



بررسی روندهای زمانی و مکانی تغییرات آلاینده‌های هوا در کلانشهر کرج

اعظم شاه بیک^۱، راحله پورمظاهری^۱، احمد طاهری^{۲*}

۱- اداره پایش و ارزیابی آلاینده‌های زیست محیطی، شهرداری کرج، کرج، ایران

۲- واحد سنجش و نگهداری، شرکت کنترل کیفیت هوا (وابسته به شهرداری تهران)، تهران، ایران

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	مقدمه: آلودگی هوا به عنوان یکی از معضلات کلانشهرها به شمار می‌آید که تأثیرات سوء متعددی بر سلامت انسان و سایر موجودات دارد. کرج، به عنوان یک کلانشهر صنعتی و در مجاورت صنایع و نیروگاه‌های بزرگ کشور از منابع متحرک و ثابت تأثیر می‌پذیرد. مهم‌ترین مطالعه انجام شده در زمینه آلودگی هوای شهر کرج را می‌توان تدوین سیاهه انتشار آلاینده‌های هوای این شهر دانست که برای آلاینده‌های معیار و در دو بخش منابع ثابت و متحرک، به تفکیک هر منبع بیان شده است. با این وجود پس از اصلاحات ایجاد شده در شبکه سنجش کیفیت هوای این شهر، مطالعه حاضر را می‌توان اولین مطالعه جامع آلاینده‌های هوا، از نظر روندهای زمانی و مکانی آن‌ها دانست.
تاریخچه مقاله:	مواد و روش‌ها: در این مطالعه بررسی شاخص کیفیت هوا برای آلاینده‌های معیار مورد سنجش در ایستگاه‌ها، شامل چهار آلاینده گازی ازن، منوکسید کربن، نیتروژن دی‌اکسید و گوگرد دی‌اکسید و دو آلاینده ذرات معلق، شامل ذرات معلق کوچکتر از $2.5 \mu\text{m}$ (PM _{2.5}) و $10 \mu\text{m}$ میکرون، به تفکیک ایستگاه‌های سنجش به انجام رسید. هم‌چنین در انتها شاخص کیفیت هوای شهر، بدست آمده از مجموع ایستگاه‌ها، بررسی شد.
دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳	نتایج: بر اساس این مطالعه آلاینده‌های ازن و PM _{2.5} به عنوان آلاینده‌های اصلی شهر کرج در فصول گرم و سرد سال به شمار می‌آیند و سایر آلاینده‌ها به ندرت وضعیت شاخص کیفیت هوا را از حد مجاز فراتر می‌برند. در بازه زمانی یک ساله مورد بررسی، آلاینده‌های PM _{2.5} و ازن به ترتیب، ۹۴ و ۱۸ روز هوای شهر کرج را در وضعیت با شاخص در محدوده ناسالم قرار دادند. هم‌چنین در این مطالعه، بررسی اثر انتقال آلاینده‌ها با استفاده از ترکیب داده‌های غلظت آلاینده‌ها و سرعت و جهت باد مورد بررسی و برای هر ایستگاه سنجش کیفیت هوا، جهت‌ها غالب منتقل‌کننده آلاینده‌ها به آن ایستگاه تعیین گردیدند. بر اساس نتایج مطالعه حاضر، برای آلاینده PM _{2.5} به عنوان مهم‌ترین آلاینده در شهر کرج، با بررسی داده‌های غلظت ذرات معلق کوچکتر از $2.5 \mu\text{m}$ میکرون، می‌توان دریافت که بالاترین غلظت و به دنبال آن بیشترین روزهای با شاخص در محدوده ناسالم برای این آلاینده به ترتیب در ایستگاه‌های مترو و منطقه سه و در فصول سرد سال (پاییز و زمستان) به ثبت رسیده است.
کلمات کلیدی:	بحث: با بررسی موقعیت این دو ایستگاه، می‌توان این دو ایستگاه را به عنوان ایستگاه‌های ترافیکی ارزیابی نمود. ایستگاه مترو با توجه به این‌که در محوطه مترو کرج قرار دارد، نه تنها از آلودگی‌های ایجاد شده توسط ناوگان حمل و نقل در مسیرهای مجاور ایستگاه (که مهم‌ترین آن‌ها آزادراه کرج- قزوین می‌باشد) تأثیر می‌پذیرد، بلکه تردد و توقف اتوبوس‌های واحد و ناوگان تاکسیرانی نیز می‌تواند گسیل ذرات معلق در آن محدوده را به همراه داشته باشد. از طرف دیگر ایستگاه منطقه سه نیز با فاصله بسیار کم از بلوار ارم

قرار دارد، کاملاً از آلاینده‌های گسیل شده از ناوگان حمل و نقل در این مسیر تأثیر می‌پذیرد. بر اساس بررسی‌های انجام شده، با توجه به ماهیت ثانویه بودن آلاینده‌های اصلی شهر کرج شامل ازن در فصل گرم سال و بخش عمده $PM_{2.5}$ در فصل سرد سال، لازم است برنامه کاهش آلودگی هوا در این کلانشهر بر مبنای مدل‌سازی آلودگی هوا با قابلیت پیاده‌سازی واکنش‌های فتوشیمیایی در جو توسعه یابد.

مقدمه

امروزه تأثیرات مخرب آلودگی هوا بر سلامت انسان‌ها بر کسی پوشیده نیست. سازمان بهداشت جهانی آلودگی هوا را به عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات سلامت انسان‌ها اعلام کرده است. بر اساس اعلام این سازمان، از هر ۱۰ نفر در جهان، ۹ نفر هوایی با سطوح آلودگی بالاتر از حدود مجاز تعیین شده توسط این سازمان، تنفس می‌کنند. بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط این سازمان، مرگ سالانه ۷ میلیون نفر در اثر آلودگی هوا در جهان رقم می‌خورد. اثرات مخرب مذکور توسط مطالعات متعدد دیگری نیز در مناطق مختلف به اثبات رسیده است (WHO, 2021). همچنین مطالعات متعددی در شهرهای مختلف جهان اثرات سوء آلودگی هوا بر سلامت انسان، محیط زیست و اقلیم را نشان داده‌اند (Jerrett *et al.*, 2009; Landry *et al.*, 2013; Jung *et al.*, 2016).

شهر کرج با جمعیتی تقریباً برابر با ۲/۵ میلیون نفر، در ۳۶ کیلومتری غرب تهران و دامنه جنوبی رشته کوه البرز قرار گرفته است (Motefakher *et al.*, 2007). این کلانشهر به دلیل قرارگیری در مجاورت صنایع بزرگ مانند نیروگاه شهید رجایی و سیمان آبیک، متأثر از آلودگی‌های حاصل از این منابع می‌باشد. همچنین تردد ناوگان حمل و نقل فاقد استانداردهای لازم و فرسوده نیز بار آلودگی هوای قابل ملاحظه دیگری بر این کلانشهر وارد کرده است (Moeinodini & Taleshi, 2019). وجود کارگاه‌های متعدد و صنایع کوچک مقیاس در محدوده این شهر نیز از دیگر موارد قابل ملاحظه تولید آلاینده‌های هوا در محدوده این شهر به حساب می‌آیند.

شهر کرج با آلاینده‌های هوای متعددی مواجه بوده که به طور کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته آلاینده‌های فصول گرم و سرد تقسیم کرد. ازن، آلاینده‌ایست که در فصول گرم افزایش یافته و تقریباً در شش ماهه نخست سال، آلاینده معیار می‌باشد. ماهیت ازن به گونه‌ایست که هیچ منبع گسیل مستقیمی برای آن وجود نداشته و طی

واکنش‌های فتوشیمیایی با حضور پیش‌سازهای آن (عمدتاً ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن) و نور خورشید تولید می‌گردد (Seinfeld & Pandis, 2008). فوتون تابیده شده از خورشید به عنوان رکنی اساسی در تولید ازن به حساب آمده و غلظت آن متناسب با شدت تابش فوق می‌باشد، از این رو این آلاینده در فصول گرم به بالاترین حد خود رسیده و تقریباً در فصول سرد سال (نیمه دوم سال) مقادیر قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد.

ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$) در شش ماه دوم سال با کاهش دما و کاهش ارتفاع لایه مرزی، به آلاینده معیار بسیاری از کلانشهرها، از جمله کلانشهر کرج تبدیل می‌شود (Kermani *et al.*, 2020). آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون دارای ماهیتی بسیار پیچیده بوده که می‌تواند از منابع مختلف طبیعی، احتراقی و فرایندی تولید گردد. همچنین این آلاینده دارای دو بخش اولیه و ثانویه بوده که شناسایی منابع گسیل و ارائه سناریوهای کاهش آن را با چالش همراه می‌کند (Dai *et al.*, 2018).

مهم‌ترین مطالعه انجام شده در زمینه آلودگی هوا در کلانشهر کرج را می‌توان مطالعه تدوین سیاهه انتشار آلاینده‌ها توسط سازمان محیط زیست بر مبنای سال ۹۶ دانست. این مطالعه انتشار آلاینده‌های مهم از جمله ذرات معلق، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، منوکسید کربن و ترکیبات آلی فرار را برای منابع اصلی انتشار از جمله ناوگان حمل و نقل، صنایع، بخش خانگی و تجاری، نیروگاه‌ها و جایگاه‌های سوخت تدوین و ارائه نموده است. بر اساس مقادیر ارائه شده در گزارش فوق، به طور کلی در سال ۱۶۰،۷۴۲ تن آلاینده‌های مختلف در کلانشهر کرج تولید می‌گردد که منابع متحرک با تولید بیش از ۱۲۷ هزار تن سهم ۷۹ درصدی و منابع ثابت با تولید تقریباً ۳۳ هزار تن، سهم ۲۱ درصدی از انتشار آلاینده‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. مقادیر سهم منابع در مورد آلاینده‌های مختلف، مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهند. به طور مثال در مورد آلاینده ذرات معلق، منابع متحرک با ۱۷۵۲ تن سهم

انجام داد. به دلیل داده‌های محدود و کیفیت پایین آن‌ها در سنوات گذشته، مطالعات محدودی در این زمینه به انجام رسیده که در آن‌ها نیز به محدودیت‌های داده‌های موجود جهت بررسی وضعیت اشاره شده است. از این رو می‌توان این مطالعه را کامل‌ترین و جامع‌ترین مطالعه در این زمینه قلمداد نمود. در این مطالعه روند زمانی و مکانی آلاینده‌های معیار هوا شامل آلاینده‌های گازی ازن، کربن منوکسید، دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن و آلاینده‌های ذرات معلق در دو دسته ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون و کوچکتر از ۱۰ میکرون، مورد سنجش در ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای کرج، از نظر شاخص کیفیت هوا و غلظت آلاینده‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در برگیرنده ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، مستقر در محدوده کلانشهر کرج می‌باشد. در این ایستگاه‌ها مجموعه‌ای از تجهیزات سنجش آلاینده‌های معیار شامل آلاینده‌های گازی ازن، کربن منوکسید، دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن و آلاینده‌های ذرات معلق در دو دسته ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون و کوچکتر از ۱۰ میکرون، اندازه‌گیری کیفیت هوا را انجام می‌دهند. خلاصه‌ای از مشخصات ایستگاه‌ها به همراه آلاینده‌های مورد سنجش در آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. تصویر پراکندگی ایستگاه‌های موجود در کلانشهر کرج و مورد استفاده در این مطالعه نیز در جدول ۱ آمده است.

۱۵ درصدی و منابع ثابت با ۹۸۶۴ تن، سهم ۸۵ درصدی را به خود اختصاص می‌دهند (Ohadi *et al.*, 2019). البته لازم به ذکر است که در مورد ذرات معلق، سهم‌های گزارش شده مربوط به کل ذرات معلق می‌باشد که بخش عمده آن‌ها در منابع ثابت را ذرات فرآیندی تشکیل می‌دهند که اندازه نسبتاً بزرگی داشته و در بازه زمانی کوتاهی از انتشار، نشست می‌کنند، در این خصوص نیز اگر ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون ملاک قرار گیرد، منابع متحرک نقش غالب را ایفا خواهند کرد.

در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه آلودگی هوا در شهر کرج انجام شده که از مهمترین آن‌ها می‌توان به مطالعه Kermani و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد که در آن به ارتباط هواشناسی و ذرات معلق ۲/۵ میکرون پرداخته شده است. این مطالعه نشان داده است که ارتباط مستقیمی بین غلظت ذرات و پارامترهای دما، رطوبت و فشار وجود دارد. مطالعه دیگر که توسط Vahidi و همکاران (۲۰۲۰) به انجام رسید، به اثرات بلندمدت ذرات معلق بر سلامتی پرداخته و ارتباط آن‌ها با مرگ و میر و بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی نشان داده شد. همچنین مطالعات متعددی در مورد ساختار ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون، منشایی، روندهای زمانی-مکانی آن‌ها و اثرات آن‌ها بر سلامتی در شهر کرج به انجام رسیده است (Kermani *et al.*, 2021-a, Azimi *et al.*, 2021, Kermani *et al.*, 2021-b).

با توجه به افزایش قابل ملاحظه کمیت و کیفیت داده‌های کیفیت هوا در سال گذشته با انتقال ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا از اداره کل محیط زیست البرز به شهرداری کرج، می‌توان تحلیل‌های زمانی، مکانی را در این محدوده

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌ها به همراه آلاینده‌های مورد سنجش

ردیف	نام ایستگاه	موقعیت جغرافیایی		آلاینده‌های مورد سنجش
		Lat	Long	
۱	دانشکده محیط زیست	۳۵,۸۲۵۴۶۴۵	۵۰,۹۹۵۹۶۵۶	CO-O ₃ -NO ₂ -SO ₂ -PM ₁₀
۲	فرهنگسرا کرج	۳۵,۸۲۰۰۰۴	۵۰,۹۸۹۶۶۵	CO-O ₃ -NO ₂ -SO ₂ -PM ₁₀ -PM _{2.5}
۳	مترو کرج	۳۵,۷۸۶۰۹۷۲	۵۰,۹۷۰۳۶۲۱	CO-O ₃ -PM _{2.5}
۴	منطقه ۳	۳۵,۷۸۸۴۳	۵۰,۸۸۱۹۵	PM ₁₀ -PM _{2.5}
۵	منطقه ۵	۳۵,۸۲۰۶۹	۵۰,۹۴۷۱۸	PM ₁₀ -PM _{2.5}
۶	منطقه ۶	۳۵,۸۲۸۶۲۱	۵۰,۹۴۰۷۴۹	NO ₂ -SO ₂ -PM ₁₀
۷	منطقه ۸	۳۵,۸۴۴۳۸	۵۱,۰۰۷۷۶	PM ₁₀ -PM _{2.5}



شکل ۱- پراکندگی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، موجود در کلانشهر کرج

(Carslaw & Roopkins, 2012) در بستر نرم‌افزار R استفاده شد. در گراف قطبی با ترکیب داده‌های غلظت با داده‌های سرعت و جهت باد، می‌توان جهات تأثیرگذار بر غلظت آلاینده‌ها و سرعت‌هایی که منجر به غلظت‌های بالا می‌شوند را تعیین نمود. از این رو نوع از نمودارها با ایجاد ارتباط بین داده‌های غلظت و سرعت و جهت باد، می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد موقعیت منابع مؤثر بر هر آلاینده در اختیار قرار دهد.

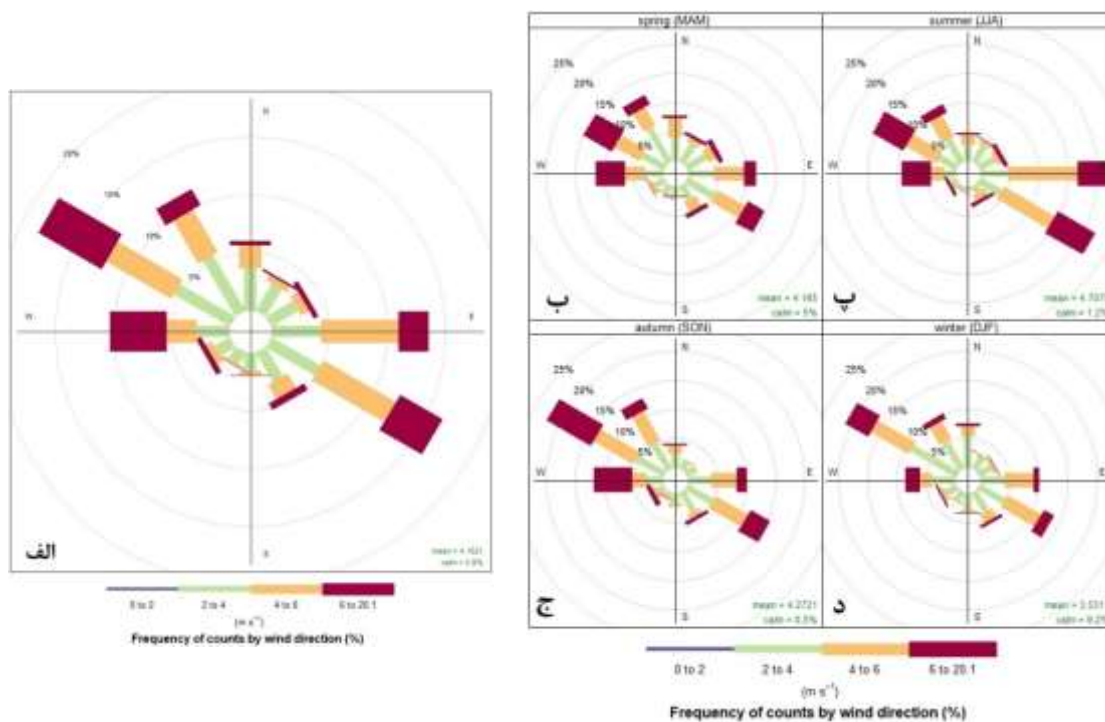
نتایج

هواشناسی

سرعت و جهت باد: در این قسمت از داده‌های سرعت و جهت باد، اندازه‌گیری شده در ایستگاه فرودگاه پیام به منظور تعیین باد غالب در محدوده مورد مطالعه، استفاده شده است. شکل ۲ گلباد بدست آمده برای کل بازه مورد بررسی و همچنین به تفکیک فصول را نشان می‌دهد.

با یکپارچه‌سازی ایستگاه‌های سنجش کلانشهر کرج و نگهداری آن‌ها توسط شهرداری کرج، میزان کمیت و کیفیت داده حاصله به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. از این رو در این مطالعه به منظور اطمینان از صحت داده‌ها و نتایج ارائه شده، بازه مورد مطالعه در محدوده زمانی مذکور تعیین گردید. همچنین معیار پوشش حداقل یک سال کامل، ملاحظه دیگری بود که در این مطالعه لحاظ شد. از این رو بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱ به عنوان بازه مورد مطالعه تعیین گردید. همچنین از داده‌های هواشناسی شامل سرعت و جهت باد، دما و رطوبت، اندازه‌گیری شده در ایستگاه فرودگاه پیام، به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه دارای داده در دسترس به محدوده مورد مطالعه، به منظور ارائه تحلیل‌های مرتبط با سرعت و جهت باد و ارتباط آلاینده‌های هوا با متغیرهای هواشناسی مذکور استفاده شده است.

در این مطالعه انجام محاسبات و رسم نمودارهای مربوطه با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و Matlab به انجام رسید. همچنین برای تولید گلباد و گراف قطبی از مدل Openair



شکل ۲- گلباد بر اساس داده‌های سرعت و جهت باد در ایستگاه فرودگاه پیام برای بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱ (الف) و به تفکیک فصول، بهار (ب)، تابستان (پ)، پاییز (ج) و زمستان (د)

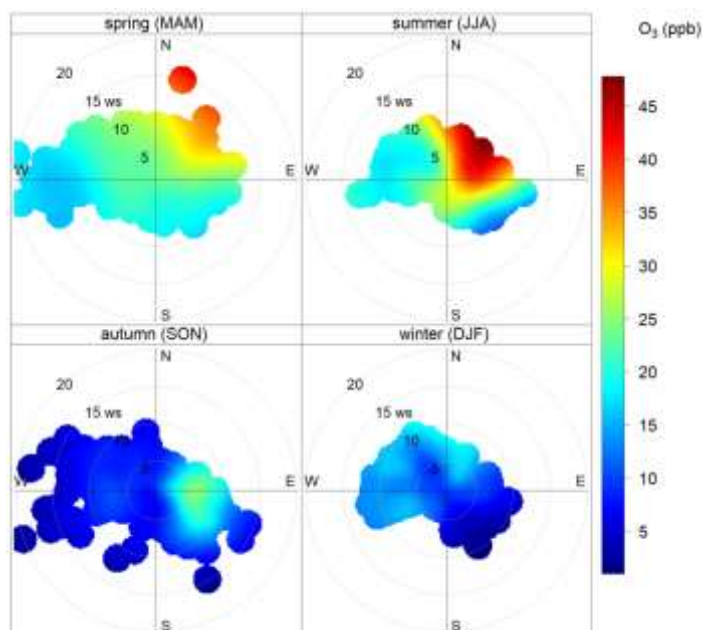
شاخص، در ماه‌های گرم سال ملاحظه شده و ماه‌های سرد سال مقادیر پایینی را برای این آلاینده نشان می‌دهند. گراف قطبی آلاینده ازن به تفکیک فصول در بازه زمانی مورد بررسی در شکل ۴ آمده است.

آلاینده ازن

شکل ۳ تغییرات زمانی شاخص آلاینده ازن برای مجموع ایستگاه‌های سنجش در کلانشهر کرج در بازه مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین



شکل ۳- تغییرات زمانی شاخص آلاینده ازن در کلانشهر کرج در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

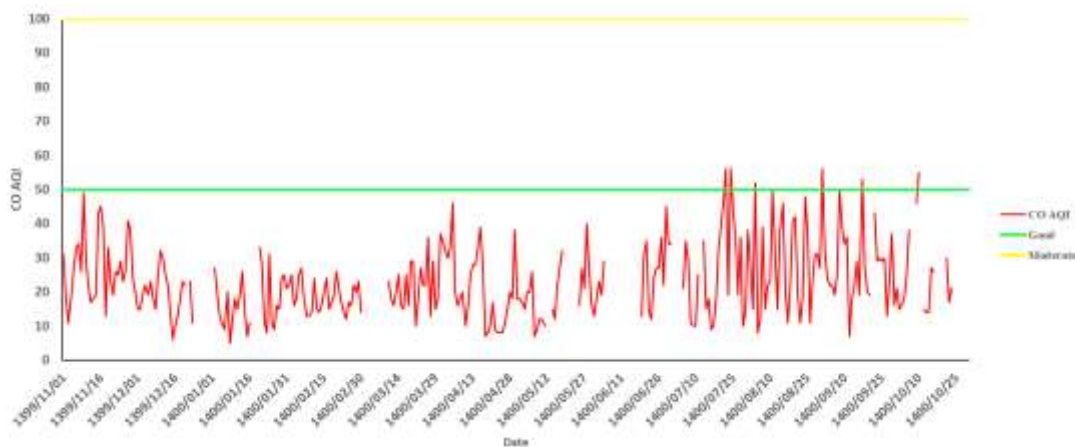


شکل ۴- گراف قطبی آلاینده ازن به تفکیک فصول در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

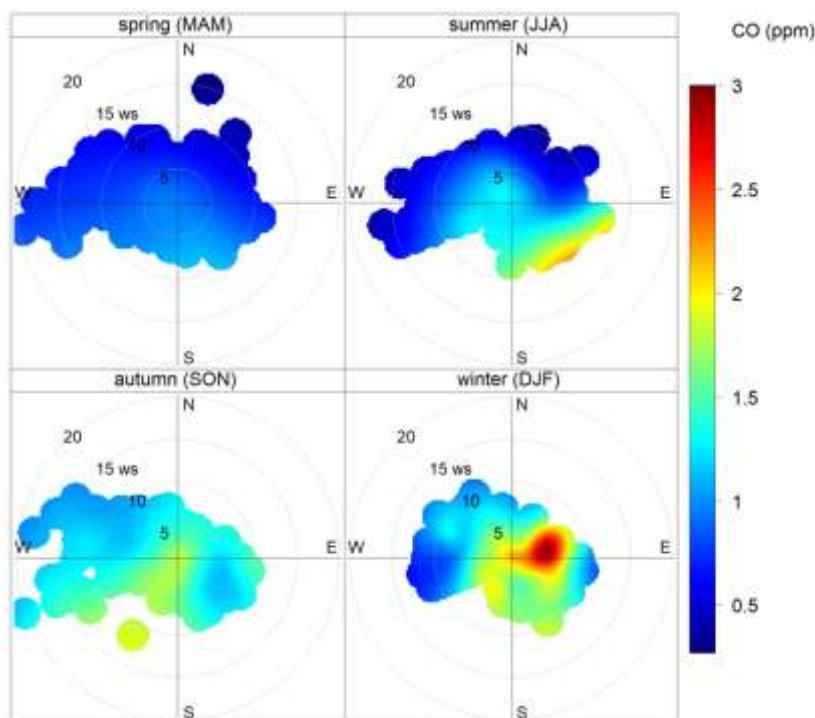
آلاینده منوکسید کربن

شکل ۵ تغییرات زمانی شاخص منوکسید کربن برای مجموع ایستگاه‌های سنجش را در کلانشهر کرج نشان می‌دهد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این آلاینده در طول سال روند تقریباً ثابتی را طی نموده و بر خلاف ازن، وابستگی کمتری به شرایط آب و هوایی از خود نشان می‌دهد. هرچند که به صورت

نسبی، در فصول سرد مقادیر بالاتری نسبت به فصول گرم را نشان می‌دهد که می‌تواند متأثر از شرایط جوی و کاهش ارتفاع لایه مرزی باشد که تجمع آلاینده‌ها و به دنبال آن افزایش غلظت و شاخص آن‌ها را به همراه دارد. شکل ۶ گراف قطبی آلاینده منوکسید کربن به تفکیک فصول در بازه زمانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تغییرات زمانی شاخص آلاینده منوکسید کربن در کلانشهر کرج در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

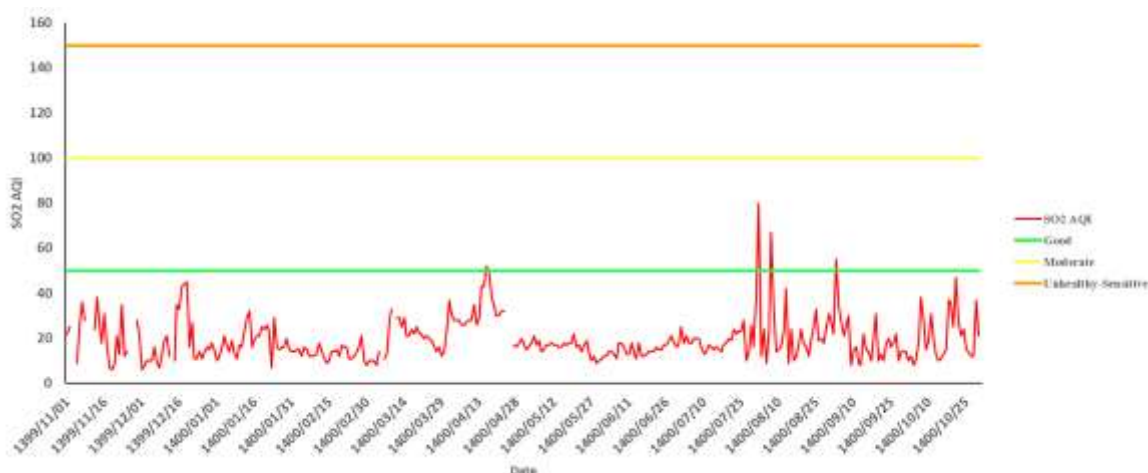


شکل ۶- گراف قطبی آلاینده منوکسید کربن به تفکیک فصول در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

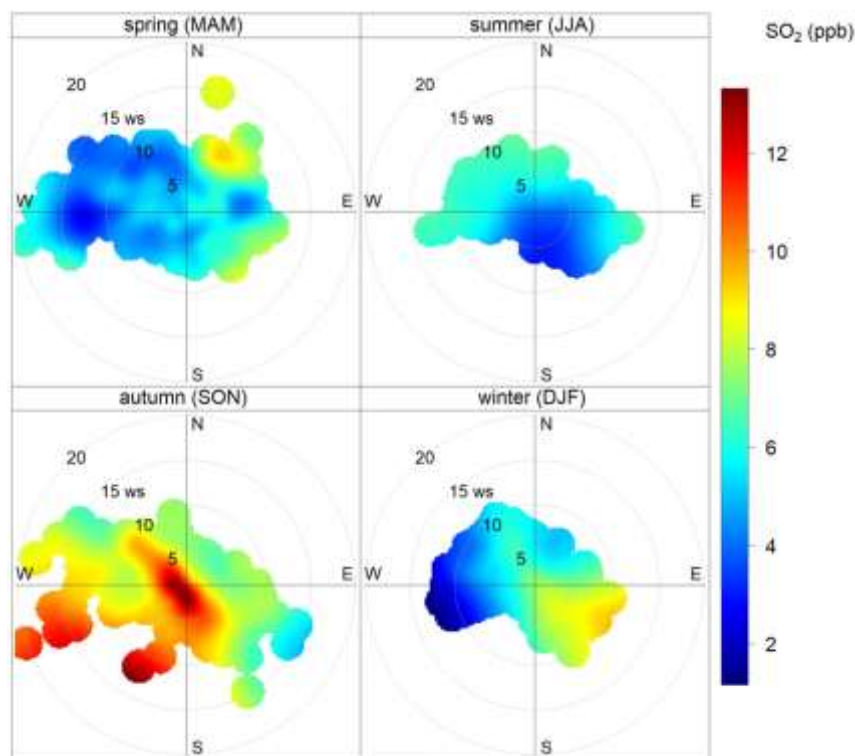
رسیده‌است که می‌تواند تاثیر تجمع آلاینده در زمان وقوع شرایط پایداری جوی و همچنین احتمال انتقال این آلاینده از منابع خارج محدوده را نشان دهد. البته لازم به ذکر است که به طور کلی مقادیر اندازه‌گیری شده آلاینده گوگرد دی‌اکسید مقادیر کمی بوده و فاصله قابل ملاحظه‌ای تا حدود مجاز تعریف شده برای این آلاینده دارند.

آلاینده گوگرد دی‌اکسید

شکل ۷ تغییرات زمانی شاخص آلاینده گوگرد دی‌اکسید برای مجموع ایستگاه‌های سنجش را در کلانشهر کرج نشان می‌دهد. شکل ۸ گراف قطبی آلاینده گوگرد دی‌اکسید به تفکیک فصول در بازه زمانی مورد بررسی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل حداکثر مقادیر اندازه‌گیری شده برای این آلاینده در فصل پاییز و در دو حالت متفاوت سرعت باد کم و زیاد جنوب غربی به ثبت



شکل ۷- تغییرات زمانی شاخص آلاینده گوگرد دی‌اکسید در کلانشهر کرج در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

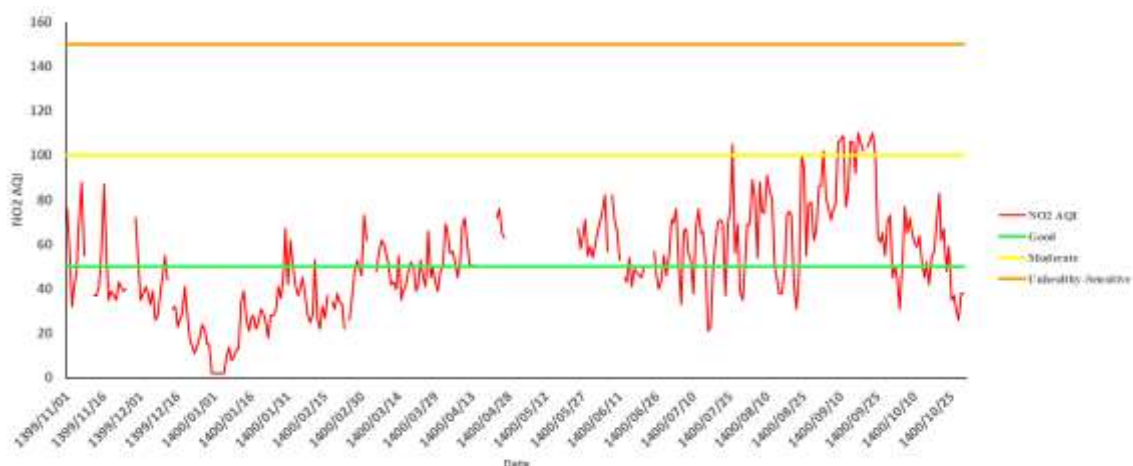


شکل ۸- گراف قطبی آلاینده دی اکسید گوگرد به تفکیک فصول در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

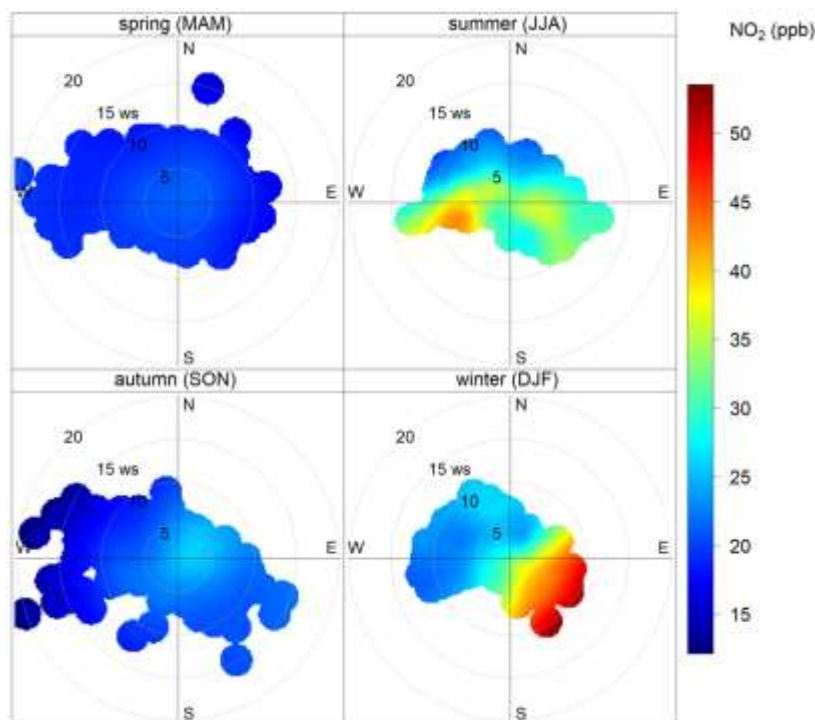
آلاینده نیتروژن دی اکسید

شکل ۹ تغییرات زمانی شاخص نیتروژن دی اکسید برای مجموع ایستگاه‌های سنجش را در کلانشهر کرج نشان می‌دهد. بر اساس گراف قطبی رسم شده برای آلاینده دی اکسید نیتروژن در شکل ۱۰، وزش باد از جهت جنوب غربی در فصل زمستان به طور میانگین، غلظت‌های بالاتری را برای این آلاینده

نسبت به سایر موارد به ثبت رسانده است. البته با توجه به شرکت آلاینده دی اکسید نیتروژن در واکنش‌های فتوشیمیایی و همچنین وجود بخش ثانویه در این آلاینده، نمی‌توان با اطمینان بالا استنباطی مبنی بر وجود منبع گسیل با فعالیت بالا در سمت جنوب غربی محدوده مورد مطالعه ارائه نمود.



شکل ۹- تغییرات زمانی شاخص آلاینده نیتروژن دی اکسید در کلانشهر کرج در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

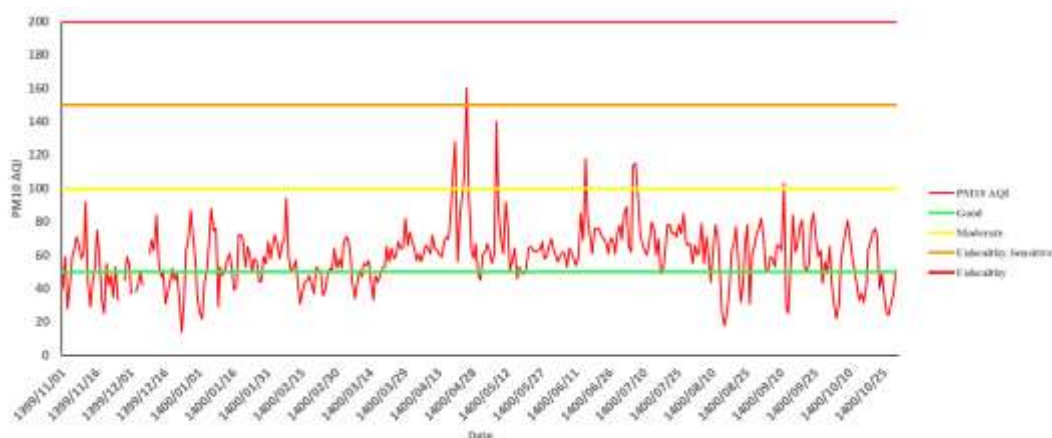


شکل ۱۰- گراف قطبی آلاینده دی‌اکسید نیتروژن به تفکیک فصول در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

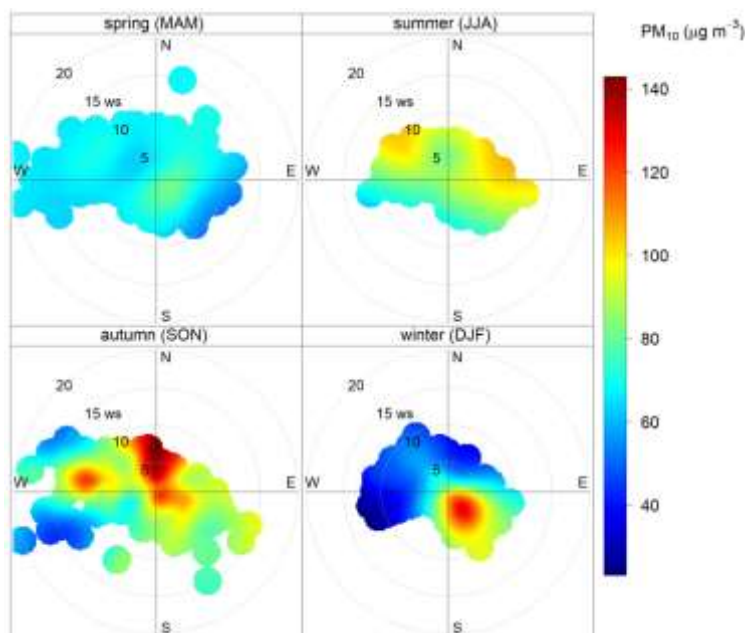
انتشارات فرآیندی به حداکثر غلظت خود می‌رسند، تحلیل نقاط با حداکثر مقادیر ثبت شده، می‌تواند با دقت خوبی به شناسایی منابع با پتانسیل گسیل بالا کمک کند. از آنجا که در بازه زمانی مورد بررسی، طوفان ریزگرد با شدت بالا به ثبت نرسیده، می‌توان گفت فعالیت منابع شمالی و غربی منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز منجر به مشاهده غلظت‌های بالا در این منطقه شده است.

آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون

شکل ۱۱ تغییرات زمانی شاخص ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون برای مجموع ایستگاه‌های سنجش را در کلانشهر کرج نشان می‌دهد. گراف قطبی آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون به تفکیک فصول در بازه زمانی مورد بررسی در نشان داده شده است. از آنجا که این آلاینده عمدتاً در اثر وقوع طوفان‌های ریزگرد و یا



شکل ۱۱- تغییرات زمانی شاخص آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون در کلانشهر کرج در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

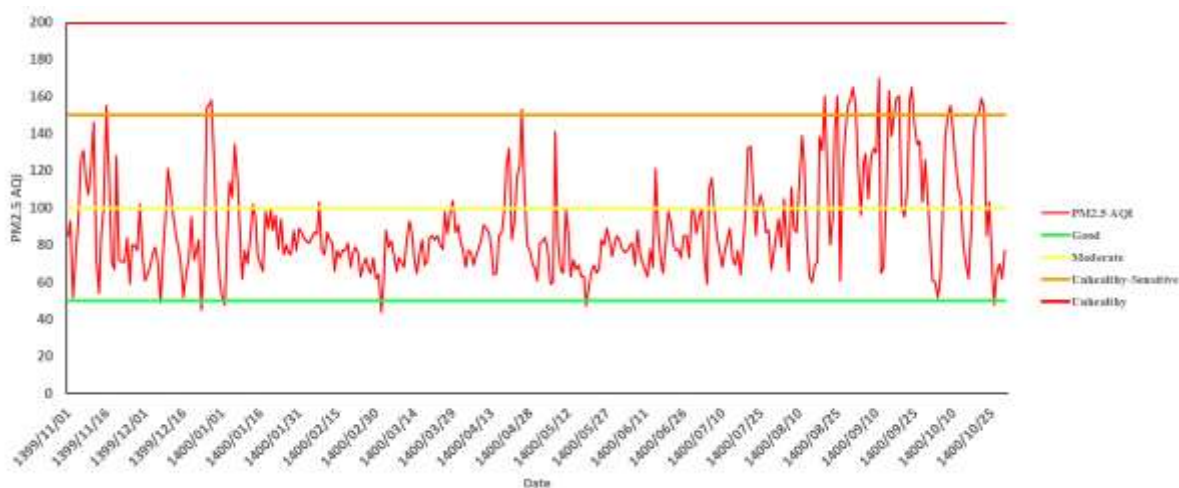


شکل ۱۲- گراف قطبی آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون به تفکیک فصول در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

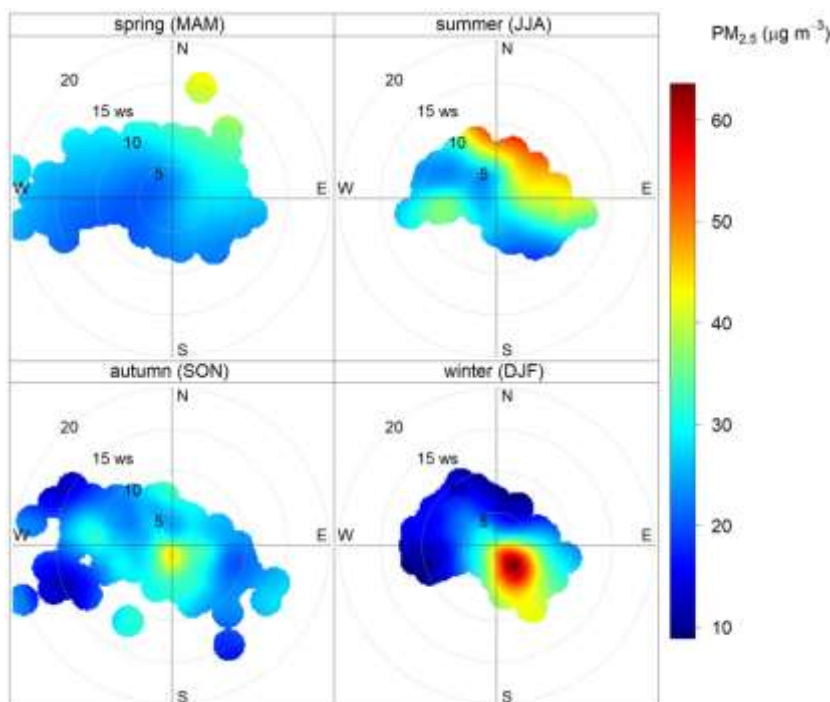
مرزی و ایجاد پدیده وارونگی را می‌توان دلیل اصلی افزایش غلظت این آلاینده در فصول سرد سال دانست. شکل ۱۴ گراف قطبی آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون به تفکیک فصول در بازه زمانی مورد بررسی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل و مطابق بر انتظاری که از رفتار این آلاینده وجود دارد، در فصول سرد سال (پاییز و زمستان) و در مواقع پایداری جوی (سرعت پایین باد و وارونگی جوی) حداکثر مقادیر غلظت مشاهده می‌شود و در فصل بهار، کاهش فعالیت منابع انتشار، خصوصاً در تعطیلات سال نو، در کنار شرایط مساعد جوی (سرعت قابل قبول باد) غلظت‌های پایین این آلاینده به ثبت رسیده است.

آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون

شکل ۱۳ تغییرات زمانی شاخص ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون برای مجموع ایستگاه‌های سنجش را در کلانشهر کرج نشان می‌دهد. بر خلاف سایر آلاینده‌ها ملاحظه می‌شود که شاخص این آلاینده روزهای متعددی مقادیر بالای ۱۰۰ را نشان می‌دهد که بیانگر وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس و ناسالم است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مقادیر شاخص برای این آلاینده در فصول سرد سال، به مراتب بیشتر از مقادیر آن در فصول گرم می‌باشد که علاوه بر تغییراتی که در احتراق (عمدتاً در بخش صنایع) اتفاق می‌افتد، بیشتر از شرایط جوی تأثیر می‌پذیرد، به طوریکه کاهش ارتفاع لایه



شکل ۱۳- تغییرات زمانی شاخص آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون در کلانشهر کرج در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱



شکل ۱۴- گراف قطبی آلاینده ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون به تفکیک فصول در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱

می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود حداکثر مقادیر مشاهده شده برای غلظت ازن، در فصل تابستان به ثبت رسیده است. همچنین بالاترین غلظت‌ها برای آلاینده ازن در منطقه مورد مطالعه زمانی که وزش باد شمال شرقی در محدوده وجود داشته، مشاهده شده است. جهت تقریباً مشابه در فصول بهار و پاییز نیز حداکثر غلظت‌ها را به همراه داشته است.

آلاینده منوکسید کربن آلاینده‌ایست که در اثر احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌شود (Prockop & Chichkova, 2007). در فرآیند احتراق هرگاه نسبت هوا به سوخت از حد استوکیومتری آن کمتر شود، باعث می‌شود تا اکسیژن به میزان قابل قبولی در دسترس قرار نگرفته و سوخت به صورت کامل فرآیند احتراق را طی نکند، از این رو تولید منوکسید کربن و کربن سیاه نماید (Taheri *et al.*, 2019). این آلاینده عمدتاً از ناوگان متحرک در کلانشهرها تولید می‌شود که با ارتقاء سطح تکنولوژی این بخش از منابع و جلوگیری از تولید خودروهای کاربراتوری، غلظت آن در کلانشهرها به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. در فصول زمستان و پاییز به علت کاهش سرعت وزش باد و ارتفاع لایه مرزی، افزایش غلظت برای این آلاینده مشاهده می‌شود. همچنین سرعت کم باد شرقی منجر به ثبت حداکثر مقادیر غلظت این آلاینده، در فصل زمستان شده است.

بحث

دو جهت شمال غربی و شرق و جنوب شرقی را می‌توان جهت با باد غالب در منطقه دانست که احتمال انتقال آلاینده‌های هوا از منابع بالادست در جهت‌های ذکر شده را ایجاد می‌کند. نیروگاه شهید رجایی و کارخانه سیمان آبیگ را می‌توان از مهم‌ترین منابع واقع در سمت شمال غربی و شهر تهران و صنایع اسلامشهر را نیز می‌توان مهم‌ترین منابع شرقی شهر کرج دانست که قابلیت اثرگذاری بر کیفیت هوا در محدوده شهر کرج را دارا هستند. همچنین بادهای شمال غربی در فصل‌های پاییز و زمستان و بادهای شرقی در فصل تابستان، بادهای غالب را در منطقه مورد مطالعه تشکیل می‌دهند.

آلاینده ازن یک آلاینده کاملاً ثانویه بوده که از پیش‌سازهای متعددی (عمدتاً نیتروژن دی‌اکسید و ترکیبات آلی فرار) در مجاورت تابش نور خورشید تشکیل می‌شود (Seinfeld & Pandis, 2008). از این رو می‌توان گفت دو عامل گسیل آلاینده‌ها (پیش‌سازهای ازن) و آب و هوا (مهم‌ترین آن‌ها شدت تابش می‌باشد، اما متغیرهایی هم چون دما و رطوبت نیز بر تشکیل ازن مؤثر هستند) بر تولید آن اثرگذار هستند. از این رو می‌توان گفت به دلیل تغییرات شدید آب و هوایی در فصول گرم و سرد سال، این آلاینده عمدتاً در فصول گرم تولید

در کلانشهر کرج مشاهده می‌گردد، غلظت آلاینده نیتروژن دی‌اکسید نیز بالا می‌باشد، از این رو احتمالاً نیترات سهم قابل ملاحظه‌ای از ذرات معلق را در کلانشهر کرج به خود اختصاص داده باشد.

ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون، به دلیل ابعاد بزرگتری که نسبت به ذرات احتراقی ریز دارند، بعضاً با عنوان ذرات درشت نیز شناخته می‌شوند (Lenschow, 2001). این ذرات عمدتاً دارای ساختار طبیعی بوده و در مواقع طوفان‌های گرد و غبار، بیشترین مقادیر خود را به ثبت می‌رسانند. از این رو در کلانشهرهایی با تولید بالای آلاینده‌های هوا، همچون کلانشهر کرج، بیشتر ذرات معلق ریز هستند که شاخص کیفیت هوا را تا حد ناسالم برای گروه‌های حساس و ناسالم می‌رسانند. با این وجود در مواردی نیز ذرات درشت (با قطر کمتر از ۱۰ میکرون) مقادیر بالایی از غلظت را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه در اقلیم دربرگیرنده کلانشهر کرج وزش بادهای شدید بیشتر در فصل تابستان رخ می‌دهد، انتظار می‌رود این آلاینده مقادیر بیشتری را در این فصل به ثبت رساند. شاخص این آلاینده در روزهای محدودی مقادیر بالای ۱۰۰ و در محدوده ناسالم را تجربه می‌کند و عمدتاً در محدوده پاک و قابل قبول قرار دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که بیشینه مقادیر این آلاینده در فصول گرم سال مشاهده می‌شود که متأثر از طوفان‌های ریزگرد می‌باشد.

در کنار ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون که با عنوان ذرات درشت شناخته می‌شوند، بخش دیگری از ذرات معلق، با قطر کوچکتر از ۲/۵ میکرون نیز مورد سنجش قرار می‌گیرند که معمولاً در کلانشهرها از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. این بخش از ذرات ساختار پیچیده‌ای داشته و از زیربخش‌های متعددی تشکیل می‌شوند. سه بخش عنصری، کربنی و یونی را می‌توان اجزای اصلی این بخش از ذرات دانست. این ذرات که عمدتاً ماهیت احتراقی دارند، در فصول سرد سال که پایداری جوی و وارونگی در آن شکل می‌گیرد، به بالاترین حد خود می‌رسند و بر خلاف ذرات درشت، وزش باد، کاهش غلظت آن‌ها را به همراه دارد (Song et al., 2006). با بررسی داده‌های غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون در ایستگاه‌های سنجش در شهر کرج، می‌توان دریافت که بالاترین غلظت و به دنبال آن بیشترین روزهای با شاخص در محدوده ناسالم برای این آلاینده به ترتیب در ایستگاه‌های مترو و منطقه ۳ به ثبت رسیده است. با بررسی موقعیت این دو ایستگاه، می‌توان این دو

با توجه به داده‌های بدست آمده از سیاهه انتشار در سال‌های گذشته دو منبع را می‌توان به عنوان مهم‌ترین منابع انتشار آلاینده گوگرد دی‌اکسید در کلانشهرها معرفی کرد. ناوگان حمل و نقل سنگین و صنایع که هر دو از سوخت مایع با درصد سولفور بالا استفاده می‌کردند، متهمان اصلی گسیل این آلاینده به شمار می‌رفتند. با ارتقاء سطح سوخت گازوئیل توزیعی به جایگاه‌های سوخت کلانشهرها به استاندارد یورو ۴ و کاهش قابل ملاحظه محتوی سولفور آن، نقش ناوگان سنگین به مراتب در گسیل آلاینده گوگرد دی‌اکسید کاهش یافت و در حال حاضر می‌توان صنایع مصرف کننده سوخت مایع را منابع با بالاترین سهم در گسیل این آلاینده دانست. به طور کلی مقادیر شاخص این آلاینده در حد پاک و قابل قبول می‌باشد، با این وجود مشاهده می‌شود که شاخص در فصول سرد سال به صورت نسبی مقادیر بیشتری را نسبت به فصول گرم نشان می‌دهد که می‌تواند در اثر افزایش استفاده از سوخت مایع با محتوی سولفور بالا در صنایع مجاور شهر باشد. لازم به ذکر است که این اقدام در دو سال گذشته به منظور جلوگیری از افت فشار در گاز بخش خانگی در صنایع کشور (از جمله در مجاورت کلانشهرهای کرج و تهران) به انجام می‌رسد.

اکسیدهای نیتروژن که به عنوان مجموع دو گونه نیتروژن دی‌اکسید و نیتروژن دی‌اکسید به حساب می‌آید، به همراه دو زیرمجموعه خود از مهم‌ترین پارامترها در مبحث آلودگی هوا می‌باشند. این آلاینده‌ها نیز همانند گوگرد دی‌اکسید از فرآورده‌های احتراق به شمار می‌آیند (Brewer et al., 1973). اگرچه نیتروژن دی‌اکسید تأثیر مستقیم قابل ملاحظه‌ای بر سلامت انسان و محیط زیست ندارد، اما عامل اصلی در تولید نیتروژن دی‌اکسید به حساب می‌آید که تأثیرات سوء زیادی بر سلامت انسان داشته و منجر به بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی و حتی مرگ زودرس می‌شود. از این رو از خانواده اکسیدهای نیتروژن، نیتروژن دی‌اکسید به عنوان آلاینده معیار به شمار آمده و شاخص کیفیت هوا بر مبنای آن محاسبه می‌گردد. هرچند که عمده مقادیر شاخص این آلاینده در محدوده‌های پاک و قابل قبول هستند، با این وجود مقادیر آن در فصول سرد به مراتب بیشتر از فصول گرم است. از آنجایی که اکسیدهای نیتروژن و به ویژه نیتروژن دی‌اکسید نقش بالایی در آلاینده‌های ثانویه جو شهری (شامل ازن و نیترات در ذرات معلق) دارند، توجه به این آلاینده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در فصول سرد سال که بالاترین شاخص‌ها

ایستگاه را به عنوان ایستگاه‌های ترافیکی ارزیابی نمود. ایستگاه مترو با توجه به این که در محوطه مترو کرج قرار دارد، نه تنها از آلودگی‌های ایجاد شده توسط ناوگان حمل و نقل در مسیرهای مجاور ایستگاه (که مهم‌ترین آن‌ها آزادراه کرج- قزوین می‌باشد) تأثیر می‌پذیرد، بلکه تردد و توقف اتوبوس‌های واحد و ناوگان تاکسیرانی نیز می‌تواند گسیل ذرات معلق در آن محدوده را به همراه داشته باشد. از طرف دیگر ایستگاه منطقه ۳ نیز با فاصله بسیار کم از بلوار ارم قرار دارد، کاملاً از آلاینده‌های گسیل شده از ناوگان حمل و نقل در این مسیر تأثیر می‌پذیرد.

در این مطالعه داده‌های آلودگی هوا و هواشناسی در کلانشهر کرج در بازه زمانی ۱۳۹۹/۱۱/۱ تا ۱۴۰۰/۱۱/۱ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. بر اساس بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت هرچند که روزهای با شاخص‌های در محدوده ناسالم برای گروه‌های حساس و ناسالم برای آلاینده‌های مختلف در کلانشهر کرج در بازه زمانی مورد مطالعه مشاهده شده، اما این شهر با دو آلاینده شاخص ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون و ازن مواجه می‌باشد که به ترتیب در فصول سرد و گرم سال به حداکثر مقادیر خود می‌رسند. از این رو می‌توان راهکارهای کاهش آلودگی هوا، با هدف آلاینده‌های ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون و ازن، برای کلانشهر کرج به شرح زیر بیان نمود:

با توجه به سهم بالای ناوگان دیزلی در گسیل ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرون، نوسازی ناوگان دیزلی و تجهیز آن به فیلتر دوده، اعمال طرح‌های ترافیکی به منظور محدود کردن تردد ناوگان دیزل در شهر در ساعات اوج غلظت ذرات معلق و تجهیز صنایع موجود در محدوده شهر (خصوصاً کارخانه‌های تولید بتن) به تجهیزات پایش کیفیت هوا می‌تواند از مهم‌ترین سناریوهای قابل اجرا توسط شهرداری کرج و به طور کلی مدیریت شهری این شهر، به منظور کاهش آلودگی هوا باشد.

در رابطه با آلاینده ازن، با توجه به ماهیت ثانویه آن و تأثیر اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات آلی فرار در تولید آن، لازم است انتشارات ترکیبات آلی فرار با اولویت بالا در این شهر به منظور کنترل آلاینده ازن در دستور کار قرار گیرد. تجهیز جایگاه‌های سوخت به طرح کهباب و کنترل سخت‌گیرانه معاینه فنی وسایل نقلیه جهت تردد در شهر، خصوصاً مناطق مرکزی، می‌تواند از مهم‌ترین اقدامات قابل اجرا در کوتاه‌مدت در این شهر در راستای کاهش آلاینده ازن باشد.

منابع

- Canadian forests. *European Journal of Forest Research*, 132(1), pp.71-81.
11. **Lenschow, P., Abraham, H.J., Kutzner, K., Lutz, M., Preuß, J.D. and Reichenbacher, W., 2001.** Some ideas about the sources of PM10. *Atmospheric Environment*, 35, pp.S23-S33.
 12. **Moeinaddini, M. and Ali-Taleshi, M.S., 2019.** A GIS Based Emission Inventory of Air Pollutants from Mobile Sources in Morning Rush Hours; Case Study: Karaj. *Journal of Environmental Health Engineering*, 6(4), pp.430-442.
 13. **Motefaker, M.S.S.M., Sadrbafighi, S.M., Rafiee, M., Bahadorzadeh, L., Namayandeh, S.M., Karimi, M. and Abdoli, A.M., 2007.** SuicEpidemiology of physical activity: a population based study in Yazd city. *Iranian Journal of Public Health*, 31(4), pp.77-81.
 14. **Ohadi, A.R., Habibian, M., Khorsandi, B., Ghasabzadeh, M., Fallah, N., 2019.** Karaj air pollution emission inventory, Departement of environment, Iran
 15. **Prockop, L.D. and Chichkova, R.I., 2007.** Carbon monoxide intoxication: an updated review. *Journal of the neurological sciences*, 262(1-2), pp.122-130.
 16. **Seinfeld, J. and Pandis, S., 2008.** *Atmospheric Chemistry and Physics*. 1997. New York.
 17. **Song, Y., Zhang, Y., Xie, S., Zeng, L., Zheng, M., Salmon, L.G., Shao, M. and Slanina, S., 2006.** Source apportionment of PM2.5 in Beijing by positive matrix factorization. *Atmospheric Environment*, 40(8), pp.1526-1537.
 18. **Taheri, A., Aliasghari, P. and Hosseini, V., 2019.** Black carbon and PM2.5 monitoring campaign on the roadside and residential urban background sites in the city of Tehran. *Atmospheric Environment*, 218, p.116928.
 19. **Vahidi, M.H., Fanaei, F. and Kermani, M., 2020.** Long-term health impact assessment of PM2.5 and PM10: Karaj, Iran. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 9(1), p.8.
 20. **WHO, Global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021.** Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
 1. **Azimi-Yancheshmeh, R., Moeinaddini, M., Feiznia, S., Riyahi-Bakhtiari, A., Savabieasfahani, M., van Hullebusch, E.D. and Lajayer, B.A., 2021.** Seasonal and spatial variations in atmospheric PM2.5-bound PAHs in Karaj city, Iran: Sources, distributions, and health risks. *Sustainable Cities and Society*, 72, p.103020.
 2. **Brewer, A.W., McElroy, C.T. and Kerr, J.B., 1973.** Nitrogen dioxide concentrations in the atmosphere. *Nature*, 246(5429), pp.129-133.
 3. **Carslaw, D.C. and Ropkins, K., 2012.** Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, pp.52-61.
 4. **Dai, Q., Bi, X., Liu, B., Li, L., Ding, J., Song, W., Bi, S., Schulze, B.C., Song, C., Wu, J. and Zhang, Y., 2018.** Chemical nature of PM2.5 and PM10 in Xi'an, China: Insights into primary emissions and secondary particle formation. *Environmental Pollution*, 240, pp.155-166.
 5. **Jerrett, M., et al., 2009.** Long-term ozone exposure and mortality. *New England Journal of Medicine*, 360(11), pp.1085-1095.
 6. **Jung, S.W., et al., 2016.** Association by spatial interpolation between ozone levels and lung function of residents at an industrial complex in South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7), p.728.
 7. **Kermani, M., Jafari, A.J., Gholami, M., Fanaei, F. and Arfaeinia, H., 2020.** Association between meteorological parameter and PM2.5 concentration in Karaj, Iran. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 9(1), p.4.
 8. **Kermani, M., Jonidi Jafari, A., Gholami, M., Arfaeinia, H., Shahsavani, A. and Fanaei, F., 2021.** Characterization, possible sources and health risk assessment of PM2.5-bound Heavy Metals in the most industrial city of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), pp.151-163.
 9. **Kermani, M., Jonidi Jafari, A., Gholami, M., Taghizadeh, F., Masroor, K., Abdolahnejad, A., Shahsavani, A. and Fanaei, F., 2021.** Characterisation of PM2.5-bound PAHs in outdoor air of Karaj megacity: the effect of meteorological factors. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, pp.1-19.
 10. **Lan Landry, J.S., Neilson, E.T., Kurz, W.A. and Percy, K.E., 2013.** The impact of tropospheric ozone on landscape-level merchantable biomass and ecosystem carbon in

Investigation of Temporal and Spatial Trends of Air Pollutants in the City Of Karaj

Azam Shahbeik¹, Rahele Pourmazaheri¹, Ahmad Taheri^{*2}

1- Department of Monitoring and Assessment of Environmental Pollutants/Karaj Municipality, Karaj, Iran

2*- Monitoring Department, Air Quality Control Company (Subsidiary of Tehran Municipality), Tehran, Iran

Abstract

Introduction: One of the significant challenges metropolises faces is air pollution, which has many adverse effects on human health and the environment. Karaj, as an industrial city situated close to the country's major industries and power plants, is severely affected by air pollution from both mobile and stationary sources. The most important study carried out in the field of air pollution in Karaj city can be considered the air pollutant emission inventory of this city, which is stated for criteria pollutants in two categories of stationary and mobile sources, separately for each source.

Methodology: After upgrading the air quality monitoring stations in this city, the current study can be considered the first comprehensive study of air pollutants in terms of their temporal and spatial trends. This study measured air quality in stations equipped with the analyzers of four gaseous pollutants, including ozone, carbon monoxide, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide, along with two particulate pollutants, including particulates smaller than 2.5 and 10 microns. Furthermore, the city's air quality index, obtained from the total of monitoring stations, was analyzed.

Results: The study finds that particulate matter smaller than 2.5 microns and ozone are the main pollutants in Karaj in hot and cold seasons, respectively. The other pollutants exceed the allowable air quality index, rarely. For a period of one-year, particulate matter smaller than 2.5 microns and ozone put the air quality index in the range of unhealthy for sensitive groups and unhealthy for the entire city of Karaj for 94 and 18 days, respectively. Also, this study investigated the pollutant transport effect using the combination of pollutant concentration data, wind speed, and direction. The dominant directions of pollutant transport to that station were determined for each air quality monitoring station. Based on the results of the present study, for PM_{2.5}, as the most critical air pollutant in the city of Karaj, it can be found that the highest concentration and therefore, the most days with the index in the unhealthy range for PM_{2.5} has been registered in Metro and Zone 3 stations, in the cold seasons of the year (autumn and winter), respectively.

Discussion: By examining the location of these two stations, they can be evaluated as traffic stations. Since the Metro station is located in the Karaj metro area, it is not only affected by

the pollution caused by the transport fleet on the routes adjacent to the station (the most important of which is the Karaj-Qarvin freeway), but also the traffic and stops of buses and taxi fleets, which can cause the emission of suspended particles in that area. On the other hand, the station of zone 3 is located at a very short distance from Eram Boulevard, which is strongly affected by the pollutants emitted by the transport fleet on this route. Due to the secondary nature of Karaj's main pollutants, such as ozone in the warm season and a high portion of suspended particles smaller than 2.5 microns in the cold season, it is necessary to reduce air pollution through modeling that incorporates photochemical reactions in the atmosphere.

Keywords: Air Pollution, PM_{2.5}, Ozone, Karaj