

## تغییرات زمانی و مکانی آلاینده های هوا با استفاده از GIS (مورد مطالعه: نیمه شمالی شهر تهران)

محسن رنجبر<sup>1</sup>، بتول باهک<sup>2</sup>

تاریخ وصول: 1397/02/10، تاریخ تایید: 1397/09/27

### چکیده

کلان شهر تهران به دلیل تمرکز جمعیت، استقرار صنایع در داخل و حومه شهر، تردد وسایط نقلیه، مصرف زیاد سوخت- های فسیلی، موقعیت جغرافیایی ویژه، اقلیم منحصر به فرد و ویژگی های خاص توپوگرافی یکی از آلوده ترین شهرهای جهان محسوب می شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی و تحلیل رفتار زمانی و مکانی آلاینده های (مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، ازن تروپوسفری، ذرات معلق، و دی اکسید گوگرد) در هوای نیمه شمالی شهر تهران است. به منظور بررسی تغییرات آلاینده های هوا در مقیاس های زمانی و مکانی داده های ایستگاه های هواشناسی و آلودگی سنجی شرکت کنترل کیفیت هوا و سازمان محیط زیست تهران طی سال های 1387-1391 مورد استفاده قرار گرفت. داده ها با استفاده از نرم افزارهای SPSS و Excel محاسبه و نتایج حاصل از تحلیل های آماری توزیع آلاینده ها در مقیاس های زمانی و مکانی با نرم افزار ArcGIS 9.3 و با تابع تحلیلی درونیابی فاصله معکوس (IDW) به صورت نقشه ها، جداول و نمودار ها تهیه و ترسیم شده است. بر اساس نتایج مطالعه غلظت سه آلاینده مونواکسید کربن، دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد در زمستان به حداکثر می رسد، اما غلظت ذرات معلق و ازن تروپوسفری در تابستان بیشتر است. تمام آلاینده ها با عناصر اقلیمی همبستگی معنادار نشان دادند. ضریب همبستگی مونواکسید کربن، دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد با باد منفی و با دما و فشار سطح زمین مثبت می باشد. همبستگی ازن و ذرات معلق با دما و سرعت باد مثبت و با فشار و رطوبت منفی است. توزیع فضایی مراکز با آلودگی شدید عمدتاً در اطراف ستاد بحران، شهرداری منطقه 7، دانشگاه شریف و پارک رز، اقدسیه و پونک شدت آلودگی کمتر است.

کلیدواژگان: آلاینده های هوا، تهران، GIS، عناصر اقلیمی، تغییرات زمانی.

1- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلام، واحد شهر ری، تهران، ایران.

2- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلام، واحد شهر ری، تهران، ایران.

## مقدمه

هوای اطراف زمین متشکل از ترکیب نسبتاً ثابتی از گازها است، تغییر در نوع یا غلظت آن‌ها سبب اختلال در کیفیت هوا شده و به نام آلودگی هوا شناخته می‌شود. آلاینده‌های هوا بر اساس ماهیت به دو دسته آلاینده‌های گازی شکل و ذرات معلق تقسیم می‌شوند، که انتشار آن‌ها از منابع طبیعی و انسانی صورت می‌گیرد. شرایط هواشناختی در مقیاس بزرگ می‌تواند غلظت آلاینده‌ها در محیط‌های شهری را تشدید نماید (برلیان، ۱۹۹۱). آلودگی هوا در مناطق شهری از جمله پیامدهای انقلاب صنعتی است، با توسعه صنعتی و افزایش تعداد شهرها روز به روز بر میزان و تراکم جمعیت افزوده و به یک معضل بزرگ تبدیل شده است (اصیلیان، ۱۳۸۶). در شهرها، به دلیل افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی و کم‌تر بودن نسبی سرعت باد آلودگی هوا نمود بیشتری دارد. بر اساس مطالعات لای و چنگ (۲۰۰۹)، ایجاد جزیره گرمایی و شرایط همدیدی خاص شدت آلودگی را در شهرهای بزرگ افزایش می‌دهد.

کلان‌شهر تهران به دلیل تمرکز شدید جمعیت، استقرار صنایع و کارخانه‌ها در داخل و حومه شهر، تردد بسیار وسایل نقلیه، و مصرف بالای سوخت‌های فسیلی یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان محسوب می‌شود (صفوی و علیجانی، ۱۳۸۵). هوای این شهر در یک سوم از روزهای سال توسط یک یا چند آلاینده اصلی آلوده است. موقعیت جغرافیایی شهر تهران واقع در منطقه حاکمیت پرفشار جنب حاره در نیمی از سال از یک سو و وضعیت توپوگرافی محاط بر آن از سوی دیگر گردش هوا در گستره شهر را محدود نموده است. رخداد شرایط پایداری هوا، نزول هوا سرد در گودی دشت که شهر در آن توسعه یافته است، کمبود نزولات آسمانی و توزیع نامناسب آن در طول سال، کمبود جریان‌های جوی در سطوح ارتفاعی مؤثر در کیفیت هوای تنفسی شهر و محبوس شدن آن به دلیل وجود حصار مرتفع کوهستانی البرز و رخداد مستمر وارونگی دمایی منجر به انباشتگی آلاینده‌ها در ارتفاع بلافصل سطح زمین می‌شوند (محمدی، ۱۳۸۵). علاوه بر این، استقرار کارخانه‌ها در غرب شهر تهران و در مسیر بادهای غربی سبب می‌شود تا آلاینده‌ها به داخل شهر حمل شوند. با توجه به تاثیر پذیری رفتار آلاینده‌ها از شرایط همدید حاکم بر منطقه، جریان‌های قائم و افقی هوا و توده‌های هوا با خصوصیات ترمودینامیکی مختلف می‌توانند وضعیت آلودگی را در طول سال تعدیل یا تشدید کنند. الگوی همدید جو در برخی ایام سال (دوره سرد) به گونه‌ای است که شرایط پایداری را در جو حاکم ساخته و شدت آلودگی را افزایش می‌دهد. در مواردی نیز الگوهای همدید حاکم، شرایط جو را ناپایدار می‌سازد و به دلیل شدت یافتن جریان‌های قائم و افقی، عناصر آلاینده در داخل جو پخش شده و غلظت آن کاهش می‌یابد (علیجانی به نقل از سعیدی، ۱۳۸۵؛ بیدختی و شرعی پور، ۱۳۸۸). بنابراین به نظر می‌رسد که آلاینده‌های شهری باید دارای روند زمانی و مکانی خاص باشند.

اثرات مخرب آلودگی هوا بر زندگی بشر طیف وسیعی از فعالیت‌ها را در بر می‌گیرد، بدین جهت محققان از جنبه‌های گوناگون مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند. فروتن سبزواری (۱۳۴۴)، جزء نخستین محققانی است که در پایان‌نامه خود «آلودگی هوای تهران از دود بویژه وسایل نقلیه موتوری» به تجزیه و تحلیل آلاینده‌های گوگردی در سطح شهر تهران پرداخت. محسنی (۱۳۶۵) به تشریح لایه مرزی، هوای پایدار و سیستم‌های جوی حاکم در روزهای اوج آلودگی پرداخت. بیگدلی (۱۳۸۰) تأثیر اقلیم و آلودگی هوای تهران بر بیماری سکنه قلبی در دوره ۵ ساله (۱۹۹۴ - ۱۹۹۰) را بررسی نمود. ارتباط عناصر اقلیمی و آلاینده‌های هوای تهران با مرگ و میر ناشی از بیماری‌های قلبی طی سال‌های

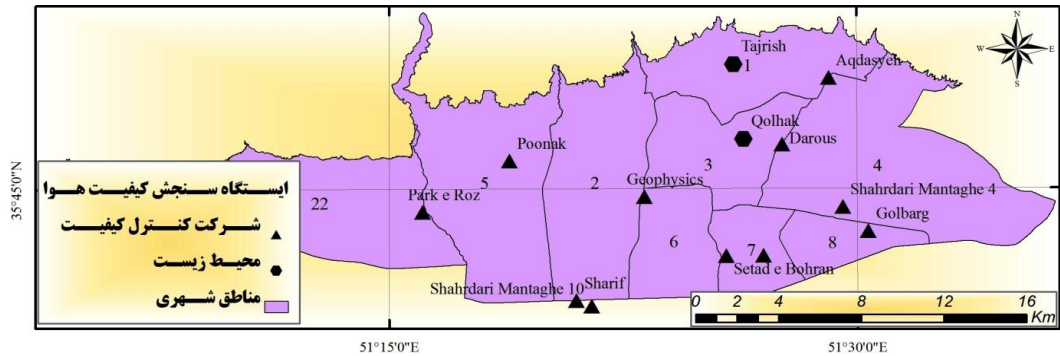
۲۰۰۳-۱۹۹۹ توسط محمدی (۱۳۸۵)، نشان داد بین عناصر اقلیمی بویژه دما و فشار با تعداد فوت شدگان رابطه معنا داری وجود دارد. صفوی و علیجانی (۱۳۸۵) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که معمولاً غلظت بالای آلاینده‌ها با فشار بالای جو همراه است. یدقار (۱۳۸۵) به مدل سازی و تحلیل پراکنش آلاینده های منتشر از منابع متحرک آلودگی هوا بر پایه GIS پرداخت. ارتباط بین آلودگی هوا و آغاز حملات سندرم حاد قلبی نشان داد که گاز مونوکسید کربن بیشترین تاثیر را بر سگته قلبی دارد (قربانی و همکاران، ۱۳۸۶). اجتهادی (۱۳۸۶) بیان داشت که ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون یکی از ۵ آلاینده اصلی هوای شهرهای بزرگ بویژه تهران می باشد که از وسایط نقلیه موتوری به میزان ۲۱۰۰۰ تن در سال در هوا منتشر می گردند. ندافی و همکاران (۱۳۸۸)، غلظت ذرات معلق ( $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$  و  $PM_{0.1}$ ) برای دو ایستگاه در ماه‌های بهمن ۱۳۸۵ تا خرداد ۱۳۸۶ اندازه گیری کردند. مطالعه ارتباط آلودگی هوا با مرگ و میر جمعیت شهر تهران در دوره آماری ۲۰۰۵ - ۲۰۰۲ نشان داد بیشترین ارتباط بین آلودگی هوا و مرگ و میر ناشی از بیماری های قلبی - عروقی، تنفسی و سگته به ترتیب مربوط به ماه اکتبر، ژانویه و نوامبر می باشد (قلی زاده و همکاران، ۱۳۸۸). بیدختی و شرعی پور (۱۳۸۸)، وضعیت آلودگی هوای تهران را در رابطه با شرایط هوا شناختی جو بالا بررسی کرده نتایج تحقیق نشان داد آلودگی های شدید هوا با افزایش فشار سطحی، شرایط سکون در جو، کاهش سرعت باد و افزایش نسبی دمای جو، همراه است. شرعی پور (۱۳۸۸)، تغییرات فصلی و روزانه آلاینده های هوا و ارتباط آنها با عناصر هواشناسی مطالعه نموده در تحقیقات وی دما و رطوبت دو عنصر موثر بر تغییر غلظت آلاینده ها می باشند. همچنین زوار و همکاران (۲۰۱۰)، ارتباط بین تراکم ذرات معلق و الگوهای جوی با مدل متوسط مقیاس TAPM، پنجه کوبی (۱۳۹۰)، آلودگی هوا با آرونگی دما، حسین پور (۱۳۹۰)، تحلیل همبندی آلودگی هوا با تاکید بر ذرات معلق شهر تهران را بررسی نمودند.

در زمینه تغییرات زمانی و مکانی آلاینده های هوای شهر تهران تا کنون تحقیق جامعی انجام نشده، در پژوهش حاضر تغییرات زمانی و مکانی آلاینده های هوا در نیمه شمالی شهر تهران پرداخته می شود.

### مواد و روش ها

به دلیل حاکمیت الگو های متفاوت در مقیاس های سالانه، فصلی، ماهانه، روزانه و ساعتی بر اقلیم و همبستگی معنادار عناصر آب و هوایی و آلودگی رفتار زمانی و مکانی آلاینده ها نیز دارای الگوهای سالانه، فصلی، ماهانه، روزانه و ساعتی می باشد. در همین راستا، هدف پژوهش حاضر بررسی زمانی و مکانی رفتار آلاینده های مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، ازن تروپوسفری، ذرات معلق، و دی اکسید گوگرد است. با توجه به این که رفتار آلاینده ها در واحدهای زمانی کوچک (نظیر روز) بسیار نامنظم و متغیر است، در این پژوهش واحد زمانی فصل برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان و با ثبات بیش تر و نیل به الگوی رفتاری مشخص انتخاب شده است. روش مورد استفاده پژوهش مبتنی بر داده های آماری برای یک دوره چهار ساله ۱۳۹۱-۱۳۸۷ می باشد. در بخش آماری از داده های ایستگاه های هواشناسی همبندی و داده های ایستگاه های آلودگی سنجی شرکت کنترل کیفیت هوا و سازمان محیط زیست تهران در شاخص استاندارد آلاینده هوا استفاده گردید (شکل ۱). داده های گردآوری شده با نرم افزارهای SPSS و Excel پردازش و تغییرات آلاینده ها در مقیاس های زمانی مختلف به مقیاس فصلی تبدیل به صورت جداول و نمودار هایی تهیه ترسیم و ارائه

شده است. نتایج حاصل از تحلیل های آماری وارد محیط نرم افزار ArcGIS 9.3 شده و نقشه های فصلی پهنه بندی آلاینده های مختلف با استفاده از تابع تحلیلی درون یابی فاصله معکوس ترسیم و تحلیل ها بر اساس آن صورت گرفت.



شکل ۱: پراکنش ایستگاه های سنجش کیفیت هوا، منبع: شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، اداره محیط زیست استان تهران

### یافته های پژوهش

به منظور سهولت و تحلیل دقیق تغییرات زمانی و مکانی آلاینده ها مقدار و غلظت آلاینده ها در مقیاس های زمانی و مکانی مختلف محاسبه گردیده و ویژگی های هر یک به طور مستقل در یافته های پژوهش بررسی شده است.

### مونوکسید کربن

میانگین غلظت مونوکسید کربن (شکل ۲)، در فصل زمستان بسیار زیاد و تابستان و برخی از سال ها در بهار به حداقل می رسد. نرخ افزایش و کاهش این آلاینده روند خاصی را دنبال نمی کند. مقایسه میزان مونوکسید کربن طی دوره مورد بررسی نشان می دهد کمترین میزان این آلاینده در تابستان و بیشترین میزان آن در زمستان به ثبت رسیده است. بررسی پراکنش مکانی تغییرات مقادیر مونوکسید کربن (شکل ۸) نشان می دهد که در فصل بهار بیشینه غلظت آلاینده در اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ به ثبت رسیده است، در حالیکه کمترین غلظت آن در حوالی پارک رز اندازه گیری شده است. اختلاف غلظت دو ایستگاه ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ با سایر نقاط همجوار بسیار چشمگیر است؛ بطوری که این منطقه به صورت یک هسته با غلظت آلاینده زیاد به چشم می خورد. سایر مناطق از غلظت متوسطی برخوردار هستند. الگوی تابستانه پراکنش مونوکسید کربن بسیار شبیه فصل بهار است، هرچند گستره مکانی هسته آلوده اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ بیشتر شده است. همچنین پارک رز دیگر به صورت یک هسته با میزان آلاینده کم دیده نمی شود. اما میزان آلودگی ایستگاه گلبرگ کمتر از سایر ایستگاه ها است. دامنه نوسانات مقدار غلظت این گاز نیز در مقایسه با بهار کاهش یافته است. در فصل پاییز، باز هم از دامنه نوسانات غلظت آلاینده کاسته شده است، اما الگوی پراکنش مکانی آن تقریباً بدون تغییر مانده ولی بر گستره هسته پرتراکم اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ افزوده شده است. در این فصل ایستگاه پونک کمترین غلظت مونوکسید کربن را تجربه کرده است. الگوی زمستانه پراکنش مونوکسید کربن نشان دهنده کاهش دامنه نوسانات غلظت است. گستره فضایی هسته مستقر در اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ کمی کاهش یافته است و غلظت

آلاینده در اطراف ایستگاه پونک کاهش بیش‌تری را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد روند تغییرات این آلاینده طی فصول مختلف تغییر چندانی ندارد و فقط هسته کمینه آن دچار جابجایی می‌گردد (شکل ۸).

### دی‌اکسید نیتروژن

میانگین فصلی داده‌های مقادیر دی‌اکسید نیتروژن روند تغییرات آن را بهتر به نمایش می‌گذارد. بیشینه غلظت این آلاینده در همه سال‌ها در فصل سرد رخ داده است. در پاییز سال دوم غلظت این آلاینده به حداکثر مقدار غلظت خود در کل دوره رسیده است. در این فصل بطور متوسط ۱۰۰ واحد در میلیارد از این آلاینده اندازه‌گیری شده است. در اواخر دوره مورد بررسی غلظت آلاینده در پاییز و زمستان تقریباً مشابه بوده و غلظت آن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است (شکل ۳).

الگوی پراکنش فضایی غلظت دی‌اکسید نیتروژن در دوره سرد سال نمایشگر یک هسته پرتراکم در اطراف ایستگاه‌های شهرداری منطقه ۱۰ و شریف است که زبانه‌ای از آن در محدوده بین دو ایستگاه ژئوفیزیک و پونک امتداد یافته است و کمینه غلظت در ایستگاه پارک رز اندازه‌گیری شده است. الگوی فضایی تابستانه آلاینده دی‌اکسید نیتروژن با الگوی بهار تفاوت‌هایی دارد. در این فصل، علاوه بر کاسته شدن از غلظت آلاینده، هسته پرتراکم نیز امتدادی شمالی - جنوبی پیدا کرده است. مرکز این هسته در شرق ایستگاه شریف است که امتداد آن تا ایستگاه ژئوفیزیک پیش رفته است. سه هسته با غلظت آلاینده کم نیز در غرب شهر (ایستگاه پارک رز) در شمال شهر (ایستگاه اقدسیه)، و در شرق شهر (ایستگاه گلبرگ) قابل مشاهده است. الگوی پاییزه این آلاینده رفتاری بسیار شبیه الگوی بهار آن دارد. تفاوت قابل توجه آن در افزایش دامنه نوسانات غلظت آلاینده دی‌اکسید نیتروژن و شدت یافتن هسته پرتراکم اطراف ایستگاه‌های شهرداری منطقه ۱۰ و شریف است. همچنین، هسته‌های کم‌تراکم موجود در فصل تابستان در این فصل موجود هستند و از غلظت آلاینده در اطراف آنها کاسته شده است. الگوی زمستانه پراکنش آلاینده دی‌اکسید نیتروژن نشان می‌دهد که بر غلظت آلاینده دی‌اکسید نیتروژن در منطقه پرتراکم آلاینده افزوده شده است. اما در مناطق مجاور آن، ایستگاه‌های پارک رز و ژئوفیزیک، دو هسته کم‌تراکم به چشم می‌خورد که سبب افزایش گرادیان آلاینده در این منطقه شده است. همچنین در این فصل، غلظت این آلاینده در مناطق شرقی کمتر است، از این رو، دو هسته کم‌تراکم آلاینده در شرق تهران (ایستگاه‌های گلبرگ و اقدسیه) به صورت نواری شمال - جنوبی به یکدیگر متصل شده اند (شکل ۹).

### ازن تروپوسفری

بررسی غلظت فصلی ازن به خوبی نمایانگر ارتباط این آلاینده با دما دارد. صرف‌نظر از روند کلی تغییرات غلظت این آلاینده، کاملاً مشهود است که غلظت ازن تروپوسفری در فصل تابستان بیش از سایر فصول است. در سال اول بیشینه غلظت متعلق به تابستان است. هر چند در برخی از سال‌ها میزان غلظت آن در تابستان و بهار تقریباً یکسانند و حتی در یک سال فصل بهار بیشترین غلظت آلاینده را نمایش می‌دهد (شکل ۴).

نقشه پراکنش مکانی آلاینده ازن در فصل بهار رفتاری شبیه به آلاینده مونوکسید کربن را به نمایش می‌گذارد. نکته جالب در الگوی پراکنش بهار این آلاینده انطباق هسته کمینه با غلظت پایین آلاینده ازن در شرق ایستگاه شریف (محل قرار

گیری هسته پرتراکم آلاینده دی اکسید نیتروژن) است. به نظر می رسد آلاینده های فوق رفتاری معکوس با یکدیگر داشته باشند. همچنین، یک منطقه با غلظت بالا در اطراف ایستگاه شهرداری منطقه ۷ مشاهده می شود که گستره فضایی آن چندان زیاد نیست. سایر نقاط تراکم متوسطی از آلاینده را شاهد هستند، اما بطور عمومی شرق تهران غلظت بالاتری از ازن را دارا است. با گذر به فصل تابستان، منطقه بیشینه غلظت ازن در پارک رز مشاهده می شود و سه منطقه کمینه با غلظتی متوسط در اطراف ایستگاه های شریف، گلبرگ، و اقدسیه به چشم می خورد. در مناطق مرکزی غلظت آلاینده در اطراف ایستگاه های شهرداری منطقه ۷، ستاد بحران، و ژئوفیزیک بیش از سایر مناطق است. همچنین دامنه نوسانات غلظت آلاینده نیز افزایش یافته است. در فصل پاییز، ضمن کاهش غلظت ازن در کل محدوده شهری، هسته بیشینه غلظت به اطراف ایستگاه ژئوفیزیک انتقال می یابد. این هسته گرادیان شدیدی با سایر مناطق ایجاد کرده است. کمینه ازن در این فصل در شرق تهران، اطراف ایستگاه گلبرگ، و ایستگاه شریف به ثبت رسیده است. در فصل زمستان، از متوسط غلظت ازن به شدت کاسته می شود. همچنین، هسته پرتراکم اطراف ایستگاه ژئوفیزیک ضعیف شده و ر عوض غلظت ازن در قسمت های غربی افزایش می یابد، به طوری که یک هسته با تراکم ازن قابل توجه در اطراف پارک رز شکل می گیرد. در اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ یک هسته بسیار کم تراکم شکل می گیرد و در اطراف ایستگاه شریف نیز همین حالت به وقوع می پیوندد. اما به نظر می رسد به دلیل وجود هسته پرتراکم ژئوفیزیک، این دو هسته از تشکیل یک هسته واحد باز می ماند (شکل ۱۰).

#### دی اکسید گوگرد

بررسی تغییرات فصلی دی اکسید گوگرد نیز رفتار منظمی را نشان نمی دهد. مقادیر بیشینه در ابتدای دوره مطالعه در زمستان و پاییز، و در سال های آخر دوره مطالعه بیشترین میزان غلظت در فصل تابستان مشاهده می شود. با توجه به شرایط موجود به نظر نمی رسد که بتوان الگوی رفتاری منظمی برای این آلاینده در نظر گرفت (شکل ۵). الگوی پراکنش فضایی دی اکسید گوگرد در فصل بهار کاملاً متفاوت با سایر آلاینده ها است. در این فصل، بیشینه غلظت این آلاینده در اطراف ایستگاه اقدسیه به ثبت رسیده و تا نزدیکی های تجریش نیز گسترش یافته است. دومین هسته با غلظت زیاد در اطراف ایستگاه پونک مشاهده می شود. اطراف ایستگاه ژئوفیزیک نیز غلظت این آلاینده نسبتاً کم تر است. این در حالی است که کمینه غلظت آلاینده دی اکسید گوگرد در اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ به چشم می خورد. کمینه دومی نیز در اطراف ایستگاه شریف مشاهده شده است. در فصل تابستان، الگوی پراکنش آلاینده دی اکسید گوگرد بسیار شبیه به فصل بهار است. با این تفاوت که اندکی از گستره هسته پرتراکم اطراف اقدسیه کاسته شده و همچنین بر غلظت آلاینده در اطراف ایستگاه ژئوفیزیک نیز افزوده شده است. در عوض، گستره فضایی هسته کم تراکم اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ افزایش یافته است. الگوی پاییزه پراکنش آلاینده دی اکسید گوگرد با الگوی دو فصل قبل متفاوت است. در این فصل، بیشینه غلظت در اطراف ایستگاه ژئوفیزیک به ثبت رسیده است که گستره فضایی زیادی را در بر می گیرد. کمترین میزان آلاینده نیز در اطراف ایستگاه های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ به چشم می آید که در مقایسه با دو فصل قبل گستره فضایی کمتری دارد. الگوی زمستانه این آلاینده

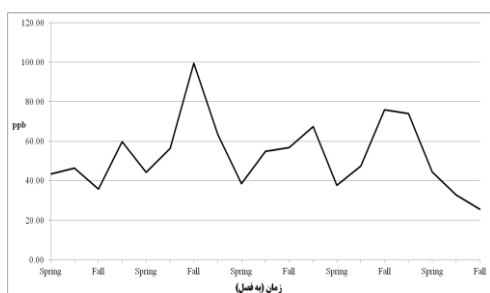
نیز بسیار شبیه به الگوی پاییزه است، مقادیر و دامنه تغییرات غلظت آلاینده چندان تفاوتی نکرده است، البته باید اشاره شود که از غلظت آلاینده در اطراف ایستگاه‌های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ کاسته شده است (شکل ۱۱).

### ذرات معلق

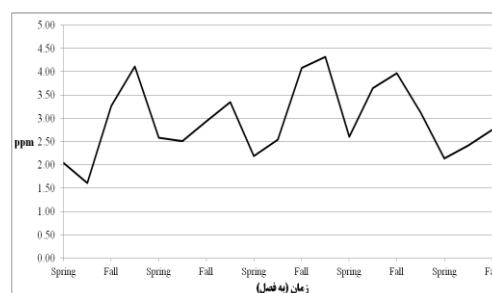
در سال‌های ۸۸-۸۷ روند تقریباً منظمی بر الگوی رفتاری ذرات معلق حکمفرما است و بیشینه غلظت ذرات معلق در این سال‌ها رخ داده، اما در اواخر دوره نوسانات فصلی آن افزایش می‌یابد؛ و در تابستان ۸۹ بیشینه غلظت ذرات معلق به وقوع پیوسته است و در زمستان همان سال کمینه ذرات معلق در کل دوره دیده می‌شود (شکل ۶).

الگوی پراکنش مکانی ذرات معلق بسیار متفاوت با سایر آلاینده‌ها است. در فصل بهار، بیشینه غلظت این آلاینده در اطراف ایستگاه‌های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ مشاهده می‌شود. اما یک هسته با غلظت بسیار پایین و گستره مکانی قابل توجه در اطراف ایستگاه اقدسیه به چشم می‌خورد که امتداد آن تا ایستگاه تجریش و قلهک رسیده است. در سایر ایستگاه‌های منطقه غلظت ذرات معلق در حد متوسط می‌باشد، اما ایستگاه ژئوفیزیک نسبتاً غلظت بالاتری دارد و پارک رز نیز غلظت پایینی را شاهد است. در فصل تابستان، الگوی پراکنش ذرات معلق نسبتاً شبیه الگوی بهار است، اما یک هسته پرغلظت دیگر در حفاصل ایستگاه‌های شریف و شهرداری منطقه ۱۰ تشکیل شده است. هرچند از گستره مکانی هسته کم‌غلظت اطراف ایستگاه اقدسیه کاسته شده است، اما دو هسته نسبتاً کم‌غلظت در اطراف ایستگاه‌های ژئوفیزیک و پونک به چشم می‌خورد. در فصل پاییز الگو بسیار شبیه به الگوی بهار می‌گردد. یک هسته کم‌غلظت در اطراف ایستگاه اقدسیه، دو هسته با غلظت نسبتاً کم در اطراف ایستگاه‌های پونک و ژئوفیزیک، و یک ایستگاه با غلظت بسیار زیاد در اطراف ایستگاه‌های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷، و هسته‌ای دیگر با غلظت نسبتاً زیاد در اطراف ایستگاه پارک رز مشهود هستند. در فصل زمستان، الگوی پراکنش ذرات معلق بسیار تغییر می‌کند. هرچند هسته بیشینه در اطراف ایستگاه‌های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ شکل گرفته است، اما هسته دومی با غلظت آلاینده نسبتاً زیاد در اطراف ایستگاه شریف دیده می‌شود. همچنین کمینه غلظت ذرات معلق در اطراف ایستگاه ژئوفیزیک اندازه‌گیری شده است و ایستگاه اقدسیه از این حیث در رتبه دوم قرار دارد (شکل ۱۲).

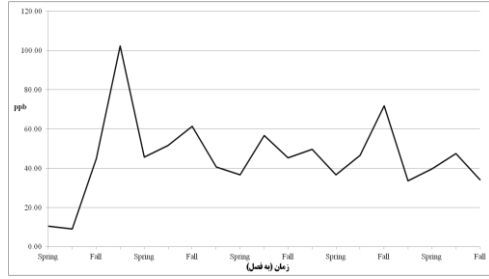
شکل های ۷ تا ۲ تغییرات مقدار غلظت آلاینده های مختلف در هوای شهر تهران ۱۳۹۱-۱۳۸۷



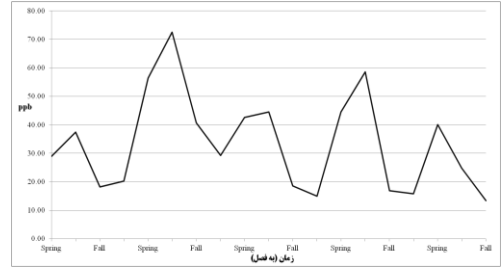
شکل ۳: میانگین تغییرات غلظت دی‌اکسید نیتروژن



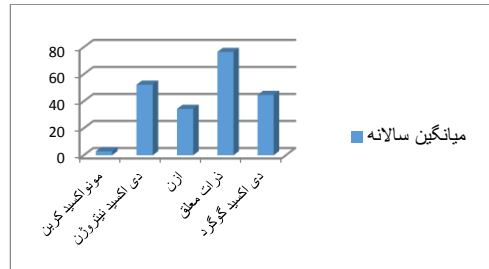
شکل ۲: میانگین تغییرات غلظت مونواکسید کربن



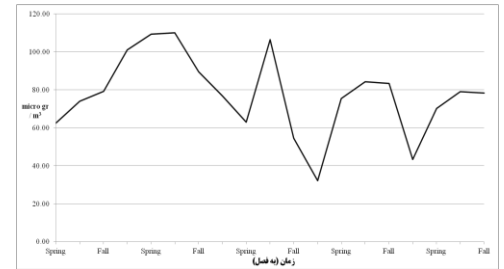
شکل ۶: میانگین تغییرات غلظت دی اکسید گوگرد



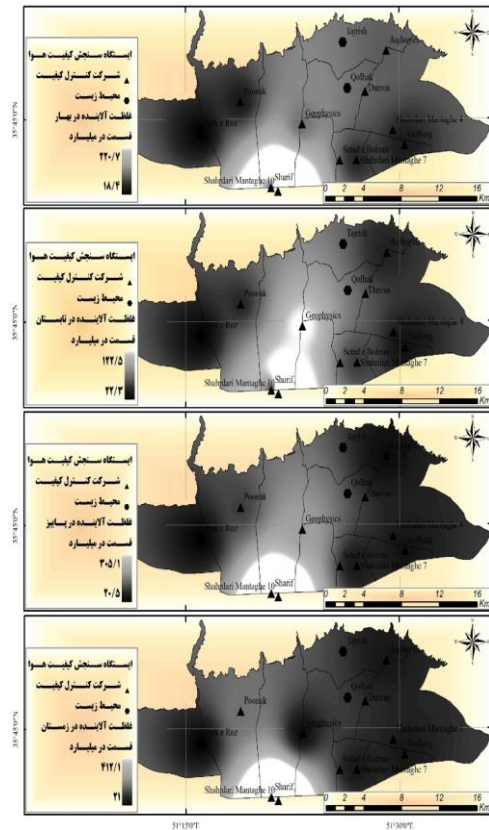
شکل ۴: میانگین تغییرات غلظت ازن



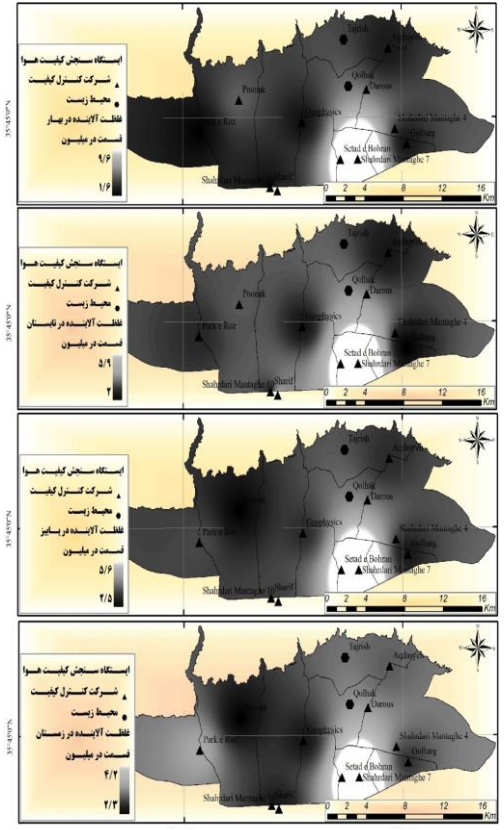
شکل ۷: میانگین تغییرات سالانه آلاینده ها هوای تهران



شکل ۶: میانگین تغییرات غلظت ذرات معلق

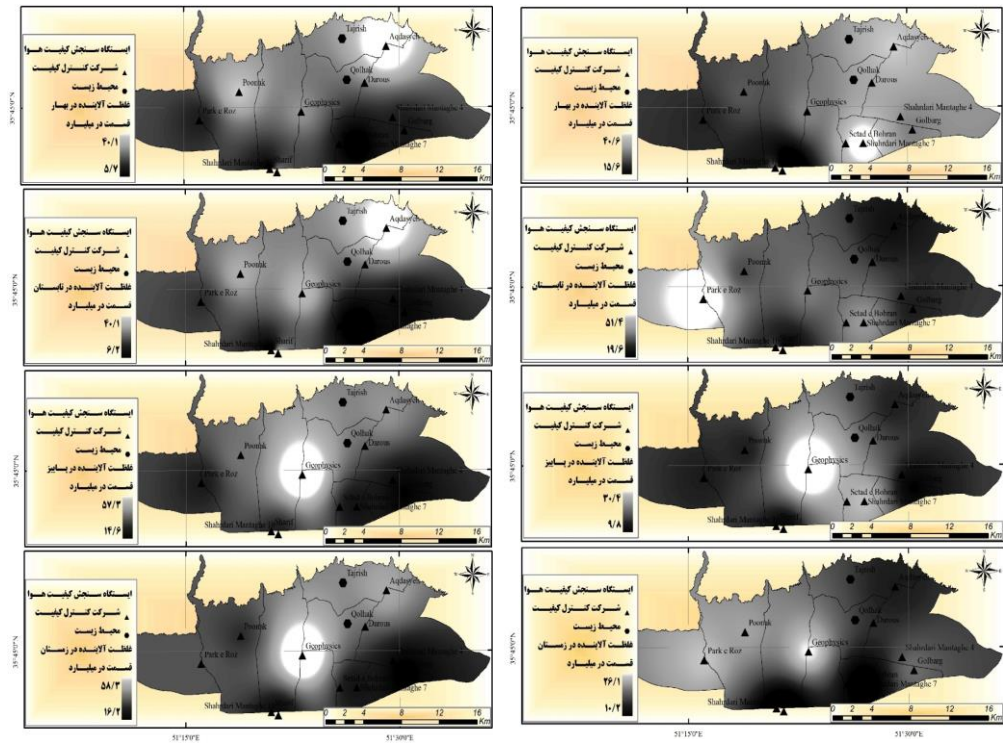


شکل ۹: الگوی فصلی پراکنش آلاینده دی اکسید نیتروژن هوای تهران



شکل ۸: الگوی فصلی پراکنش آلاینده مونوکسید کربن هوای تهران

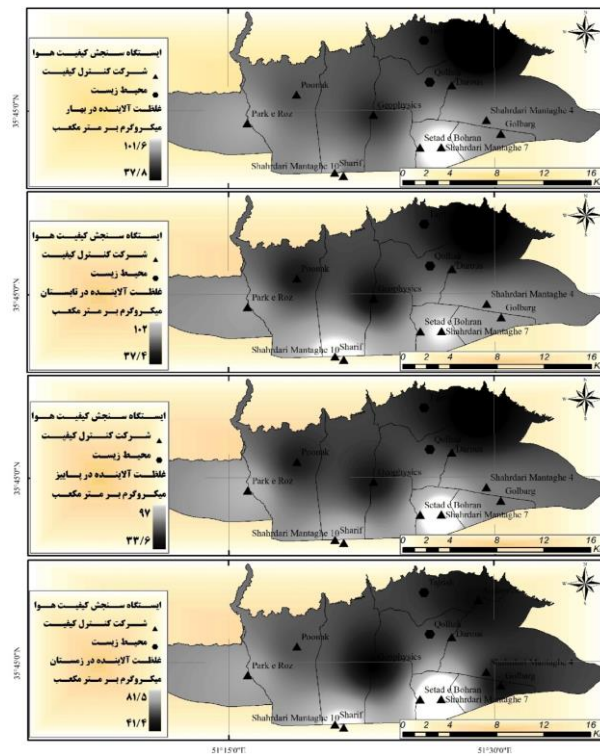




شکل ۱۰: میانگین فصلی غلظت آلاینده ازن هوای تهران

شکل ۱۱: میانگین فصلی غلظت آلاینده دی‌اکسید گوگرد هوای تهران

تهران



شکل ۱۲: توزیع غلظت ذرات معلق هوای تهران

تغییرات میزان غلظت مونوکسید کربن طی دوره مطالعه و میانگین غلظت سالانه آن جدول ۱ نشان داده شده است. طبق محاسبات بطور متوسط کمترین غلظت مونوکسید کربن در فصل بهار اندازه گیری شده است که برابر ۲/۳۱ قسمت در میلیون است. مقدار غلظت آن از بهار با شیب ملایمی افزایش می یابد و در تابستان بطور متوسط برابر ۲/۵۱ قسمت در میلیون است. شیب تغییرات غلظت این آلاینده از تابستان به پاییز افزایش می یابد، متوسط غلظت آن در پاییز برابر ۳/۱۲ قسمت در میلیون می باشد. این روند افزایشی هم چنان حفظ می شود تا اینکه در زمستان به ۳/۷۳ واحد در میلیون می رسد. شیب افزایش غلظت از پاییز به زمستان نیز تقریباً برابر شیب تغییرات تابستان به پاییز است. بیشترین شیب تغییرات نیز از زمستان به بهار است که تقریباً به اندازه ۱/۵ قسمت در میلیون است. میانگین فصلی غلظت دی-اکسید نیتروژن در بهار ۴۱،۷۴، تابستان ۴۶،۶۴ می باشد، اما شیب افزایش غلظت چندان زیاد نیست. افزایش غلظت از تابستان به پاییز شیب تندتری به خود می گیرد. با گذر به زمستان میزان آن به ۶۶،۲ واحد می رسد (جدول ۱). غلظت ازن در شش ماه اول سال تقریباً دو برابر شش ماه دوم است. گذر از پاییز به زمستان با شیب بسیار ملایمی رخ می دهد اما گذر از تابستان به پاییز با شیب بسیار تندی رخ می دهد. همچنین گذر از پاییز به زمستان در مقایسه با تابستان به پاییز شیب کمتری دارد اما شیب تغییرات آن قابل ملاحظه است. کمترین میزان ازن در فصل زمستان و بیشینه آن در فصل تابستان ثبت شده است. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که رفتار ازن در شهر تهران کاملاً تابع تغییرات فصل است. نتایج حاصل از میانگین فصول در کل دوره نشان می دهد که غلظت این آلاینده در فصل زمستان بیش از سایر فصول است. همچنین کمترین غلظت آلاینده در فصل بهار محاسبه شده است. شیب تغییرات غلظت آلاینده در گذر فصل ها به یکدیگر تقریباً ثابت و برابر است (جدول ۱). میانگین کل فصل ها در دوره مورد بررسی نشان می دهد که غلظت آلاینده ذرات معلق در تابستان بیشینه و در زمستان کمینه بوده است. در دوره مورد بررسی از فصل بهار به تابستان غلظت ذرات معلق افزایش می یابد و در تابستان به بیشترین حد خود می رسد. پس از آن، غلظت ذرات معلق کاهش می یابد تا اینکه در زمستان به کمینه خود می رسد. شیب کاهش غلظت ذرات معلق در گذر از پاییز به زمستان بیشینه و از تابستان به پاییز کمینه است (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین غلظت آلاینده در فصول مختلف

غلظت آلاینده	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
مونوکسید کربن (ppm)	۲/۳۱	۲/۵۱	۳/۱۲	۳/۷۳
دی اکسید نیتروژن (ppb)	۴۱/۷۴	۴۶/۶۴	۵۴/۵۶	۶۶/۲۰
ازن (ppb)	۴۲/۴۹	۴۶/۷۱	۲۸/۱۲	۲۰/۰۴
ذرات معلق ( $gr^6/m^3$ )	۷۶/۰۵	۸۸/۲۸	۷۸/۴۲	۶۳/۲۹
دی اکسید گوگرد (ppb)	۳۳/۸۱	۴۰/۸۶	۴۷/۴۵	۵۶/۵۴

ضرایب همبستگی بین غلظت آلاینده های مورد بررسی (مونواکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، ذرات معلق ازن، تروپوسفری و دی اکسید گوگرد با عناصر اقلیمی از جمله سرعت باد، دما رطوبت نسبی و فشار هوای استاندارد شده (جدول ۲) نشان داده شده است. طبق محاسبات مونوکسید کربن با تمامی عناصر اقلیمی مورد بررسی دارای همبستگی معنادار است. بیشترین ارتباط بین مونوکسید کربن با سرعت باد مشاهده می شود و کمترین ارتباط بین آلاینده مونوکسید کربن با عامل رطوبت نسبی محاسبه شده است. همچنین ضریب همبستگی بین دمای هوا با غلظت آلاینده

تقریباً برابر ضریب همبستگی بین رطوبت نسبی و غلظت آلاینده است. البته، بررسی ضریب تبیین نشان می‌دهد که در تغییرات غلظت آلاینده مونوکسید کربن و سرعت باد در کمتر از نیمی از موارد اثرگذار بوده است. ضریب همبستگی بین آلاینده دی‌اکسید نیتروژن با عناصر اقلیمی بسیار جالب توجه است. نکته جالب در مورد این آلاینده ارتباط بیش‌تر آن با فشار سطحی در مقایسه با سایر عناصر اقلیمی است. همبستگی دی‌اکسید نیتروژن با سرعت باد و رطوبت نسبی تقریباً برابر است. دی‌اکسید نیتروژن با دمای هوا و سرعت باد ارتباط منفی دارد. به عبارت دیگر روند تغییرات این آلاینده با دما و سرعت باد معکوس است. به نظر می‌رسد با افزایش دما آلاینده دی‌اکسید نیتروژن تجزیه شده و وارد واکنش‌های جانبی شود. دی‌اکسید گوگرد نیز با سرعت باد و دما دارای همبستگی منفی و با رطوبت نسبی و فشار هوا دارای همبستگی مثبت است. بیش‌ترین ارتباط بین این آلاینده با سرعت باد محاسبه شده است. بررسی میزان ارتباط ازن با عناصر اقلیمی از همبستگی قوی این آلاینده با این متغیرها حکایت دارد. بیش‌ترین ارتباط بین ازن با فشار هوا مشاهده می‌شود. این ارتباط علیرغم معکوس بودن آن بسیار قوی است. پس از آن آلاینده ازن با دما ارتباط مثبت و قوی دارد که کاملاً بیانگر ارتباط تشکیل ازن با دمای هوا است. کمترین ارتباط ازن نیز با عنصر رطوبت نسبی محاسبه شده است که دارای علامتی منفی است. همبستگی میان ذرات معلق و عناصر اقلیمی کاملاً با سایر آلاینده‌ها متفاوت است. این عامل با فشار هوا و رطوبت نسبی رابطه منفی دارد و بیشینه ارتباط آن با دما محاسبه شده است. نکته بسیار جالب همبستگی مثبت سرعت باد با ذرات معلق است. به نظر می‌رسد سرعت باد سبب انتقال و تجمع ذرات آلاینده در منطقه شمالی تهران شده است (جدول ۲).

جدول ۲. ضرایب همبستگی و تعیین میان آلاینده مونوکسید کربن و متغیرهای اقلیمی

آلاینده	سرعت باد	دما	رطوبت نسبی	فشار هوا
مونوکسید کربن	-۰/۶۹	۰/۴۸۸	۰/۴۷	۰/۵۷۷
دی‌اکسید نیتروژن	-۰/۳۲	-۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۳۵
ازن	۰/۴۹	۰/۶۱	-۰/۵۵	-۰/۶۹
ذرات معلق	۰/۲۹	۰/۳۶	-۰/۳۴	-۰/۳۲
دی‌اکسید گوگرد	-۰/۴۱	-۰/۳	۰/۳۴	۰/۳۹

## نتایج و بحث

پژوهش حاضر به بررسی رفتار آلاینده‌های اصلی هوا نیمه شمالی شهر تهران طی دوره آماری ۱۳۸۷-۱۳۹۱ پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تغییرات زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا در شهر تهران دارای روند‌ها و ویژگی‌های متفاوتی است. آلاینده مونوکسید کربن به صورت توالی‌هایی از غلظت زیاد (پاییز و زمستان) و غلظت کم (بهار و تابستان) می‌باشد. در تمامی فصول بیشینه غلظت این آلاینده در اطراف ایستگاه‌های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ به ثبت رسیده، اما کمینه غلظت آن در فصول مختلف در مناطق متفاوتی قرار گرفته است. غلظت آلاینده دی‌اکسید نیتروژن نیز در ماه‌های سرد سال به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد. بیشینه غلظت این آلاینده در اطراف ایستگاه‌های شهرداری منطقه ۱۰ و شریف و کمینه غلظت آلاینده نیز در ایستگاه پارک رز اندازه‌گیری شده است. این الگو در سه فصل بهار، پاییز، و زمستان حکمفرماست، اما در تابستان اندکی تغییر می‌کند. غلظت آلاینده ازن تروپوسفری از روند منظم‌تری در مقایسه با دو آلاینده قبلی برخوردار است. رفتار این آلاینده ارتباط قوی با دمای هوا دارد زیرا بیشینه غلظت آن در فصل

تابستان و کمینه غلظت آن در فصل زمستان ثبت شده است. هسته بیشینه این آلاینده در هیچ یک از فصول در یک مکان مستقر نیست و جابجا می‌گردد. هرچند مناطق دارای کمینه غلظت این آلاینده تقریباً ثابت هستند و در بیشتر اوقات در اطراف ایستگاه شریف و شهرداری منطقه ۱۰ استقرار دارد. در بیشتر مواقع غلظت آلاینده ذرات معلق بین ۰ تا ۲۰۰ میکروگرم بر متر معکب در نوسان است. به نظر نمی‌رسد این آلاینده دارای روند معینی باشد. پراکنش مکانی این آلاینده ظاهراً دارای الگویی تکرار شونده است. در فصل بهار و پاییز بیشینه این آلاینده در اطراف ایستگاه‌های ستاد بحران و شهرداری منطقه ۷ مستقر است، درحالی‌که در تابستان و زمستان بیشینه غلظت این آلاینده در دو منطقه متفاوت مشاهده می‌گردد. اما مناطق دارای غلظت کمینه این آلاینده تقریباً ثابت هستند. رفتار ماهانه آلاینده دی‌اکسید گوگرد نیز روند خاصی را به نمایش نمی‌گذارد. الگوی پراکنش مکانی این آلاینده ظاهراً دارای توالی‌های شش ماهه است. در دو فصل ابتدایی سال، بیشینه غلظت این آلاینده در اطراف ایستگاه اقدسیه مشاهده می‌گردد، درحالی‌که در شش ماه دوم سال بیشینه این آلاینده در اطراف ایستگاه ژئوفیزیک به ثبت رسیده است. همچنین کمینه غلظت آلاینده در دو فصل ابتدایی در اطراف ایستگاه شهرداری منطقه ۷ و ستاد بحران اندازه‌گیری شده است، در حالی‌که در دو فصل دوم در اطراف ایستگاه‌های شهرداری منطقه ۴ و گلبرگ ثبت شده است. بررسی ارتباط آلاینده مونوکسید کربن با متغیرهای اقلیمی فشار هوا، دما، سرعت باد، و رطوبت نسبی نشان می‌دهد که این آلاینده با متغیرهای مورد بررسی دارای همبستگی معنادار در سطح ۰/۹۹ است. بیشترین ارتباط بین مونوکسید کربن با سرعت باد مشاهده می‌شود و کمترین ارتباط بین آلاینده مونوکسید کربن با عامل رطوبت نسبی محاسبه شده است. آلاینده دی‌اکسید نیتروژن بیشترین ارتباط را با فشار سطحی - در مقایسه با سایر عناصر اقلیمی - دارا است. ارتباط آلاینده دی‌اکسید نیتروژن با سرعت باد و رطوبت نسبی تقریباً برابر است اما این آلاینده با سرعت باد رابطه منفی و با رطوبت نسبی رابطه مثبت دارد. ارتباط منفی دی‌اکسید نیتروژن با دمای هوا بسیار قابل تأمل است زیرا روند تغییرات این آلاینده با دما معکوس است. به نظر می‌رسد با افزایش دما آلاینده دی‌اکسید نیتروژن تجزیه شده و وارد واکنش‌های جانبی شود. بررسی ارتباط آلاینده ازن با عناصر اقلیمی از همبستگی قوی این آلاینده با این متغیرها حکایت دارد. بیشترین ارتباط بین ازن با فشار هوا مشاهده می‌شود. این ارتباط علیرغم معکوس بودن آن بسیار قوی است. پس از آن آلاینده ازن با دما ارتباط مثبت و قوی دارد که کاملاً بیانگر ارتباط تشکیل ازن با دمای هوا است. کمینه ارتباط ازن نیز با عنصر رطوبت نسبی محاسبه شده است که دارای علامتی منفی است. همبستگی میان ذرات معلق و عناصر اقلیمی کاملاً با سایر آلاینده‌ها متفاوت است. این عامل با فشار هوا و رطوبت نسبی رابطه منفی دارد و بیشترین ارتباط آن با دما محاسبه شده است. نکته بسیار جالب همبستگی مثبت سرعت باد با ذرات معلق است. به نظر می‌رسد سرعت باد سبب انتقال و تجمع ذرات آلاینده در منطقه شمالی تهران شده است. دی‌اکسید گوگرد با سرعت باد و دما دارای همبستگی منفی و با رطوبت نسبی و فشار هوا دارای همبستگی مثبت است. بیشترین ارتباط بین این آلاینده با سرعت باد محاسبه شده است.

## منابع

۱. اجتهادی، مرجان، (۱۳۸۶)، بررسی آلودگی هوای شهری ناشی از سامانه حمل و نقل با تاکید بر ذرات معلق و ارائه راهکارهای مدیریتی (مطالعه موردی تهران)، دهمین همایش ملی بهداشت محیط، ۸ الی ۱۰ آبان ماه ۱۳۸۶، همدان.
  ۲. اصیلان، حسن، (۱۳۸۶)، آلودگی هوا (منابع، اثرات، روش های کنترل، قوانین و مقررات، استانداردها)، نشر میترا.
  ۳. بیدختی، علی اکبر، شرعی پور، زهرا، (۱۳۸۸)، شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران)، محیط شناسی، سال سی و پنجم، شماره ۵۲ زمستان ۸۸، صفحه ۱-۱۴.
  ۴. بیگدلی، آتوسا، (۱۳۸۳)، تاثیر اقلیم و آلودگی هوای تهران بر بیماری سکنه قلبی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۶۴.
  ۵. حسین پور، زینب، (۱۳۹۰)، واكوی شرایط آلودگی هوا با تاکید بر ذرات معلق (PM-10)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
  ۶. سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۱.
  ۷. شرعی پور، زهرا، (۱۳۸۸)، بررسی تغییرات فصلی و روزانه آلاینده های هوا و ارتباط آن با پارامترهای هوا شناسی، مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۲، صفحه ۱۱۹-۱۳۷.
  ۸. شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، (۱۳۹۱).
  ۹. علیجانی، بهلول، صفوی، سید یحیی. (۱۳۸۵)، بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران پژوهش های جغرافیایی، صص ۵۸-۳۷، زمستان ۱۳۸۵، تهران.
  ۱۰. عزیزی، قاسم، قنبری، حسینعلی، (۱۳۸۸)، شبیه سازی عددی رفتار آلودگی هوای تهران براساس باد پژوهش های جغرافیایی، ۶۸-۵۲، تهران.
  ۱۱. فروتن سبزواری، شهین بانو، (۱۳۴۴)، آلودگی هوای تهران از دود بویژه وسایل نقلیه موتوری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
  ۱۲. قلی زاده، محمدحسین، دکتر منوچهر فرج زاده، محمد دارند، (۱۳۸۸)، ارتباط آلودگی هوا با مرگ و میر جمعیت شهر تهران، مجله پژوهشی حکیم، تابستان، دوره دوازدهم، شماره دوم، صفحات ۷۱-۶۵.
  ۱۳. محسنی، ذات اله، (۱۳۶۵)، تاثیر عوامل جوی بر روی آلودگی و هوای تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
  ۱۴. محمدی، حسین، (۱۳۸۵)، ارتباط عناصر اقلیمی و آلاینده های هوای تهران با مرگ و میرهای ناشی از بیماریهای قلبی (دوره مطالعاتی : ۲۰۰۳-۱۹۹۹)، پژوهش های جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، شماره ۵۸، زمستان ۱۳۸۵، صفحات ۶۶-۴۷.
  ۱۵. ندافی، کاظم، لیلی، مصطفی، نبی زاده، رامین، یونسین، مسعود، مصداقی نیا، علیرضا، نظم آرا، شاهرخ، (۱۳۸۸)، غلظت ذرات معلق و شاخص کیفیت هوا AQI در محدوده ی شهر تهران، مجله دانشکده بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی، دوره ۷، شماره ۱، بهار ۸۸، صص ۶۷-۵۷.
  ۱۶. یدقار، امیر، (۱۳۸۵)، مدل سازی و تحلیل پراکنش آلاینده های منتشر از منابع متحرک آلودگی هوا بر پایه GIS، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.
17. Berlyand, M. E., 1991, Prediction and Regulation of Air Pollution, Kluwer Academic publishers, 312.

18. Lai, Li-Wei, Wan-Li Cheng, 2009, Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns, *Science of the Total Environment*, vol. 407, pp 2724 – 2733.
19. Zawar-reza, Payman, Simon Kingham, Jamie Pearce, 2005, Evaluation of a yearlong dispersion modeling of PM10 using the Mesoscale model TAPM for Christchurch, New Zealand, *Science of the Total Environment* , 349, 249– 259.