۷±۱۱/۴	۶۲/۳±۱۶/۰	۱۳/۰±۷/۰	۳۱/۸±۶/۵	۴۴/۸±۱۱/۸	۶۱/۸±۱۸/۵	۱۰/۰±۴/۳	۲۶/۱±۵/۸	۵۹/۴±۱۶/۰	۹/۹±۵/۳	۲۴/۸±۷/۰	۳۲/۷±۱۱/۴	
۱۶	۵۷/۵±۱۸/۲	۱۰/۰±۴/۸	۳۸/۰±۹/۶	۵۴/۷±۱۱/۱	۱۱/۲±۵/۶	۲۶/۶±۷/۰	۳۶/۴±۱۱/۶	۶۰/۰±۱۱/۱	۱۳/۶±۷/۶	۳۳/۰±۶/۹	۴۶/۴±۱۲/۷	۵۷/۵±۱۸/۲	۱۰/۰±۴/۸	۳۸/۰±۹/۶	۵۴/۷±۱۱/۱	۱۱/۲±۵/۶	۲۶/۶±۷/۰	۳۶/۴±۱۱/۶	
۱۷	۴۹/۳±۱۷/۴	۱۱/۹±۵/۹	۴۴/۵±۱۱/۱	۴۶/۴±۱۸/۶	۱۲/۸±۶/۴	۳۱/۵±۷/۸	۴۲/۷±۱۲/۶	۵۵/۵±۱۸/۶	۱۴/۶±۷/۲	۳۵/۷±۷/۵	۵۰/۱±۱۲/۹	۴۹/۳±۱۷/۴	۱۱/۹±۵/۹	۴۴/۵±۱۱/۱	۴۶/۴±۱۸/۶	۱۲/۸±۶/۴	۳۱/۵±۷/۸	۴۲/۷±۱۲/۶	
۱۸	۳۵/۸±۱۴/۳	۱۷/۹±۱۴/۷	۶۱/۰±۹/۷	۳۳/۰±۱۸/۹	۲۰/۷±۱۵/۰	۴۱/۱±۹/۲	۵۹/۹±۲۱/۷	۴۷/۰±۱۸/۹	۱۷/۶±۸/۳	۴۱/۰±۸/۰	۵۸/۳±۱۴/۳	۳۵/۸±۱۴/۳	۱۷/۹±۱۴/۷	۶۱/۰±۹/۷	۳۳/۰±۱۸/۹	۲۰/۷±۱۵/۰	۴۱/۱±۹/۲	۵۹/۹±۲۱/۷	
۱۹	۱۹/۰±۸/۸	۳۹/۰±۳۴/۴	۹۵/۲±۴۲/۵	۱۸/۶±۱۵/۹	۴۶/۵±۳۹/۹	۵۱/۸±۱۰/۵	۹۶/۵±۲۶/۲	۳۲/۶±۱۵/۹	۲۶/۳±۱۱/۶	۵۰/۶±۹/۱	۷۶/۶±۱۸/۲	۱۹/۰±۸/۸	۳۹/۰±۳۴/۴	۹۵/۲±۴۲/۵	۱۸/۶±۱۵/۹	۴۶/۵±۳۹/۹	۵۱/۸±۱۰/۵	۹۶/۵±۲۶/۲	
۲۰	۱۲/۲±۷/۱	۷۴/۲±۶۱/۷	۱۳۴/۱±۶۹/۹	۱۲/۰±۹/۰	۷۷/۴±۶/۷	۵۵/۲±۱۱/۷	۱۳۰/۸±۶۷/۵	۱۶/۳±۹/۰	۵۰/۸±۱۱/۴	۶۲/۵±۱۱/۶	۱۱۲/۲±۲۵/۱	۱۲/۲±۷/۱	۷۴/۲±۶۱/۷	۱۳۴/۱±۶۹/۹	۱۲/۰±۹/۰	۷۷/۴±۶/۷	۵۵/۲±۱۱/۷	۱۳۰/۸±۶۷/۵	
۲۱	۱۰/۳±۶/۲	۹۴/۰±۷۰/۸	۱۵۳/۴±۷۸/۴	۱۰/۰±۵/۸	۹۲/۳±۶/۲	۵۴/۸±۱۱/۴	۱۴۵/۴±۳۲/۹	۱۰/۲±۵/۸	۹۱/۳±۳۴/۴	۶۶/۰±۱۴/۶	۱۵۶/۵±۴۲/۶	۱۰/۳±۶/۲	۹۴/۰±۷۰/۸	۱۵۳/۴±۷۸/۴	۱۰/۰±۵/۸	۹۲/۳±۶/۲	۵۴/۸±۱۱/۴	۱۴۵/۴±۳۲/۹	
۲۲	۹/۴±۵/۷	۹۴/۷±۶۳/۹	۱۵۲/۸±۱۳/۳	۹/۸±۵/۴	۹۲/۰±۶/۶	۵۳/۴±۱۱/۰	۱۴۳/۷±۸/۴	۹/۱±۵/۴	۱۱۹/۵±۵۹/۰	۶۴/۹±۱۵/۸	۱۸۳/۶±۶۹/۰	۹/۴±۵/۷	۹۴/۷±۶۳/۹	۱۵۲/۸±۱۳/۳	۹/۸±۵/۴	۹۲/۰±۶/۶	۵۳/۴±۱۱/۰	۱۴۳/۷±۸/۴	
۲۳	۹/۴±۵/۹	۸۹/۱±۵/۰	۱۴۵/۴±۶۴/۷	۹/۵±۵/۳	۸۵/۳±۵/۷	۵۱/۶±۱۰/۶	۱۳۵/۴±۶۳/۵	۸/۹±۵/۳	۱۱۸/۸±۷/۱	۶۲/۹±۱۵/۵	۱۸۱/۱±۸/۷	۹/۴±۵/۹	۸۹/۱±۵/۰	۱۴۵/۴±۶۴/۷	۹/۵±۵/۳	۸۵/۳±۵/۷	۵۱/۶±۱۰/۶	۱۳۵/۴±۶۳/۵	
۲۴	۹/۸±۶/۱۳	۸۰/۸±۵/۲	۱۳۴/۲±۶۰/۱	۱۰/۰±۵/۹	۷۷/۲±۵/۱/۶	۴۸/۸±۱۰/۷	۱۲۴/۶±۵۸/۶	۹/۲±۵/۹	۱۰۶/۹±۶۹/۹	۵۹/۹±۱۵/۴	۱۶۶/۲±۷۹/۵	۹/۸±۶/۱۳	۸۰/۸±۵/۲	۱۳۴/۲±۶۰/۱	۱۰/۰±۵/۹	۷۷/۲±۵/۱/۶	۴۸/۸±۱۰/۷	۱۲۴/۶±۵۸/۶	

- [10] Tong, L., et al., Characteristics of surface ozone and nitrogen oxides at urban, suburban and rural sites in Ningbo, China. *Atmospheric Research*, 187 (2017) 57-68.
- [11] Fernández-Guisuraga, J.M., et al., Nitrogen oxides and ozone in Portugal: trends and ozone estimation in an urban and a rural site. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17) (2016) 17171-17182.
- [12] Lu, Z., et al., Emissions of nitrogen oxides from US urban areas: estimation from Ozone Monitoring Instrument retrievals for 2005–2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(18) (2015) 10367-10383.
- [13] An, H., et al., The long-term variations of ozone and nitrogen oxides in Suwon city during 1991~ 2012. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4) (2015) 378-384.
- [14] Jeffries, H.E. and R. Crouse, Scientific and technical issues related to the application of incremental reactivity. 1990: University of North Carolina, Department of Environmental Sciences, (1990).
- [15] Shen, H., et al., Novel method for ozone isopleth construction and diagnosis for the ozone control strategy of Chinese cities. *Environmental science & technology*, 55(23) (2021) 15625-15636.
- [16] Luo, H., et al., Emission source-based ozone isopleth and isosurface diagrams and their significance in ozone pollution control strategies. *Journal of environmental sciences*, 105 (2021) 138-149.
- [17] Zhang, K., et al., Precursors and potential sources of ground-level ozone in suburban Shanghai. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 14(6) (2020) 1-12.
- [18] Qian, Y., et al., Empirical development of ozone isopleths: Applications to Los Angeles. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(5) (2019) 294-299.
- [19] Yang, L., et al., Identification of long-term evolution of ozone sensitivity to precursors based on two-dimensional mutual verification. *Science of The Total Environment*, 760 (2021) 143401.
- [1] Taheri, A., P. Aliasghari, and V. Hosseini, Black carbon and PM2.5 monitoring campaign on the roadside and residential urban background sites in the city of Tehran. *Atmospheric Environment*, 218 (2019) 116928.
- [2] Ueno, H. and N. Tsunematsu, Sensitivity of ozone production to increasing temperature and reduction of precursors estimated from observation data. *Atmospheric Environment*, 214 (2019) 116818.
- [3] Wei, D., et al., Influences of nitrogen oxides and isoprene on ozone-temperature relationships in the Amazon rain forest. *Atmospheric Environment*, 206 (2019) 280-292.
- [4] Alföldy, B., et al., BTEX, nitrogen oxides, ammonia and ozone concentrations at traffic influenced and background urban sites in an arid environment. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2) (2019) 445-454.
- [5] Wang, W., et al., In Search of the Compensation Point–Leaf-Level Exchange of Nitrogen Oxides and Ozone for Selected Tree Species at a North America Temperate Forest, (2018).
- [6] Plocoste, T., et al., Assessment of nitrogen oxides and ground-level ozone behavior in a dense air quality station network: Case study in the Lesser Antilles Arc. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(12) (2018) 1278-1300.
- [7] Kumar, A., et al., Spatial and temporal variability of surface ozone and nitrogen oxides in urban and rural ambient air of Delhi-NCR, India. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(4) (2015) 391-399.
- [8] Jhun, I., et al., The impact of nitrogen oxides concentration decreases on ozone trends in the USA. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(3) (2015) 283-292.
- [9] Wolf, K., et al., Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany. *Science of the Total Environment*, 579 (2017) 1531-1540.

- 1, November, (2019) (in Persian).
- [28] Environnement, S.A., "O342 Module UV Photometric Ozone Analyzer" Technical Manual (2010). adapted from environnement-sa.com, access date 1, November, (2019).
- [29] Ecotech, "SERINUS 10 Ozone Analyzer." Technical Manual (2016). adapted from ecotech.com, access date 1, November, (2019).
- [30] Environnement, S.A., "AC32M Chemiluminescent Nitrogen Oxide Analyzer." Technical Manual (2010). adapted from environnement-sa.com, access date 1, November, (2019).
- [31] Ecotech, "SERINUS 40 Oxides of Nitrogen Analyzer." Technical Manual (2016). adapted from ecotech.com, access date 1, November, (2019).
- [32] Amini, H., et al., Spatiotemporal description of BTEX volatile organic compounds in a Middle Eastern megacity: Tehran study of exposure prediction for environmental health research (Tehran SEPEHR). *Environmental pollution*, 226 (2017) 219-229.
- [33] Leighton, P., *Photochemistry of air pollution*, Elsevier (2012).
- [34] Jenkin, M.E. and K.C. Clemitshaw, Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. *Atmospheric Environment*, 34(16) (2000) 2499-2527.
- [35] Wallington, T.J., J.H. Seinfeld, and J.R. Barker, 100 Years of progress in gas-phase atmospheric chemistry research. *Meteorological Monographs*, 59 (2019) 10.1-10.52.
- [20] Alvim, D.S., et al., Main ozone-forming VOCs in the city of Sao Paulo: observations, modelling and impacts. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(4) (2017) 421-435.
- [21] Shin, H., et al., The effects of precursor emission and background concentration changes on the surface ozone concentration over Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1) (2012) 93-103.
- [22] Seinfeld, J. and S. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*. New York, (2008).
- [23] Shareipour Z., Evaluation of the temperature effect on Ozone and NOx concentration. 6th National Air and Noise Quality Management, (2017) (In persian).
- [24] Motesadi S, M.A., Bagheri A, Sheykhmohammadi A, Production of tropospheric ozone and its precursors in Tehran city during 2001 to 2011. 16th National Conference on Environmental Health, (2017) (In persian).
- [25] Rafipour M, A.A., Alimohammadi A, Sadeghi A, Investigation of Effective Meteorological Parameters on Ozone Concentration Using Principal Component Analysis. 2nd National Air and Noise Quality Management, (2013) (In persian).
- [26] Tehran Annual Air and Noise Quality Report, 1396, Air Quality Control Company, Subsidiary of Tehran Municipality, adapted from air.tehran.ir, access date 1, November, (2019) (in Persian).
- [27] Tehran Annual Air and Noise Quality Report, 1397, Air Quality Control Company, Subsidiary of Tehran Municipality, adapted from air.tehran.ir, access date

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Taheri, B. Khorsandi, M. R. Alavi Moghaddam, *Analytical study of the effect of nitrogen oxides, volatile organic compounds, and ambient temperature on ozone in Tehran, Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(10) (2023) 3819-3834.

DOI: 10.22060/ceej.2022.19727.7245

