

مجله مخاطرات محیط طبیعی، سال پنجم، شماره هفتم، بهار ۹۵

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۱/۳۱

صفحات: ۱-۱۲

ارزیابی آلاینده ذرات معلق در هوای محیط و مطالعه آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در آن (مطالعه موردی)

دکتر فرح سادات هالک*^۱، علی کاوسی رحیم^۲، محبوبه بنی فاطمی^۳

چکیده

در این تحقیق، ابتدا غلظت ذرات معلق در هوای محیط در محل سایت انرژی‌های تجدیدپذیر پژوهشگاه مواد و انرژی واقع در شهر مشکین‌دشت استان البرز در دو محدوده PM_{10} و $PM_{2.5}$ نمونه‌برداری و اندازه‌گیری شد. سپس ذرات نمونه‌برداری شده، استخراج شدند و به کمک دستگاه کروماتوگرافی یونی غلظت شش آنیون شامل: فلوراید، کلراید، بروماید، نیتریت، نیترات و سولفات و شش کاتیون شامل: لیتیم، سدیم، آمونیوم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم بر روی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشانگر غلظت نسبی بالای دو آنیون سولفات و نیترات در هر دو طبقه ذرات PM_{10} و $PM_{2.5}$ بوده است. کاتیون کلسیم در ذرات PM_{10} دارای بالاترین غلظت و کاتیون آمونیوم در ذرات $PM_{2.5}$ دارای بالاترین غلظت مشاهده شدند. همچنین، بنابر نتایج به‌دست آمده، حضور یون‌ها (اعم از آنیون‌ها و کاتیون‌ها) در ذرات $PM_{2.5}$ به‌طور نسبی دو برابر حضور آنها در ذرات PM_{10} دیده شد که تأکیدی بر خطرات بهداشتی بالای ذرات ریزتر می‌باشد.

کلید واژه‌ها: آلاینده‌های هوا، ذرات معلق، آنیون، کاتیون، PM_{10} ، $PM_{2.5}$.

مقدمه

مشکلات زیست‌محیطی که امروزه به عنوان یک معضل مهم در جامعه بشری مطرح است، ره‌آورد توسعه شهرها، صنعتی شدن و پیشرفت روز افزون تکنولوژی می‌باشد. با این شتابی که انسان در بهره‌گیری از منابع طبیعی گرفته‌است و برای رسیدن به آن از هیچ تخلفی روی‌گردان نیست، جهان با مشکلات اساسی زیست‌محیطی روبه‌رو خواهد شد. سالانه هزاران تن آلاینده، دود و گرد و غبار در فضای شهری پراکنده و هوای تنفسی شهروندان را آلوده می‌سازند. کیفیت نامطلوب هوای تنفسی در شهرهای صنعتی و کلان‌شهرها عمدتاً ناشی از وسایل نقلیه عمومی و درصد کمتری از آن ناشی از کارخانجات و واحدهای صنعتی می‌باشد (Kappos et al., 2004; Halek et al., 2004; Minsi et al., 2007).

اساساً ذرات معلق به دو طریق: (۱) از تجزیه و از هم پاشیدگی تکه‌های بزرگ مواد و یا (۲) از تراکم و تجمع ذرات کوچک‌تر شامل مولکول تشکیل می‌شوند. در طی عمل تجزیه و از هم‌پاشی نمک‌های دریایی، آئروسول‌ها به وجود می‌آیند و ذرات معلق اتمسفری با بیشترین کمیت شکل می‌گیرند (بیش از دو برابر هر ماده منفرد دیگر). با تخمین می‌توان گفت که سالانه حدود ۱۰۰۰ میلیون تن از این آئروسول‌ها وارد اتمسفر می‌گردند (Minsi et al., 2007). ذرات معلق که بدین طریق وارد اتمسفر می‌شوند، خواه از منابع طبیعی یا منابع انسانی تشکیل شده باشند، به عنوان ذرات معلق اصلی نامیده می‌شوند. گرد و غبار حاصل شده از وزش باد یکی از این سه عاملی است که سهم مهمی در تشکیل ذرات معلق آلاینده دارد. برخی از مواد گازی که به صورت طبیعی آزاد می‌شوند، در اتمسفر واکنش داده تا ذرات معلق ثانویه را تشکیل دهند.

تمامی ذرات معلق موجود در اتمسفر بر روی زمین ته‌نشین می‌شوند. دو فرایند مهار (Scavenging) ته‌نشینی خشک و رسوبی شدن رطوبتی موجب این عمل می‌شوند. ته‌نشینی یا تراکم هنگامی رخ می‌دهد که ذرات معلق ناشی از وزش باد به مانعی برخورد کرده و ته‌نشین شوند. در طی عمل انتشار نیز ذرات به مانع و سطوح برخورد کرده و یا به سطوح مهاجرت کرده و در همان جا باقی می‌مانند. به‌طور تقریبی می‌توان گفت که حدود ۲۰ درصد پایش ذرات معلق اتمسفری طی فرایند ته‌نشینی خشک انجام می‌گیرد (Alam et al., 2003; Jung et al., 2013).

جدول ۱، سرعت ته‌نشین شدن ذرات معلق در ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. فرآیندهای پایش و رسوبی شدن به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱. پایش به کمک باران.

۲. شسته شدن.

خروج بارانی فرآیندی است که در آن ذرات به عنوان مراکز و محل‌های تجمع در ابرها عمل می‌کنند که در آنجا آب سرد شده یا طی عملی به شکل یخ درمی‌آید.

جدول ۱: سرعت ته‌نشینی ذرات در هوا (Gramotnev and Ristovski, 2004)

سرعت			قطر
cm/sec	in/hr	ft/min	μm (میکرون)
۰/۰۰۰۰۸۱	۰/۱۱۵	۰/۰۰۰۱۶	۰/۱
۰/۰۰۰۰۶۶	۰/۹۳۶	۰/۰۰۱۳	۰/۴
۰/۰۰۰۰۳۶	۵/۰۴	۰/۰۰۰۷	۱
۰/۰۰۰۰۴۸	۶۸/۴	۰/۰۰۹۵	۴
۰/۰۰۰۰۳	۴۲۵	۰/۰۰۵۹	۱۰
۴/۸	۶۸۴۰	۹/۵	۴۰
۳۰	۴۲۶۰۰	۵۹/۲	۱۰۰
۲۵۳	۳۶۰۰۰۰	۴۹۸	۴۰۰

در فرآیندهای شسته شدن نیز در اثر ریزش باران و یا برف، ذرات موجود در اتمسفر را جمع‌آوری کرده و به سطح زمین منتقل می‌نمایند. لازم به ذکر است که این فرایند بیشتر در تحرک و جابه‌جایی ذرات بزرگ‌تر از ۱ میکرون مؤثر می‌باشد. ذرات کوچک‌تر در اثر جابه‌جایی توده‌ای از هوا از سر راه ذرات برف برداشته می‌شوند. هرچند که فرایندهای خروج بارانی تحرک و جابه‌جایی ذرات کوچک‌تر را سرعت می‌بخشد. اتمسفر زمین از دیرباز به عنوان بزرگ‌ترین مخزن جهت رهاسازی آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی و فرایندهای طبیعی به شمار رفته است. این آلاینده‌ها عمدتاً به صورت ذرات معلق و گاز بوده‌اند (Jung et al., 2013).

قانون دوم نیوتن، حرکت ذره را تحت اثر جاذبه و نیروهای دیگر به شکل زیر (رابطه ۱) بیان می‌کند:
رابطه ۱:

$$m \frac{du}{dt} - mg = m'g - F$$

که در آن:

$m =$ جرم ذره (kg).

$m' =$ جرم سیال جا به جا شده توسط ذره (kg).

$\frac{du}{dt} =$ شتاب ذره (m/sec^2).

$g =$ شتاب جاذبه (m/sec^2).

$F =$ نیروی مقاوم در برابر حرکت ذره (نیوتن).

اگر ذره، کروی شکل باشد و تنها نیروی مقاوم در برابر آن اصطکاک هوا باشد، حرکت ذره با قانون استوک به شکل رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$F = 3\pi \mu u d$$

رابطه ۲:

که در آن:

$$\mu = \text{لزجت دینامیکی سیال (kg/m. sec)}$$

$$U = \text{سرعت ذره (m/s)}$$

$$d = \text{قطر ذره (متر)}$$

حال اگر m و m' طبق روابط ۳ و ۴ به صورت توابعی از حجم و جرم حجمی بیان شود، (p, p_0) به ترتیب جرم حجمی ذره سیال بر حسب kg/m^3 می‌باشد.

رابطه ۳:

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \rho$$

رابطه ۴:

$$m' = \frac{\pi d^3}{6} \rho_0$$

در این صورت، قانون دوم نیوتن درباره حرکت ذرات معلق (کروی شکل) در اثر جاذبه زمین به صورت رابطه ۵ در خواهد آمد:

رابطه ۵:

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho \frac{du}{dt} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho - \rho_0) g - 3\pi \mu u d$$

ذرات معلق در غلظت‌های بالا ممکن است تعداد مرگ و میر روزانه ساکن شهرها، به‌ویژه افراد مسن که دارای بیماری ریوی هستند را، افزایش دهد. هرچه اندازه ذرات معلق ریزتر باشد، اثرات سوء بهداشتی آنها نیز بیشتر می‌شود؛ چرا که ذرات درشت‌تر، اغلب در ورودی سیستم تنفسی گرفته شده و از نفوذ آنها به سیستم تنفسی جلوگیری می‌شود. ذرات با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر (با نام PM_{10}) وارد سیستم تنفسی انسان شده و موجب ناراحتی‌های تنفسی می‌شود؛ ذرات معلق با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۲/۵ میکرومتر (با نام عمومی $\text{PM}_{2.5}$) به اعماق ریه نفوذ کرده و مخاطرات بهداشتی جدی برای انسان به‌وجود می‌آورد (Pascal et al., 2014; Pui et al., 2014). تاکنون تحقیقات قابل توجهی درباره اثرات نامطلوب بهداشتی آلاینده‌های هوا در سطح دنیا انجام شده است. اثرات سوء بهداشتی آلاینده‌ها و هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و روانی که از این طریق بر جامعه تحمیل می‌شود قابل تأمل است. بنابراین با در نظر گرفتن اثرات متعدد هر یک از آلاینده‌ها بر روی سلامتی انسان از قبیل کاهش بهره‌رسانی، هوشی، کندذهنی، ضایعات کبدی، تنگی نفس، آمفیزم و غیره، لزوم توجه بیشتر بر روی میزان غلظت انواع آلاینده‌های هوا در سطح شهر و شناسایی منابع انتشار هر یک از آلاینده‌ها به منظور اتخاذ سیاست‌های پیشگیرانه از اهمیت خاصی برخوردار است (Zheng et al., 1997; Pope III et al., 2002; Anthony et al., 2007; Boldo et al., 2011).

امروزه کلان‌شهر کرج، مرکز استان البرز، یکی از شهرهای آلوده کشور تلقی شده که کارهای تحقیقی چندانی درباره وضعیت آلودگی هوا در آن انجام نشده است (هالک و کاوسی‌رحیم، ۱۳۹۱). مسائل زیست محیطی، توجه به ترافیک وسایل نقلیه و جای‌گزینی انرژی‌های فسیلی از اولویت‌های توسعه پایدار شهری در کرج می‌باشد (فیروزبخت و همکاران، ۱۳۹۱). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون درباره وضعیت آلودگی هوا در شهر مشکین‌دشت که یکی از شهرهای استان البرز می‌باشد، منبعی منتشر نشده است.

از آنجا که سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌ها در محیط‌های شهری تاکنون انجام نشده است، در شرایط فعلی، اجرای پروژه‌های در این رابطه می‌تواند به عنوان یک ابزار در خدمت برآورد وضعیت کیفی هوای شهر از نظر یون‌ها باشد. بدین منظور در این پروژه اقدام به اندازه‌گیری آنیون‌ها و کاتیون‌ها در ذرات معلق آلاینده (ذرات کوچکتر از ۲/۵ و ذرات ۲/۵ تا ۱۰ میکرومتر) در سایت انرژی‌های تجدیدپذیر در پژوهشگاه مواد و انرژی به عنوان پایلوت، گردیده است. هدف از انجام این مطالعه این است که ضمن اندازه‌گیری آلاینده ذرات که از آلاینده‌های اصلی هوای شهرها است، آنیون‌ها و کاتیون‌های همراه این ذرات مورد شناسایی و سنجش قرار گیرند. آنالیز این یون‌ها با استفاده از روش آیون کروماتوگرافی (IC) انجام پذیرفته است که در بخش تجربی به تفصیل خواهد آمد.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر ابتدا غلظت آلاینده ذرات معلق در دو طبقه PM_{10} (ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر) و $PM_{2.5}$ (ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر) در محل سایت خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی در شهر مشکین‌دشت (استان البرز) در نیمه دوم سال ۱۳۹۲ مورد نمونه‌برداری و سنجش قرار گرفت. سپس نمونه‌های ذرات گرفته، استخراج و به کمک دستگاه کروماتوگرافی یونی مورد آنالیز قرار گرفته‌اند و ۶ آنیون شامل: فلوراید، کلراید، بروماید، نیتريت، نیترات و سولفات و ۶ کاتیون شامل: لیتیم، سدیم، آمونیوم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در آنها اندازه‌گیری شد.

برنامه نمونه‌برداری

در این پژوهش، نمونه‌برداری از ذرات معلق در دو طبقه PM_{10} و $PM_{2.5}$ انجام گردید. به‌طور متناوب، یک نوبت PM_{10} و یک نوبت $PM_{2.5}$ نمونه‌برداری شد. به این ترتیب مجموعاً ۳۶ نمونه‌برداری و هر کدام به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. به‌طور متوسط و منظم هر پنج روز یک نمونه‌برداری انجام شد تا همه روزهای هفته (شامل روزهای تعطیل و جمعه) پوشش داده شود. از آنجا که هدف اصلی در این پروژه سنجش یون‌های محلول در آب بود، سعی شد نمونه‌برداری در روزهای بارانی و برفی انجام نگیرد تا غلظت واقعی یون‌های مورد نظر در هوا نشان داده شود.

محل نمونه برداری

نمونه برداری از آلاینده ذرات معلق (در دو محدوده PM_{10} و $PM_{2.5}$) در سایت خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی واقع در حاشیه شمالی-شرقی شهر مشکین دشت در استان البرز انجام شد. مشکین دشت با جمعیتی بالغ بر ۷۰ هزار نفر در ۸ کیلومتری جنوب کرج واقع شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۲۵۰ متر است (شعبانی، ۱۳۸۴). شهر در دشت و موقعیتی هموار قرار گرفته و از عوامل طبیعی مانند کوه به دور است. بادهای غالب در آن عمدتاً از جهت جنوب غربی می‌وزد. شایان ذکر است که شهر مشکین دشت از منابع ساکن آلاینده مانند انواع کارخانجات یا نیروگاه‌ها تقریباً بی‌تأثیر است و می‌توان گفت که غلظت آلاینده‌ها در آن عمدتاً ناشی از فعالیت منابع متحرک (وسایل نقلیه) می‌باشد. دستگاه نمونه بردار در محوطه سایت خورشیدی پژوهشگاه و در فاصله ۱۰ متری از کناره خیابان که محور اصلی شهر و محل تردد خودروها می‌باشد، مستقر گردید به گونه‌ای که نمونه برداری در ارتفاع ۱۷۰ سانتی متری از سطح زمین (به عنوان میانگین ارتفاع تنفسی ساکنین شهر) انجام شد.

اگرچه ایستگاه نمونه برداری در حاشیه شمالی-شرقی مشکین دشت و خارج از مرکز شهر واقع شده است، لکن با توجه به این که جهت بادهای غالب در منطقه مورد مطالعه از سمت جنوب غربی می‌باشد، می‌توان غلظت آلاینده‌های به دست آمده در این پژوهش را نشان دهنده میزان آلاینده‌های مورد نظر در هوای شهر مشکین دشت تلقی کرد.

ثبت شرایط آب و هوایی

عوامل طبیعی، جغرافیایی و هواشناسی به‌ویژه سرعت و جهت باد در نحوه پراکنش آلاینده‌ها به‌ویژه ذرات معلق در هوا تأثیر اساسی دارند (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱؛ Ghanbari and Azizi, 2009). به این منظور، از اطلاعات مربوط به جهت و سرعت باد که در «سامانه انرژی‌سنجی» سایت انرژی خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی ثبت می‌شود، در این پروژه استفاده شد. شایان ذکر است که به‌طور میانگین سرعت وزش باد در روزهای نمونه برداری ۴/۸۷ متر بر ثانیه و جهت وزش آن عمدتاً از جهت جنوب غربی بوده است. در روزهای نمونه برداری مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین دما و نیز فشار هوا توسط دستگاه نمونه برداری ذرات (PQ-200) ثبت شده است.

مواد و تجهیزات مورد استفاده

- دستگاه نمونه برداری ذرات مدل PQ-200؛ این دستگاه قابل برنامه‌ریزی بوده و قادر است در هر برنامه نمونه برداری، ذرات معلق را در یکی از سه طبقه PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و کل ذرات (TSPTotal Suspended Particulate) اندازه‌گیری کند. در این پروژه به‌طور متناوب دو طبقه PM_{10} و $PM_{2.5}$ نمونه برداری شد.
- فیلترهای مخصوص دستگاه PQ-200 از نوع PTFE با قطر ۴۷ میلی متر ساخت شرکت SKC.
- دستگاه اولتراسونیک مدل Unident Geneve (Micro10Sonic) با توان ۱۸۰ وات برای استخراج یونها از فاز ذرات به کار گرفته شد.

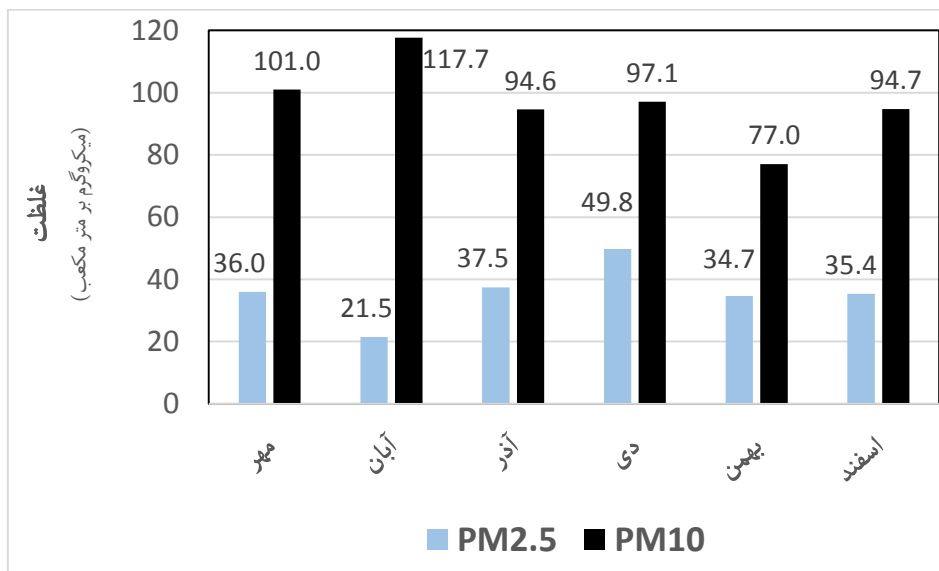
- سیستم کروماتوگرافی یونی (IC): دستگاه کروماتوگرافی یونی مدل 881 Compact IC Pro دارای دتکتور از نوع هدایت سنجی (Conductivity) برای شناسایی و تعیین غلظت آنیونها و کاتیونها مورد استفاده قرار گرفت. برای آنالیز آنیونها ستون کروماتوگرافی از نوع Metrosep Asupp 15 و برای کاتیونها ستون کروماتوگرافی از نوع Metrosep C4 250 بر روی سیستم کروماتوگرافی نصب گردید.

نمونه برداری و آنالیز نمونه‌ها

چنان که ذکر شد، ابتدا ذرات معلق در هوای شهر در بازه‌های زمانی ۲۴ ساعته به کمک دستگاه PQ-200 و بر روی فیلترهای PTFE جمع‌آوری شد و با توجه به حجم هوای نمونه‌برداری شده، غلظت ذرات معلق در هوا تعیین گردید. سپس جهت استخراج و مطالعه یون‌های حاضر در فاز ذرات، چنان که معمول است (Fosco and Schmeling, 2007; Galindo et al., 2011; Arias et al., 2013)، از حلال آب مقطر و امواج اولتراسون استفاده شد. برای آنالیز یون‌ها نمونه‌ها به دستگاه کروماتوگرافی یونی تزریق شدند. در دستگاه کروماتوگرافی یونی از هر نمونه ۲۰ میکرولیتر برای اندازه‌گیری آنیون‌ها و ۲۰ میکرولیتر برای اندازه‌گیری کاتیون‌ها به‌طور جداگانه تزریق شد. شایان ذکر است که در ابتدای فاز عملی پروژه، برای اطمینان از کارایی روش استخراج یون‌ها با استفاده از اولتراسون، یک فیلتر که یون‌های آن استخراج شده بود، مورد استخراج دوباره قرار گرفت. به عبارت دیگر، مجدداً این فیلتر در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۱۸ دقیقه اولتراسون شد و محلول به‌دست آمده به سیستم کروماتوگرافی یونی تزریق شد که هیچ یک از یون‌های مورد نظر در آن مشاهده نشدند و بدین ترتیب از کارایی روش استخراج یون‌ها اطمینان حاصل شد. علاوه بر آن یک فیلتر خام (شاهد) به روشی مشابه نمونه‌ها مورد استخراج قرار گرفت و محلول حاصل در سیستم کروماتوگرافی یونی به عنوان شاهد (بلانک) استفاده شد.

نتایج و بحث

در بخش عملی این پژوهش، ابتدا غلظت آلاینده ذرات معلق در دو گروه PM_{10} و $PM_{2.5}$ مورد نمونه‌برداری و آنالیز قرار گرفت. در شکل ۱، میانگین غلظت ذرات معلق با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۲٫۵ میکرومتر ($PM_{2.5}$) و ذرات معلق با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM_{10}) به تفکیک ماه نشان داده شده است.

شکل ۱: میانگین ماهیانه غلظت ذرات معلق به تفکیک PM_{2.5} و PM₁₀

با توجه به شکل فوق، میانگین ماهیانه غلظت PM_{2.5} در ماه دی دارای بالاترین مقدار ($49.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) است. همچنین غلظت PM₁₀ در آبان ماه، دارای بالاترین مقدار ($117.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) می باشد. شایان ذکر است که بر اساس استاندارد اعلام شده از طرف سازمان (National Institute for Occupational Safety and Health) NIOSH، حد مجاز سالانه ذرات PM₁₀ برابر $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و حد مجاز سالانه ذرات PM_{2.5} معادل $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ تعیین شده است. با توجه به شکل ۱، ملاحظه می شود که متأسفانه هم میانگین غلظت ذرات PM₁₀ و هم میانگین غلظت ذرات PM_{2.5} بیشتر از حد استاندارد مذکور است.

پس از محاسبات مربوط به غلظت ذرات معلق، آنالیز ذرات توسط دستگاه کروماتوگرافی یونی انجام شد. میانگین نتایج حاصل از آنالیز کاتیون‌ها در جدول ۲ و میانگین نتایج حاصل از آنالیز آنیون‌ها در جدول ۳ دیده می‌شود. چنان که در جداول مذکور ملاحظه می‌شود، کاتیون لیتیم (Li^+) و آنیون نیتريت (NO_2^-) در نمونه‌ها مشاهده نشدند.

جدول ۲: میانگین غلظت کاتیون‌ها در هوا

غلظت (میکروگرم در مترمکعب هوا)		کاتیون
ذرات PM ₁₀	ذرات PM _{2.5}	
----	----	لیتیم (Li^+)
۱/۱۰	۰/۵۳	سدیم (Na^+)
۲/۲۷	۲/۹۹	آمونیم (NH_4^+)
۰/۴۰	۰/۲۷	پتاسیم (K^+)
۵/۲۶	۰/۵۴	کلسیم (Ca^{2+})
۰/۳۰	۰/۰۴	منیزیم (Mg^{2+})

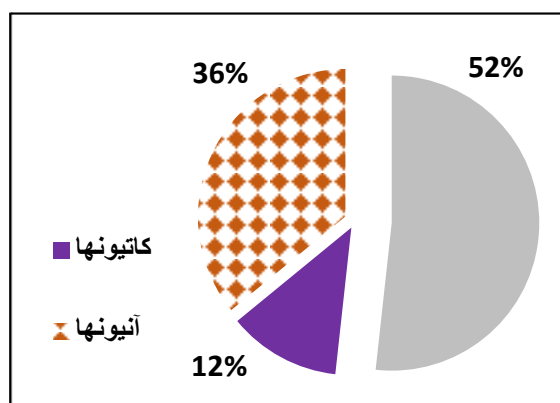
از بین کاتیون‌ها در ذرات $PM_{2.5}$ یون آمونیوم و در ذرات PM_{10} یون کلسیم بیشترین مقدار میانگین را دارند. کمترین غلظت مشاهده شده در هر دو گروه ذرات مربوط به کاتیون منیزیم می‌باشد.

جدول ۳: میانگین غلظت آنیون‌ها در هوا

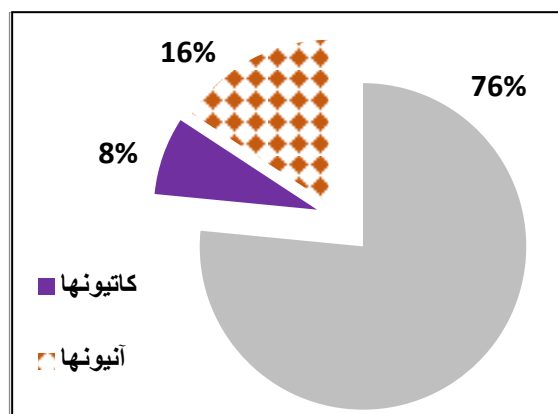
غلظت (میکروگرم در مترمکعب هوا)		آن‌یون
ذرات PM_{10}	ذرات $PM_{2.5}$	
۰/۱۵	۰/۰۹	فلوراید (F^-)
۱/۴۴	۰/۸۷	کلراید (Cl^-)
۰/۱۵	۰/۱۴	بروماید (Br^-)
----	----	نیتريت (NO_2^-)
۶/۴۴	۴/۷۸	نیتترات (NO_3^-)
۷/۰۶	۵/۸۹	سولفات (SO_4^{2-})

چنان که در جدول ۳ آمده است، از بین آنیون‌ها در دو طبقه ذرات، بیشترین مقادیر به ترتیب متعلق به یون‌های سولفات و نیتترات هستند. همچنین در هر دو گروه ذرات مورد مطالعه، آنیون‌های فلوراید و بروماید حایز کمترین مقدار میانگین می‌باشند.

چنان که ذکر شد، شهر مشکین‌دشت از منابع ساکن آلاینده (صنایع و ...)، تقریباً به دور است و تنها منبع مهم آلاینده در این شهر، وسایل نقلیه هستند. از طرفی ایستگاه نمونه‌برداری در قسمت شمال شرقی شهر واقع شده است و بنابر اطلاعاتی که از جهت وزش بادهای در روزهای نمونه‌برداری ثبت شد، جهت اصلی وزش بادهای از جنوب غربی به شمال شرقی بوده است. بنابراین می‌توان گفت که وسایل نقلیه موتوری بیشترین تأثیر را بر غلظت آلاینده ذرات و یون‌های موجود در آنها در ایستگاه نمونه‌برداری داشته است.



شکل ۲: درصد حضور کاتیون‌ها و آنیون‌ها در ترکیب ذرات $PM_{2.5}$



شکل ۳: درصد حضور کاتیون‌ها و آنیون‌ها در ترکیب ذرات PM_{10}

در شکل ۲، درصد مواد تشکیل‌دهنده ذرات $PM_{2.5}$ نشان داده شده است و در شکل ۳ درصد مواد تشکیل‌دهنده PM_{10} آورده شده است. مشاهده می‌شود که ذرات $PM_{2.5}$ به‌طور میانگین متشکل از ۳۶ درصد کاتیون‌ها، ۱۲ درصد آنیون‌ها و ۵۲ درصد سایر آلاینده تشکیل یافته است. به همین ترتیب، ذرات PM_{10} متشکل از ۱۶ درصد آنیون‌ها، ۸ درصد کاتیون‌ها و ۷۶ درصد سایر آلاینده‌ها می‌باشد.

با مقایسه دو شکل فوق می‌توان دریافت که در ذرات ریزتر $PM_{2.5}$ مجموع یون‌ها (شامل آنیون‌ها و کاتیون‌ها) ۴۸ درصد از اجزای تشکیل‌دهنده ذرات ریزتر $PM_{2.5}$ را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که مجموع یون‌ها در ساختار ذرات PM_{10} فقط ۲۴ درصد است. این نتیجه همسو با نتایج تحقیقات قبلی است مبنی بر اینکه ذرات معلق ریزتر، به طور نسبی دارای اجزای آلاینده بیشتر و به مراتب برای دستگاه تنفسی انسان، منشاء آسیب بیشتری هستند (Bernstein et al., 2008; Zheng et al., 1997).

نتیجه‌گیری

مسئله آلودگی هوا یکی از معضلات اصلی برای ساکنین شهرهای بزرگ و صنعتی به شمار می‌رود و آلاینده ذرات معلق به عنوان یک آلاینده اصلی که عمدتاً از وسایط نقلیه ناشی می‌شود، تقریباً در هوای تنفسی همه محیط‌های شهری حضور دارد. ذرات معلق در هوا، توانایی حمل سایر آلاینده‌ها را نیز دارند که این مسئله بر مخاطرات بهداشتی آنها می‌افزاید.

در این پژوهش، ضمن اندازه‌گیری غلظت آلاینده ذرات معلق در دو طبقه PM_{10} و $PM_{2.5}$ ، غلظت شش آنیون و شش کاتیون موجود در فاز ذرات معلق در یک دوره شش ماهه در نیمه دوم سال ۱۳۹۲ سنجش و ارزیابی قرار گرفت. از بین یون‌های مورد مطالعه، آنیون‌های سولفات و نیترات در هر دو طبقه ذرات (PM_{10} و $PM_{2.5}$) دارای غلظت بالاتری نسبت به سایر آنیون‌ها بودند. همچنین کاتیون آمونیوم در ذرات ریز ($PM_{2.5}$) و کاتیون کلسیم در ذرات درشت‌تر (PM_{10}) حضور نسبی بیشتری دارد. طبق نتایج به‌دست آمده، به‌طور میانگین ۴۸ درصد از وزن ذرات $PM_{2.5}$ را یون‌ها تشکیل می‌دهند در حالی که درباره ذرات PM_{10} این مقدار تنها ۲۴ درصد است. به عبارت دیگر،

همچنان که تحقیقات انجام شده قبلی نشان داده‌اند، به‌طور نسبی ذرات ریزتر حاوی اجزای آلاینده بیشتری هستند. مخاطرات محیطی ذرات معلق صرفاً در مخاطرات بهداشتی آنها خلاصه نمی‌شود. افزایش غلظت ذرات معلق در هوا باعث افزایش جذب انرژی خورشید در اتمسفر و گرم شدن هوای محیط می‌شود که در مقیاس کلان، گرمایش زمین و تغییرات اقلیم را در پی خواهد داشت.

منابع

- شعبانی، حبیب (۱۳۸۴). "فرایند شکل‌گیری شهرهای خودرو پیرامون کرج با استفاده از GIS (نمونه موردی شهر مشکین‌دشت کرج)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم، تهران.
- شمسی‌پور، علی اکبر؛ نجیب‌زاده، فهیمه و حسین‌پور، زینب (۱۳۹۱). "شبیه‌سازی الگوی پراکنش آلودگی هوای کلان‌شهر تهران در شرایط وزش باد"، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، شماره ۴، صص ۱۹-۳۶.
- فیروزبخت، علی؛ پرهیزکار، اکبر و ربیعی‌فر، ولی‌الله (۱۳۹۱). "راهبردهای ساختار زیست‌محیطی شهر با رویکرد توسعه پایدار شهری (مطالعه موردی: شهر کرج)"، *پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، شماره ۸۰، صص ۲۱۳-۲۳۹.
- هالک، فرح سادات و کاوسی رحیم، علی (۱۳۹۱). "پروفیل عمودی آلاینده ذرات معلق در محیط شهری کرج در استان البرز"، اولین همایش ملی آلودگی هوا و صدا، تهران.
- Alam A., Shi J.P., Harrison R.M. (2003) "Observations of new particle formation in urban air", *Journal of Geophysical Research*, 108, 4093-4107.
- Anthony L., Barry S., Anthony B., Hugo Z. (2007) "Reducing the healthcare costs of urban air pollution: The South Africa experience", *Journal of Environmental Management*, 84, 27-37.
- Arias A., Bettencourt da Silva R.J.N., Camoes M.F., Oliveira C. (2013) "Evaluation of the performance of the determination of anions in the water soluble fraction of atmospheric aerosols", *Talanta*, 104, 10-16.
- Bernstein A.J., Alexis N., Bacchus H., Bernstein I.L., Fritz P., Horner E., Li N., Mason S., Nel A., Oullette J., Reijula K., Reponen T., Seltzer J., Smith A., Tarlo S.M. (2008) "The health effects of nonindustrial indoor air pollution", *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121, 585-591.
- Boldo E., Linares C., Lumbreras J., Borge R., Narros A., Garcia-Perez J., Fernandez-Navarro P., Perez-Gomez B., Aragonés N., Ramis R., Pollan M., Moreno T., Karanasiou A., Lopez A. G. (2011) "Health impact assessment of a reduction of ambient PM_{2.5} levels in Spain", *Environmental International*, 37, 342-348.
- Fosco T., Schmeling M. (2007) "Determination of water-soluble atmospheric aerosols using ion chromatography", *Environmental Monitoring and Assessment*, 130, 187-199.
- Galindo N., Yubero E., Nicolas J.F., Crespo J., Pastor C., Carratala A., Santacatalina M., (2011) "Water-soluble ions measured in fine particulate matter next to cement works", *Atmospheric Environment*, 45, 2043-2049.
- Ghanbari H.A., Azizi Gh. (2009) "Numerical simulation of air pollution in Tehran based on wind patterns", *Journal of Physical Geography Research*, 68, 15-32.
- Gramotnev G., Ristovski Z. (2004) Experimental investigation of ultrafine particle size distribution near a busy road. *Atmospheric Environment*, 38, 1767-1777.

- Halek F., Kavousi A., Montahaie H. (2004) "Role of motor-vehicles and trend of air borne particulate in the great Tehran area, Iran", *International Journal of Environmental Health Research*, 14, 301-307.
- Jung Ch. H., Um J., Shin Y. H., Bae S. Y., Kim Y. P. (2013) "Optical properties of polydispersed atmospheric aerosols following wet removal", *Particulate Science and Technology*, 31, 612-620.
- Kappos A.D., Bruckmann P., Eikmann T., Englert N., Heinrich U., Hppe P., Koch E., Krause G.H.M., Kreyling W.G., Rauchfuss K., Rombout P., Schulz-Klemp V., Thiel W.R., Wichmann H.E. (2004) "Health effects of particles in ambient air", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 207, 399-407.
- Minsi Z., Yu S., Xuhui C. (2007) "A health-based assessment of particulate air pollution in urban areas of Beijing in 2000-2004", *The Science of the Total Environment*, 376, 100-108.
- Pascal M., Falq G., Wagner V., Chatignoux E., Corso M., Blanchard M., Host S., Pascal L., Larrieu S. (2014) "Short-term impacts of particulate matter (PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5}) on mortality in nine French cities", *Atmospheric Environment*, 95, 175-184.
- Pope III C.A., Burnett R.T., Thun M.J., Calle E.E., Krewski D., Ito K., Thurston G.D., (2002) "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution", *Journal of the American Medical Association*, 287, 1132-1141.
- Pui D.Y.H., Chen Sh.Ch., Zuo Zh. (2014) "PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation", *Particuology*, 13, 1-26.
- Zheng J., Ma H., Chan Ch. K., Cheng L. (1997) "Particulate matter exposures to commuters in Hong Kong", *Particulate Science and Technology*, 15, 341-360.