

ارزیابی خطر بهداشتی فلزات در غبار خیابانی شهر کرج در سال ۱۳۹۷

رخساره عظیمی یانچشمه^{۱*}، مظاهر معین الدینی^۲، سهراب مظلومی^۳، سادات فیض نیا^۴، رضا شهبازی^۵

^۱ دکترای تخصصی علوم محیط زیست، کارشناس آلودگی‌های محیط زیست سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران،

^۲ دکترای تخصصی علوم محیط زیست، دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ دکترای تخصصی علوم محیط زیست، کارشناس اکوسیستم‌های ساحلی سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

^۴ دکترای تخصصی زمین شناسی، استاد بازنشسته، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۵ دکترای تخصصی منابع طبیعی، محقق سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰

چکیده

زمینه و هدف: در طی دو دهه گذشته، آلودگی هوا به مسئله جدی تبدیل شده است که منجر به انواع پیامدهای بهداشتی مضر شده است. غبار خیابانی ترکیب پیچیده‌ای از آلاینده‌های منابع مختلف است که می‌تواند به عنوان شاخص مناسبی از کیفیت هوای محیط شهری باشد. از این رو، این مطالعه با هدف ارزیابی خطر بهداشتی فلزات سمی همراه با غبار خیابانی و شناسایی منابع انتشار آن‌ها انجام شد.

مواد و روش‌ها: نمونه‌های غبار از سه منطقه پر تردد برداشت و پس از هضم اسیدی عناصر کلسیم، باریم، کروم، مس، منگنز، نیکل، وانادیوم، روی، استرانسیوم، لیتیم، تیتانیوم، سدیم، منیزیم، پتاسیم، آهن و آلومینیوم به روش طیف‌سنجی نشری جفت‌شده القایی (ICP-OES) و عناصر کادمیوم، کبالت، سرب و تنگستن به روش طیف‌سنجی جرمی جفت‌شده القایی (ICP-MS) آنالیز شدند.

یافته‌ها: نتایج اندازه‌گیری عناصر در غبار خیابانی کرج نشان داد که در مقایسه با مقادیر موجود در پوسته زمین، غلظت (mg/kg) فلزات کادمیوم ($\bar{X}=0/9$)، روی ($\bar{X}=479/15$)، مس ($\bar{X}=159/37$) و سرب ($\bar{X}=113/57$) در سطح بسیار بالا و فلزات نیکل ($\bar{X}=69/36$)، کروم ($\bar{X}=93/96$)، کبالت ($\bar{X}=21/06$)، تنگستن ($\bar{X}=5/73$) و کلسیم ($\bar{X}=759/00$) در سطح نسبتاً بالا قرار گرفتند. در مقابل غلظت سایر عناصر (باریم، منگنز، وانادیوم، استرانسیوم، تیتانیوم، لیتیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، آهن و آلومینیوم) در محدوده مقادیر پوسته زمین بودند. تحلیل خوشه‌ای نشان داد عناصر کادمیوم، سرب، روی، مس، نیکل، کروم، کبالت و کلسیم عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی بودند، در حالی که، سایر عناصر مطالعه شده مرتبط با منابع طبیعی بودند. بلع ذرات غبار مسیر اصلی مواجهه با فلزات سمی برای کودکان و بزرگسالان در کرج بود. شاخص خطر (HI) کمتر از سطح ایمن ($1 <$) برای کودکان و بزرگسالان اما با مقادیر بیشتر برای کودکان بود. در میان فلزات مطالعه شده، کبالت، کروم و کادمیوم بیشترین خطر سرطان‌زایی را داشتند. **نتیجه‌گیری:** نتایج این مطالعه نشان داد غبار خیابانی کرج به شدت آلوده به فلزات سمی است که تماس بلندمدت با آن می‌تواند باعث بروز آثار مضر به‌ویژه برای کودکان شود. بنابراین پایش مداوم آلاینده‌های فلزی (به‌ویژه کبالت، کروم و کادمیوم) توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: فلزات، خطر بهداشتی، غبار خیابانی، کرج

مقدمه

همگام با توسعه سریع اقتصادی، صنعتی سازی و شهرنشینی در طی دهه های اخیر، آلودگی هوا به مسئله جدی در هر دو جنبه اقتصادی و محیط زیستی در جهان تبدیل شده است که بخش جدایی ناپذیر از سبک زندگی مدرن است. مطالعات اپیدمیولوژیکی ارتباط بالقوه ای بین تماس کوتاه و بلندمدت با آلاینده های هوا و افزایش مرگ و میر، بیماری و پذیرش های بیمارستانی نشان داده اند.^۱ بر طبق آمار موجود، سالانه حدود ۴/۳ میلیون نفر در اثر آلودگی هوای داخلی و ۳/۷ میلیون نفر در نتیجه آلودگی هوای محیطی جان خود را از دست می دهند که اغلب آن ها (به ترتیب ۳/۳ و ۲/۶ میلیون نفر) در آسیا زندگی می کنند.^۲ در ایران نیز به عنوان یک کشور در حال توسعه، سطح آلاینده های هوا به تدریج از آغاز صنعتی شدن در دهه ۱۹۷۰ افزایش یافته و در برخی کلان شهرها همچون تهران، کرج، مشهد، تبریز، اصفهان، اهواز و اراک در طی دو دهه گذشته به سطح بسیار زیان آوری رسیده است. از این رو ساماندهی و اصلاح وضع موجود در این کلانشهرها ضروری است. ارزیابی خطرات بهداشتی آلاینده های هوا گام مهمی در تدوین، بازنگری و اصلاح استانداردهای کیفی هوا و وضع قوانین و سیاست های محیط زیستی به منظور حفاظت از سلامت عموم است. آگاهی از منابع انتشار و میزان تجاوز آلاینده ها از حدود تعیین شده به دولت ها کمک می کند تا استراتژی های پیشگیرانه متناسب با وضعیت هر کشور و حتی شهر را برای کاهش آلودگی معرفی نمایند.

غبار خیابانی محیط مناسبی برای تجمع آلاینده های ناشی از منابع متعدد است و از این رو گزینه ارزشمندی جهت شناسایی کیفیت محیط زیست شهری است. از میان اجزای پیچیده غبار خیابانی، عناصر فلزی توجه ویژه ای را به دلیل سمیت، انباشت زیستی و هلدگاری بالا به خود جلب نموده اند. فلزات می توانند به میزان قابل توجهی در غبار

خیابانی انباشت گردند و بسته به شرایط جوی مجدداً به اتمسفر از طریق باد یا ترافیک، به سیستم های آبی توسط رولناب شهری و به محیط خاک از طریق انتقال با باد وارد شوند. انسان ها گیرنده بالقوه آلاینده های همراه با غبار از طریق استنشاق، بلع و جذب پوستی هستند. کودکان در برابر سمیت فلزات به دلیل به دهان بردن اشیاء مختلف و مکیدن دست و انگشتان آسیب پذیرتر هستند که با توجه به بیشترین میزان رشد مغز و بدن در این سنین آسیب مذکور مضاعف می گردد.^{۳، ۴، ۵} زمانی که فلزات وارد بدن می شوند می توانند به آسانی به سیستم گردش خون وارد شوند، در بافت های چرب تجمع یابند و منجر به خطرات بهداشتی شدید از جمله آسیب به سیستم عصبی مرکزی، آثار کلیوی، شکستگی استخوان، صدمه به سیستم ایمنی و کاهش بهره هوشی کودکان شوند.^۶

پتانسیل بالای آلودگی غبار خیابانی با عناصر فلزی توجه محققان زیادی را به خود جلب نموده است. Dehghani و همکاران (۲۰۱۷) خطرات بهداشتی فلزات سمی موجود در غبار و خاک سطحی تهران را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه بلع مهم ترین مسیر انتقال برای اغلب فلزات سنگین در کودکان و تماس پوستی مسیر اصلی برای فلزات کروم، کادمیوم و آنتیموان در بزرگسالان گزارش شد. همچنین آن ها سرب را به عنوان عنصر مخاطره آمیز در غبار خیابانی و خاک سطحی معرفی نمودند. در مطالعه انجام شده در مشهد، بیشترین خطر برای عناصر سرب و جیوه و کمترین خطر برای کادمیوم گزارش شد.^۷ Ghanavati (۲۰۱۸) با بررسی منابع و خطر بهداشتی فلزات سنگین در غبار خیابانی آبادان، بیشترین و کمترین میزان خطر را به ترتیب برای فلزات کروم و سرب گزارش کرد. همچنین ترافیک، فعالیت های صنعتی و احتراق سوخت های فسیلی به عنوان منابع انتشار فلزات معرفی شدند.^۸ نتایج حاصل از مطالعه Keshavarzi و همکاران (۲۰۱۵) در غبار خیابانی شیراز، منابع طبیعی، ترافیک و فعالیت های صنعتی را به عنوان عوامل کنترل کننده عناصر در

طوری که در این زمینه تاکنون هیچ مطالعه‌ای به ارزیابی خطر بهداشتی فلزات در غبار خیابانی شهر کرج نپرداخته است و مطالعات موجود تنها گزارش مختصری از غلظت تعداد محدودی از فلزات ارائه داده‌اند^{۱۲، ۱۴}. بنابراین این مطالعه به منظور شناسایی منابع و ارزیابی خطرات بهداشتی فلزات در شهر کرج انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

شهر کرج مرکز استان البرز و از کلان‌شهرهای ایران است. این شهر با مساحت ۱۷۵/۴ کیلومتر مربع در غرب تهران با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه واقع شده است. در میان کلان‌شهرهای ایران بالاترین نرخ رشد جمعیت به میزان ۱۴/۳٪ در سال مربوط به شهر کرج است و در حال حاضر پس از شهرهای تهران، مشهد و اصفهان به عنوان چهارمین شهر پرجمعیت ایران به شمار می‌رود. همچنین شهر کرج پس از تهران بزرگ‌ترین شهر مهاجرپذیر ایران است.

روش نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی

نمونه‌برداری از غبار خیلانی در سه منطقه شهر کرج (فردیس، گلشهر و کارخانه قند) در سال ۱۳۹۷ صورت گرفت (شکل ۱). انتخاب مناطق نمونه‌برداری با توجه به جهت باد غالب (شمال غرب به جنوب شرق) و مجاورت با مسیرهای با ترافیک بالا و نواحی صنعتی صورت گرفت. از هر یک از مناطق نمونه‌برداری چهار نمونه برداشته شد. بر این اساس منطقه فردیس با توجه به مجاورت با نیروگاه برق و استقرار بیشترین تعداد واحدهای صنعتی آلاینده هوا، منطقه کارخانه قند با توجه به سهم بالای شبکه راه‌های دارای آلودگی و تعداد بالای ایستگاه‌های تاکسی و اتوبوس و منطقه گلشهر با توجه به تعداد متوسط واحدهای صنعتی آلاینده و تعداد زیاد منابع

این شهر نشان داد. بر طبق این مطالعه، بیشترین آثار مضر مربوط به عناصر جیوه، سرب، روی و منگنز بود^۹. مطالعه Soltani و همکاران (۲۰۱۵) در غبار خیابانی اصفهان نشان داد عناصر کادمیوم، مس، سرب و روی از منابع انسانی (عمدتاً انتشارات ترافیکی) و عناصر کبالت، کروم و نیکل از منابع طبیعی نشأت می‌گیرند. همچنین بر طبق نتایج این مطالعه عناصر کادمیوم و سرب منجر به بروز خطر اکولوژیکی بالقوه می‌گردند^{۱۰}. Ehtemae و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به بررسی خطرات بهداشتی فلزات در غبار خیابانی ایلام پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد بیشترین خطر غیرسرطان‌زایی در کودکان و بزرگسالان به ترتیب مربوط به فلز آرسنیک از طریق مسیر بلع و فلز کروم از طریق مسیر جذب پوستی است و کمترین میزان مربوط به فلز کادمیوم از طریق مسیر تنفس است. همچنین در هر دو گروه سنی، کروم بیشترین و سرب کمترین خطر سرطان‌زایی را دارد^{۱۱}.

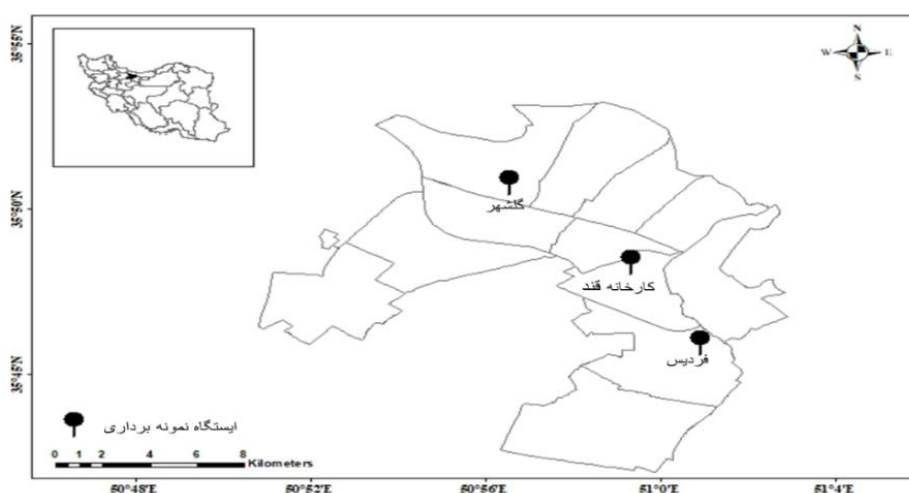
ترافیک سنگین، فقدان سیستم حمل و نقل عمومی منسجم و حضور رشته‌کوه‌های البرز در اطراف شهر که منجر به ترقیق ضعیف آلاینده‌های هوایی می‌شوند، از جمله عوامل موثر بر غلظت بالای آلاینده‌های هوا در شهر کرج محسوب می‌گردند. همچنین مجاورت با شهر تهران منجر به ورود شمار زیادی از مسافران شده است که همه روزه برای اشتغال و دریافت خدمات مختلف در سطح شهر کرج تردد دارند و معابر مرکزی را با عبور و مرور سنگین مواجه ساخته‌اند^{۱۲}. علاوه بر این به دلیل وجود صنایع متعدد و نیروگاه برق در شهر کرج و تعداد ۳۵۰۰ واحد صنعتی فعال در استان البرز، بخش مهمی از آلودگی به منابع ثابت اختصاص دارد، به طوری که بر اساس آمارهای موجود، ۱۳۵ واحد بزرگ آلاینده هوا در استان البرز وجود دارد که با در نظر گرفتن جهت باد غالب بر آلودگی هوای شهر کرج می‌افزایند^{۱۳}. با وجود منابع متعدد آلودگی هوا که منجر به انتشار فلزات سمی در شهر کرج می‌گردد، منابع و آثار بهداشتی این عناصر ناشناخته مانده است. به

چهار اسید (HClO_4 , HF , HCl , HNO_3) با نسبت‌های معین در روش USEPA به وسیله هات پلِت هضم گردید. در نهایت فلزات کلسیم (Ca)، باریم (Ba)، کروم (Cr)، مس (Cu)، منگنز (Mn)، نیکل (Ni)، وانادیوم (V)، روی (Zn)، استرانسیوم (Sr)، لیتیم (Li)، تیتانیوم (Ti)، سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K)، آهن (Fe) و آلومینیوم (Al) توسط دستگاه پلاسمای جفت‌شده القایی-طیف‌سنج نشری (ICP-OES) مدل Varian و غلظت فلزات کادمیوم (Cd)، کبالت (Co)، سرب (Pb) و تنگستن (W) با دستگاه پلاسمای جفت‌شده القایی طیف‌سنج جرمی (ICP-MS) مدل Agilent 7500cx تعیین شد.

در این مطالعه به منظور بررسی نحوه توزیع آماری داده‌های غلظت از آزمون اسمیرنوف-کولموگروف و به منظور بررسی همبستگی و تفاوت‌های آماری بین داده‌ها به ترتیب از آزمون-های همبستگی پیرسون و آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) با استفاده از نرم افزار SPSS ۲۶ استفاده شد. برای گروه‌بندی فلزات از آنالیز خوشه‌ای (CA) استفاده شد.

کارگاهی به عنوان نمایندگان شهر کرج انتخاب شدند. همچنین هر سه منطقه در امتداد بزرگراه‌های تهران-کرج و کرج-قزوین با متوسط سالیانه حجم ترافیک روزانه (AADT) به ترتیب ۲۱۷۰۸۴ و ۷۹۶۰۶ قرار گرفته‌اند. از هر ایستگاه، سه نقطه نمونه‌برداری در مساحتی حدود ۱ متر مربع برای جمع‌آوری نمونه انتخاب شد. از هر نقطه نمونه‌برداری حدود ۵۰۰ تا ۷۵۰ گرم نمونه جمع‌آوری و برای دستیابی به نمونه ترکیبی منفرد ترکیب شدند. نمونه‌ها با استفاده از برس و خاک‌انداز پلاستیکی جمع‌آوری شدند. به منظور جلوگیری از تعلیق مجدد ذرات بسیار ریز در طی نمونه‌برداری، جاروکشی آهسته و نمونه‌ها مستقیماً به کیسه‌های پلی‌اتیلنی جاروب شدند.^{۱۵} نمونه‌ها در دمای محیط خشک و سپس از الک نایلونی با سایز مش ۲۳۰ (قطر حفره $63 \leq \mu\text{m}$) عبور داده شدند. چون ذرات با قطر $63 \leq \mu\text{m}$ میکرومتر دارای بیشترین بارگذاری برای فلزات سمی در هر فرگشتن/فاز ژئوشیمیایی هستند و به آسانی از طریق بلع، استنشاق و پوست جذب می‌شوند.^{۱۶}

آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق روش USEPA انجام شد.^{۱۶} میزان ۰/۱ تا ۰/۵ گرم از نمونه‌های الک شده با استفاده از



شکل ۱: موقعیت مکان‌های نمونه‌برداری

$$LADD = \frac{C \times EF}{AT \times PEF} \times \left(\frac{IngR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{IngR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (4)$$

که در اینجا IngR نرخ بلع (۲۰۰ و ۱۰۰ میلی گرم در روز به ترتیب برای کودکان و بزرگسالان)، InhR نرخ تنفس (۷/۶ و ۲۰ متر مکعب در روز به ترتیب برای کودکان و بزرگسالان)، EF فراوانی قرار گرفتن در معرض فلزات (۲۲۰ روز در سال)، ED مدت زمان قرار گرفتن در معرض فلزات (۶ سال برای کودکان و ۲۴ سال برای بزرگسالان)، SA سطح پوستی در معرض فلزات (۲۸۰۰ cm² برای کودکان و ۵۷۰۰ cm² برای بزرگسالان)، SL ضریب چسبندگی پوست (۰/۲ و ۰/۷ میلی گرم بر سانتیمتر مربع در روز به ترتیب برای کودکان بزرگسالان)، ABS فاکتور جذب پوستی (بدون واحد) (۰/۰۰۱ برای کلیه عناصر)، PEF ضریب انتشار ذرات (m³/kg) (۱/۳۶×۱۰^۹، BW (میانگین وزن بدن، ۱۵ و ۷۰ کیلوگرم به ترتیب برای کودکان و بزرگسالان)، AT مدت زمان قرار گرفتن در معرض فلزات (برای غیر سرطان‌زاها برابر با ED×۳۶۵ روز و برای سرطان‌زاها ۲۵۵۵۰=۷۰×۳۶۵ روز) است. برای دستیابی به برآوردی از حداکثر تماس منطقی، C (غلظت نقطه تماس، mg/kg) در معادلات ۴-۱ حد بالایی فاصله اطمینان ۹۵٪ میانگین در نظر گرفته شد^{۱۷}. نسبت خطر (HQ) برای هر مسیر بر اساس محاسبه دوز مواجهه روزانه در مسیرهای مواجهه با استفاده از معادله ۵ محاسبه شد. شاخص خطر (HI) کمیتی است که سهم ترکیبی بلع، تنفس و تماس پوستی را محاسبه می‌نماید. این شاخص به صورت معادله ۶ تعریف می‌شود. برای محاسبه خطر سرطان‌زایی (CR) همان گونه که در معادله ۷ نشان داده شده است، دوز در فاکتور شیب دهانی مربوطه (به ترتیب ۶/۳×۱۰^۲، ۹/۸×۱۰^۲، ۴/۲×۱۰^۱ و ۸/۴×۱۰^{-۱} برای کادمیوم، کبالت، کروم و نیکل) به منظور برآوردی از خطر سرطان ضرب می‌شود^۷.

هدف از خوشه‌بندی داده‌ها آن است که مشاهده‌ها به گروه‌های متجانس تقسیم شوند، به طوری که مشاهده‌های هر گروه بیشترین شباهت و مشاهده‌های گروه‌های مختلف کمترین شباهت را با هم داشته باشند.

ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی

جهت ارزیابی خطرات سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی فلزات سمی موجود در غبار خیابانی از مدل‌های توسعه‌یافته توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده و موسسه ملی بهداشت عمومی و حفاظت از محیط‌زیست هلند استفاده شد. فرضیه‌های مدل‌های به کار رفته در این مطالعه عبارت است از: ۱) انسان در معرض غبار خیابانی از طریق سه مسیر اصلی بلع (D_{ing})، استنشاق (D_{inh}) و تماس پوستی (D_{dermal}) است. ۲) نرخ جذب و انتشار ذره‌ای می‌تواند توسط نرخ توسعه‌یافته برای خاک تقریب زده شود. ۳) پارامترهای مواجهه کودکان و بزرگسالان در مناطق مطالعه مشابه با جمعیت‌های رفرنس است. ۴) خطر کلی غیر سرطان‌زایی برای هر فلز و خطر کلی سرطان‌زایی برای کادمیوم، کروم، کبالت و نیکل می‌تواند با خلاصه نمودن خطرات فردی ناشی از سه مسیر مواجهه محاسبه شوند. میزان مواجهه بر حسب دوز روزانه بیان شد و به صورت جداگانه برای هر فلز و برای هر مسیر مواجهه با معادلات ۱، ۲ و ۳ محاسبه شد^{۱۸، ۱۷}. در رابطه با خطر سرطان‌زایی، میانگین دوز روزانه طول عمر (LADD) برای مواجهه تنفسی با عناصر کادمیوم، کروم، کبالت و نیکل استفاده شد (معادله ۴).

$$D_{ing} = C \times \frac{ingR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$D_{inh} = C \times \frac{inhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (2)$$

$$D_{dermal} = C \times \frac{SL \times SA \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3)$$

کیفیت آب آشامیدنی بدست آمده است.^{۲۰} فاکتور شیب دهانی (SF_0) از سطوح غربالگری منطقه‌ای بدست آمد^{۲۱}. اگر $HI < 1$ باشد، هیچ خطر قابل توجهی از آثار غیر سرطان‌زایی وجود ندارد. اگر $HI > 1$ باشد امکان بروز آثار غیر سرطان‌زایی وجود دارد و احتمال آن با افزایش HI بیشتر می‌شود.

$$HQ = Di / R_f D \quad (5)$$

$$HI = \sum HQ_{(ingestion/inhalation/dermal)} \quad (6)$$

$$CR = LADD \times SF_0 \quad (7)$$

یافته‌ها

بررسی غلظت و توزیع مکانی عناصر کمیاب در

غبار خیابانی

آمار توصیفی غلظت‌های فلزات در نمونه‌های غبار خیابانی شهر کرج در جدول ۱ نشان داده شده است.

$R_f D$ (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) برآوردی از حداکثر خطرپذیری مجاز برای جمعیت انسانی از طریق مواجهه روزانه با عناصر در طول عمر است. مقادیر $R_f D$ فلزات مطالعه شده از مجموعه سیستم اطلاعات ارزیابی ریسک وزارت انرژی ایالات متحده (RAIS) گرفته شده است^{۱۹}، به استثنای سرب که دوز رفرنس آن از دستورالعمل‌های WHO برای

جدول ۱: آمار توصیفی غلظت فلزات منتخب (mg/kg) در غبار خیابانی شهر کرج

عنصر	حداقل	حداکثر	SD ± میانگین	میان	چولگی	کشیدگی	% ضریب تغییرات (CV)	غلظت پوسته زمین ^{۲۲}
Cd	۰/۱۳	۴/۵۲	۰/۹±۱/۱۷	۰/۵۶	۳/۲۱	۱۰/۷۰	۱۲۹	۰/۱۰
Co	۱۰/۴۰	۴۳/۸۶	۲۱/۰۶±۱۲/۳۴	۱۴/۹۵	۱/۰۴	-۰/۵۸	۵۹	۱۰
Pb	۷۰/۷۲	۲۱۳/۲۸	۱۱۳/۵۷±۳۹/۸۴	۱۰۸/۴۵	۱/۴۵	۲/۷۷	۳۵	۲۰
W	۱/۸۲	۱۲/۹۵	۵/۷۳±۳/۳۹	۴/۷۹	۰/۸۳	۰/۱۷	۵۹	۲
%Mg	۱/۲۶	۱/۶۰	۱/۴۳±۰/۱۰	۱/۴۴	-۰/۱۷	-۰/۹۰	۷	۱/۳۳
%Na	۱/۳۱	۱/۷۶	۱/۵۵±۰/۱۵	۱/۵۵	-۰/۰۹	-۰/۸۵	۹	۲/۸۹
%K	۱/۶۶	۱/۹۴	۱/۸۲±۰/۱۱	۱/۸۳	-۰/۳۶	-۱/۴۸	۶	۲/۸۰
%Fe	۳/۹۹	۵/۱۴	۴/۵۲±۰/۴۱	۴/۵۱	۰/۲۰	-۱/۳۰	۹	۳/۵۰
Ba	۵۵۱/۴۱	۸۴۴/۲۳	۷۲۱/۴۳±۹۸/۸۳	۷۴۷/۰۷	-۰/۷۳	-۰/۳۷	۱۴	۵۵۰
Cr	۶۶/۳۳	۱۳۰/۳۹	۹۳/۹۶±۲۳/۲۶	۸۵/۹۴	۰/۵۹	-۱/۲۴	۲۵	۳۵
Cu	۱۱۲/۳۰	۲۸۷/۱۱	۱۵۹/۳۷±۴۷/۷۴	۱۶۰/۲۸	۱/۷۹	۴/۴۵	۳۰	۲۵
Mn	۸۴۴/۲۴	۱۰۳۵/۴۱	۹۱۸/۶۶±۵۱/۵۲	۹۱۳/۵۸	۰/۷۸	۱/۲۵	۶	۶۰۰
Ni	۳۵/۶۳	۱۶۰/۰۸	۶۹/۳۶±۴۰/۶۰	۵۰/۲۰	۱/۲۳	۰/۵۷	۵۹	۲۰
V	۸۶/۴۴	۱۰۹/۸۰	۹۵/۸۹±۶/۵۱	۹۶/۳۹	۰/۵۲	۰/۶۹	۷	۶۰
Zn	۳۴۸/۰۱	۶۲۴/۶۲	۴۷۹/۱۵±۷۸/۹۳	۴۹۰/۰۵	۰/۱۰	-۰/۴۱	۱۶	۷۱
%Al	۵/۷۱	۶/۶۵	۶/۰۸±۰/۳۶	۵/۹۳	۰/۶۷	-۱/۴۹	۶	۸/۰۴
%Ca	۶/۳۹	۸/۲۲	۷/۵۹±۰/۶۷	۷/۹۳	-۰/۹۹	-۰/۶۵	۹	۳
Sr	۳۰۴/۳۳	۴۱۰/۴۵	۳۵۹/۶۵±۳۳/۴۶	۳۵۷/۶۸	۰/۰۳	-۰/۹۴	۹	۳۵۰
Ti	۳۷۳۶/۵۱	۵۵۴۱/۹۹	۴۲۵۴/۱۹±۴۴۲/۴۱	۴۱۴۹/۹۶	۲/۴۸	۷/۶۱	۱۰	۳۰۰۰
Li	۱۶/۲۲	۱۸/۷۰	۱۷/۱۵±۰/۷۹	۱۷/۰۱	۰/۵۶	-۰/۶۲	۵	۲۰

قند< گلشهر؛ عناصر Mn, Fe, Na, Cu و W با روند فردیس< گلشهر< کارخانه قند؛ فلزات Zn, Pb, K, Ti, Sr و V با روند گلشهر< فردیس< کارخانه قند؛ عنصر Ba با روند کارخانه قند< فردیس< گلشهر؛ فلزات Ca, Mg و Al با روند گلشهر< کارخانه قند< فردیس؛ و Li با روند کارخانه قند< گلشهر< فردیس مشاهده شدند.

جدول ۲: غلظت فلزات (mg/kg) در مناطق مختلف کرج

عنصر	فردیس	گلشهر	کارخانه قند
Cd	۱/۷۲	۰/۴۶	۰/۵۲
Co	۳۶/۷۴	۱۳/۰۱	۱۳/۴۵
Pb	۱۲۰/۴۰	۱۳۴/۲۴	۸۶/۰۸
W	۹/۳۲	۵/۳۳	۲/۵۵
Mg	٪۱/۳۷	٪۱/۵۰	٪۱/۴۳
Na	٪۱/۶۰	٪۱/۵۴	٪۱/۵۲
K	٪۱/۸۲	٪۱/۸۵	٪۱/۷۹
Fe	٪۴/۷۴	٪۴/۵۳	٪۴/۲۹
Ba	۷۱۲/۹۱	۷۱۱/۴۵	۷۳۹/۹۴
Cr	۱۲۳/۴۸	۷۸/۶۸	۷۹/۷۱
Cu	۱۷۳/۵۵	۱۶۰/۵۲	۱۴۴/۰۵
Mn	۹۴۸/۶۳	۹۰۹/۳۰	۸۹۸/۰۵
Ni	۱۲۰/۱۶	۴۲/۸۲	۴۵/۱۱
V	۹۷/۳۷	۹۹/۵۳	۹۰/۷۷
Zn	۴۸۲/۵۸	۴۸۳/۴۶	۴۷۱/۴۰
Al	٪۶/۰۰	٪۶/۲۳	٪۶/۰۱
Ca	٪۷/۳۶	٪۷/۸۲	٪۷/۵۸
Sr	۳۴۰/۳۰	۳۸۷/۷۸	۳۵۰/۸۷
Ti	۴۱۲۱/۲۱	۴۵۹۳/۹۷	۴۰۴۷/۳۸
Li	۱۶/۹۷	۱۷/۲۲	۱۷/۲۷

شناسایی منابع انتشار با استفاده از تحلیل

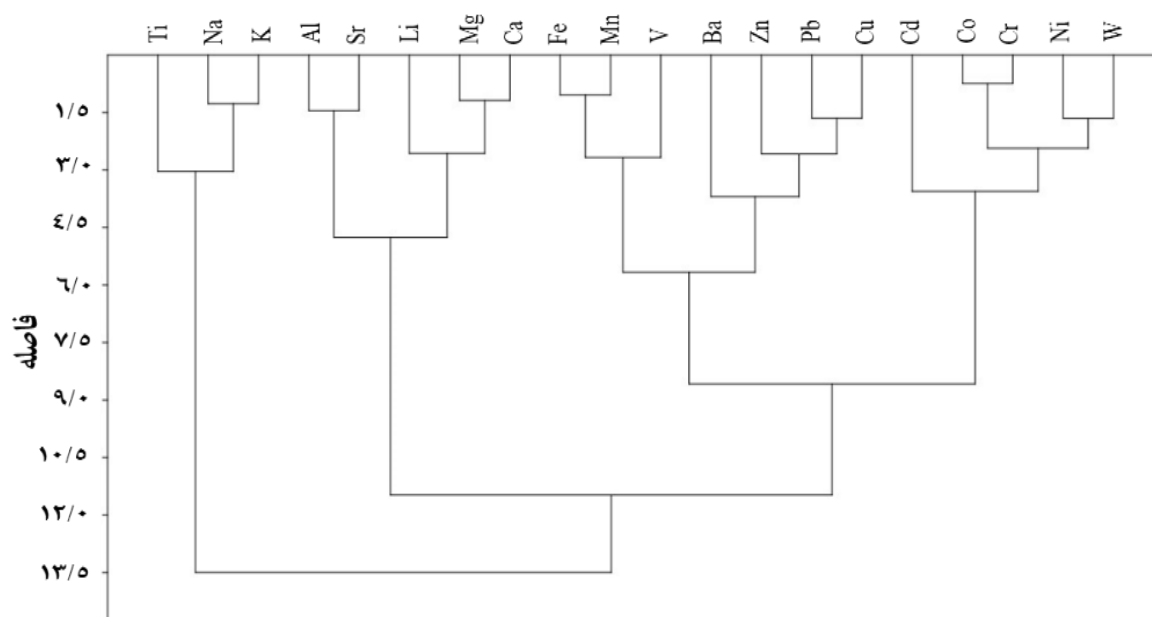
خوشه‌ای (CA)

به منظور طبقه‌بندی فلزات با الگوهای توزیعی مشابه در غبار خیابانی شهر کرج از تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. این روش از ضرایب همبستگی خطی به عنوان معیار شباهت استفاده می‌کند و متغیرها تنها در صورتی که دارای همبستگی

مقادیر میانگین Cd, Zn, Cu و Pb به ترتیب ۶/۷۵، ۶/۳۷، ۵/۶۸ برابر مقادیر موجود در پوسته زمین بودند که تجمع بسیار بالای این فلزات را در غبار خیابانی منعکس می‌کند. همچنین غلظت‌های میانگین Ni, W, Cr, Ca و Co به ترتیب ۳/۴۷، ۲/۸۷، ۲/۶۸، ۲/۵۳ و ۲/۱۰ برابر مقادیر پوسته زمین بودند که غنای متوسط آن‌ها را در منطقه مطالعه نشان می‌دهد. در مقابل غلظت فلزات V, Fe, Mn, Mg, Na, K, Ba, Al, Ti و Li در محدوده غلظت پوسته زمین قرار داشتند که با احتمال بالا منعکس کننده منشأ عمده طبیعی برای این عناصر است.

مطابق با Phil-Eze (۲۰۱۰) $CV \leq 20\%$ تغییرپذیری کم، $20\% < CV \leq 50\%$ تغییرپذیری متوسط، $50\% < CV \leq 100\%$ تغییرپذیری زیاد و $CV > 100\%$ تغییرپذیری بسیار زیاد محسوب می‌شود^{۲۳}. بر این اساس غلظت Cd با CV بیش از ۱۰۰٪ تغییرپذیری بسیار زیاد و عناصر W, Co و Ni با CV ۵۹٪ تغییرپذیری زیاد را در غبار خیابانی شهر کرج ارائه می‌دهند. همچنین فلزات Cu, Pb و Cr با CV به ترتیب ۳۵٪، ۳۰٪ و ۲۵٪، تغییرپذیری متوسطی را در غبار خیابانی نشان دادند. سایر فلزات دارای تغییرپذیری کم هستند. مقادیر چولگی و کشیدگی نشان می‌دهد که فلزات Cd, Co, Pb, Cr, Cu و Ti توزیع نرمالی را دنبال نمی‌کنند. همچنین مقادیر Zn, Ni, Cu با میانگین ۴۷۹/۱۵، ۱۵۹/۳۸ و ۶۹/۳۶ بالاتر از استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران به ترتیب به میزان ۲۰۰، ۶۳ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار گرفتند.

مقایسه غلظت فلزات در غبار خیابانی شهر کرج به تفکیک منطقه در جدول ۲ آورده شده است. Cd, Co, Cr, Cu, Mn, W و Ni بیشترین میزان را در غبار خیابانی منطقه فردیس نشان دادند. در حالی که بیشترین میزان Zn, Pb, V, Ca, Sr و Ti در غبار خیابانی منطقه گلشهر مشاهده شد. همچنین بیشترین غلظت Ba در نمونه‌های غبار خیابانی منطقه کارخانه قند یافت شد. در واقع Cd, Co, Cr و Ni با روند فردیس< کارخانه



شکل ۲: نمودار درختی فلزات منتخب در غبار خیابانی

تنفس، جذب مواد سمی همراه با ذرات غبار به آثار بهداشتی مشابه با ذرات غبار خورده شده منجر خواهد شد^{۲۴}. نتایج ارزیابی خطر بهداشتی فلزات Cr , Co , Ni , Cu , Zn , Cd , Pb , Fe , Al , V , Sr و Mn در غبار خیابانی برای کودکان و بزرگسالان در جدول ۳ و شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

بر طبق نتایج به دست آمده بیشترین مواجهه ناشی از مسیر بلع ذرات و پس از آن مواجهه پوستی و در نهایت مواجهه تنفسی است. بیشترین و کمترین میزان دوز مواجهه از طریق هر سه مسیر به ترتیب برای Al و Cd در هر دوی کودکان و بزرگسالان در کلیه ایستگاه‌ها مشاهده شد. دوز محاسبه شده برای هر فلز و مسیر مواجهه به دوز رفرنس مربوطه (RfD) (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) برای به دست آوردن نسبت خطر (HQ) (یا خطر غیر سرطان‌زایی) تقسیم شد. به دلیل فقدان RfD برای کلیه فلزات، تخمین خطر تنها برای برخی از فلزات انجام شد. در رابطه با HQ ، خطرات ناشی از مسیرهای بلع و پوستی برای کودکان بیش از بزرگسالان بود. با این وجود خطر بالقوه بهداشتی از طریق تنفس اغلب در مقایسه با

بالا باشند با هم مرتبط می‌شوند. نتیجه این تحلیل در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌گردد فلزات مورد مطالعه در دو خوشه اصلی قرار گرفتند که خوشه اول شامل Ti و K و Na و خوشه دوم شامل سایر فلزات است. فلزات موجود در خوشه دوم مجدداً به سه زیر خوشه تقسیم شدند. زیر خوشه اول شامل Al ، Sr ، Li ، Mg ، Ca ، Fe و Mn و زیر خوشه دوم شامل V ، Ba ، Cu ، Zn ، Pb و Cd و زیر خوشه سوم شامل Co ، Cr ، Ni و W است.

ارزیابی خطر غیر سرطان‌زایی

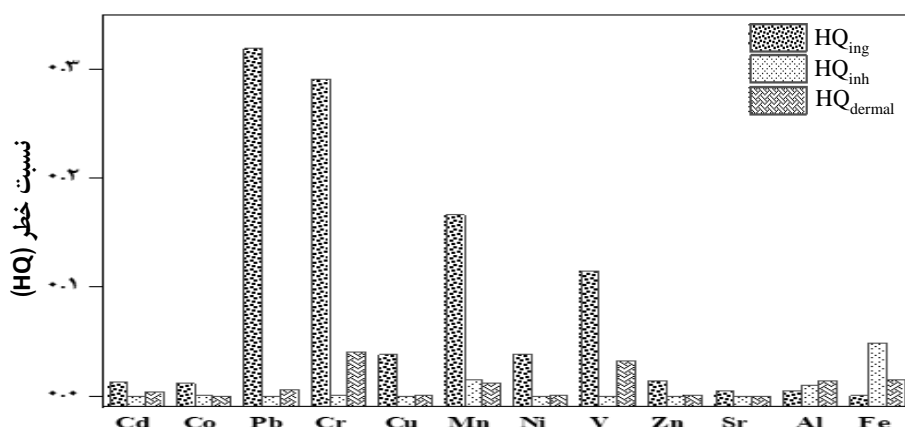
در این مطالعه سه مسیر اصلی مواجهه (بلع، تنفس و تماس پوستی) با فلزات برای برآورد خطرات غیر سرطان‌زایی فلزات موجود در غبار خیابانی در دو گروه سنی کودکان و بزرگسالان مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر دوز رفرنس تنفس برای Cd ، Cu ، Ni ، Pb و V با دوزهای رفرنس خوراکی جایگزین شدند. این امر بر این فرض استوار است که پس از

سایر مسیرهای مواجهه کمتر و در مقایسه با کودکان برای بزرگسالان بیشتر بود. خطر ناشی از مسیر تنفسی تنها برای فلزات Fe و Mn، Co بیش از مواجهه پوستی محاسبه شد. در کودکان خطر مواجهه تنفسی فلزات Fe و Mn، Co به ترتیب به میزان $1/14 \times 10^{-3}$ ، $1/49 \times 10^{-2}$ و $4/88 \times 10^{-2}$ و مواجهه پوستی آنها به ترتیب به میزان $4/07 \times 10^{-5}$ ، $1/16 \times 10^{-2}$ و $2/56 \times 10^{-3}$ (Co) بدست آمد. خطر مواجهه تنفسی $1/54 \times 10^{-2}$ Mn و $1/10 \times 10^{-1}$ Fe برای بزرگسالان نیز بیش از مواجهه پوستی آنها به ترتیب به میزان $2/48 \times 10^{-5}$ و $9/38 \times 10^{-3}$ در کل منطقه مطالعه بود که الگوی

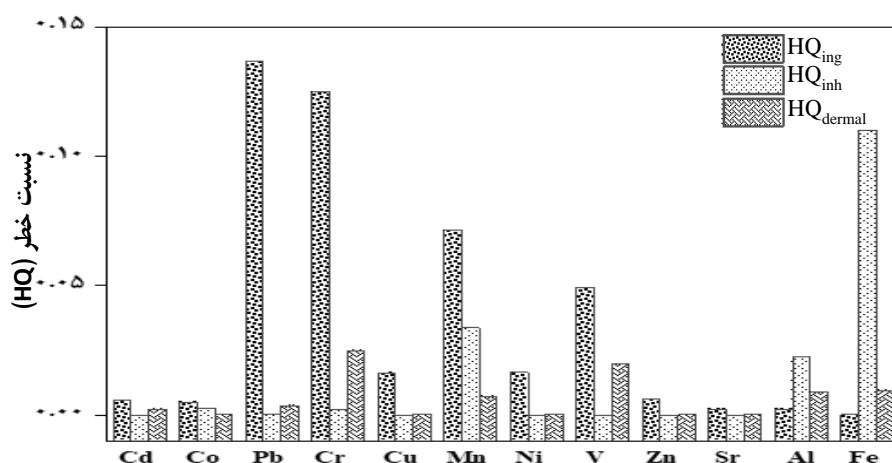
مشاهده شده برای کلیه ایستگاه‌ها نیز مشابه با کل منطقه بود. خطر ناشی از مواجهه از طریق بلع برای کلیه فلزات به استثنای Fe و Al بیش از سایر مسیرهای مواجهه در همه ایستگاه‌ها بود. به طوری که خطر ناشی از دو فلز مذکور با روند مواجهه تنفسی < پوستی < بلع برای بزرگسالان مشاهده شد. در حالی که Al با روند مواجهه پوستی < تنفسی < بلع و Fe با روند مواجهه تنفسی < پوستی < بلع در کودکان مشاهده شد. مقادیر HQ_{ing} ، HQ_{derm} و HQ_{inh} همگی کمتر از ۱ بودند که نشان می‌دهد خطر غیر سرطان‌زایی وجود ندارد.

جدول ۳: میانگین دوز رفرنس روزانه مواجهه خوراکی (Ding) تنفسی (Dinh) و پوستی (Dermal) فلزات منتخب در غبار خیابانی شهر کرج

عنصر	کودکان			بزرگسالان		
	D _{ing}	D _{inh}	D _{dermal}	D _{ing}	D _{inh}	D _{dermal}
Cd	$1/32 \times 10^{-5}$	$3/68 \times 10^{-10}$	$3/69 \times 10^{-8}$	$5/65 \times 10^{-6}$	$8/31 \times 10^{-10}$	$2/25 \times 10^{-8}$
Co	$2/32 \times 10^{-4}$	$6/49 \times 10^{-9}$	$6/51 \times 10^{-7}$	$9/96 \times 10^{-5}$	$1/46 \times 10^{-8}$	$3/97 \times 10^{-7}$
Pb	$1/12 \times 10^{-3}$	$3/12 \times 10^{-8}$	$3/13 \times 10^{-6}$	$4/78 \times 10^{-4}$	$7/03 \times 10^{-8}$	$1/91 \times 10^{-6}$
Cr	$8/74 \times 10^{-4}$	$2/44 \times 10^{-8}$	$2/45 \times 10^{-6}$	$3/75 \times 10^{-4}$	$5/51 \times 10^{-8}$	$1/49 \times 10^{-6}$
Cu	$1/52 \times 10^{-3}$	$4/26 \times 10^{-8}$	$4/27 \times 10^{-6}$	$6/53 \times 10^{-4}$	$9/16 \times 10^{-8}$	$2/61 \times 10^{-6}$
Mn	$7/65 \times 10^{-3}$	$2/14 \times 10^{-7}$	$2/14 \times 10^{-5}$	$3/28 \times 10^{-3}$	$4/82 \times 10^{-7}$	$1/31 \times 10^{-5}$
Ni	$7/65 \times 10^{-4}$	$2/14 \times 10^{-8}$	$2/14 \times 10^{-6}$	$3/28 \times 10^{-4}$	$4/82 \times 10^{-8}$	$1/31 \times 10^{-6}$
V	$8/04 \times 10^{-4}$	$2/25 \times 10^{-8}$	$2/25 \times 10^{-6}$	$3/44 \times 10^{-4}$	$5/07 \times 10^{-8}$	$1/37 \times 10^{-6}$
Zn	$4/25 \times 10^{-3}$	$1/19 \times 10^{-7}$	$1/19 \times 10^{-5}$	$1/82 \times 10^{-3}$	$2/68 \times 10^{-7}$	$7/27 \times 10^{-6}$
Sr	$3/06 \times 10^{-3}$	$8/55 \times 10^{-8}$	$8/57 \times 10^{-6}$	$1/31 \times 10^{-3}$	$2/17 \times 10^{-1}$	$1/65 \times 10^{-1}$
Fe	$5/07 \times 10^{-1}$	$1/42 \times 10^{-5}$	$1/42 \times 10^{-3}$	$1/93 \times 10^{-7}$	$3/20 \times 10^{-5}$	$2/42 \times 10^{-5}$
Al	$3/84 \times 10^{-1}$	$1/07 \times 10^{-5}$	$1/08 \times 10^{-3}$	$5/23 \times 10^{-6}$	$8/67 \times 10^{-4}$	$6/57 \times 10^{-4}$



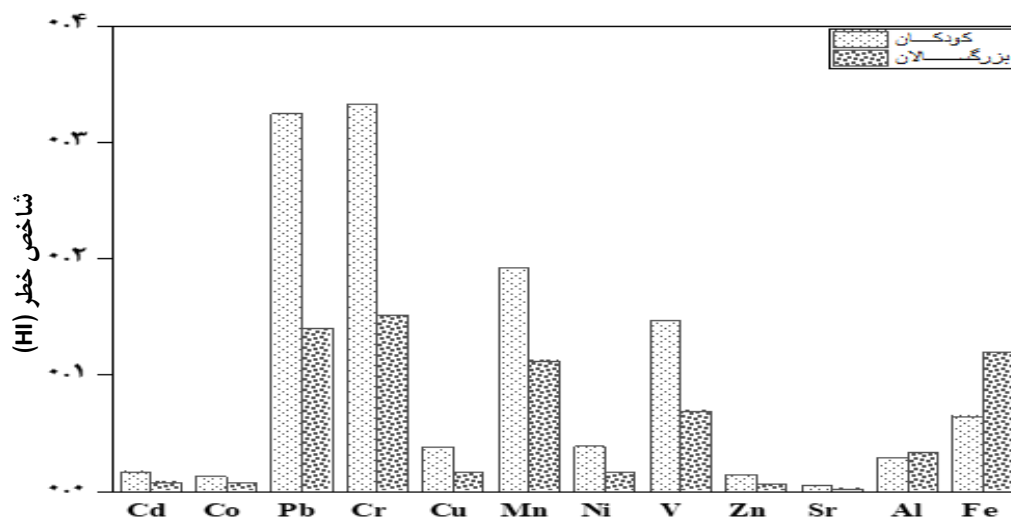
شکل ۳: میانگین نسبت خطر از طریق مواجهه خوراکی (HQ_{ing})، تنفسی (HQ_{inh}) و پوستی (HQ_{dermal}) فلزات منتخب در غبار خیابانی برای کودکان



شکل ۴: میانگین نسبت خطر از طریق مواجهه خوراکی (HQ_{ing})، تنفسی (HQ_{inh}) و پوستی (HQ_{dermal}) فلزات منتخب در غبار خیابانی برای بزرگسالان

صورت $Cr > Pb > Mn > V > Fe > Ni > Cd > Cu > Al > Co$
 $Pb > Cr > Mn > V > Fe > Cu$ در فردیس، به صورت
 $Cr > Pb > Al > Ni > Zn > Cd > Co > Sr$ در گلشهر و با روند
 $Cr > Pb > Mn > V > Fe > Cu > Al > Ni > Zn > Co > Cd > Sr$ در کارخانه
 قند کاهش یافت. در حالی که برای بزرگسالان روند کاهشی
 $Cr > Pb > Fe > Mn > V > Al > Ni > Cd > Cu > Co > Zn > Sr$
 در فردیس، ترتیب $Pb > Fe > Cr > Mn > V > Al > Cu > Ni$
 $Cr > Fe > Mn > Pb > Zn > Cd = Co > Sr$ در گلشهر و روند
 $V > Al > Cu > Ni > Zn > Co > Cd > Sr$ در کارخانه قند مشاهده
 شد.

شاخص خطر (HI) برای هر فلز از مجموع نسبت‌های
 خطر سه مسیر مواجهه به دست آمد. با توجه به مقادیر HI،
 کودکان در مقابل مواجهه با همه فلزات به استثنای آهن و
 آلومینیوم آسیب‌پذیرتر از بزرگسالان هستند. بر طبق نتایج این
 مطالعه، مقادیر میانگین HI (خطر غیر سرطان‌زایی) برای همه
 فلزات آنالیز شده در غبار خیابانی شهر کرج برای کودکان به
 ترتیب $Cr > Pb > Mn > V > Fe > Ni > Cu > Al > Cd > Zn$
 و برای بزرگسالان به ترتیب $Cr > Pb > Fe > Mn$
 $V > Al > Ni > Cu > Cd > Co > Zn > Sr$ کاهش یافت (شکل
 ۵). همچنین به تفکیک منطقه این شاخص برای کودکان به



شکل ۵: میانگین شاخص خطر (HI) فلزات منتخب در غبار خیابانی

جدول ۴: میانگین دوز روزانه در طول عمر (LADD) و خطر سرطانزایی (CR) فلزات منتخب در غبار خیابانی

منطقه	Cd		Co		Cr		Ni	
	CR	LADD	CR	LADD	CR	LADD	CR	LADD
فردیس	$3/4 \times 10^{-9}$	$2/2 \times 10^{-6}$	$3/5 \times 10^{-8}$	$3/4 \times 10^{-5}$	$9/9 \times 10^{-8}$	$4/1 \times 10^{-6}$	$1/2 \times 10^{-7}$	$9/9 \times 10^{-8}$
گلشهر	6×10^{-10}	$3/8 \times 10^{-7}$	$1/1 \times 10^{-8}$	$1/1 \times 10^{-5}$	$6/8 \times 10^{-8}$	$2/9 \times 10^{-6}$	$1/2 \times 10^{-7}$	$3/4 \times 10^{-8}$
کارخانه قند	$5/1 \times 10^{-10}$	$3/2 \times 10^{-7}$	$1/3 \times 10^{-8}$	$1/3 \times 10^{-5}$	$6/8 \times 10^{-8}$	$2/9 \times 10^{-6}$	$4/3 \times 10^{-8}$	$3/6 \times 10^{-8}$

ارزیابی خطر سرطانزایی

فلزات Cd و ترکیبات آن، Cr شش ظرفیتی و Ni فلزی و ترکیبات آن در گروه I سرطانزا برای انسان و Co و ترکیبات آن در طبقه ۲B توسط آژانس بین‌المللی تحقیق بر روی سرطان (IARC) طبقه‌بندی و مرتبط با سرطان ریه، کبد، بینی و کلیه شده‌اند.^{۲۵} خطر سرطانزایی احتمال توسعه انفرادی هر نوع سرطان در مواجهه با مواد خطرناک سرطانزا در طول عمر است. خطر قابل قبول یا قابل تحمل برای اهداف قانونی در دامنه 1×10^{-6} تا 1×10^{-4} است.^{۲۶} خطر سرطانزایی از طریق مواجهه تنفسی برای فلزات Cd، Co، Ni و Cr در نمونه‌های غبار خیابانی کرج برآورد شد. نتایج نشان داد که میزان میانگین

دوز روزانه در طول عمر (LADD) در منطقه فردیس روند کاهشی $Cd > Co > Cr > Ni$ و در مناطق گلشهر و کارخانه قند روند کاهشی $Cd > Co > Ni > Cr$ را در نمونه‌های غبار خیابانی دنبال می‌کند. نتایج ارزیابی خطر سرطانزایی برای فلزات سرطانزا در جدول ۴ ارائه شده‌اند. بر طبق این نتایج، خطر سرطان با روند کاهشی $Ni > Cd > Cr > Co$ در کلیه ایستگاه‌ها مشاهده شد.

بحث

میزان آلاینده‌ها در غبار خیابانی تحت تاثیر عوامل مختلف از جمله محیط طبیعی (توپوگرافی و اقلیم)، فعالیت‌های

انسانی، اندازه جمعیت و درجه توسعه یافتگی است.^{۲۷} بررسی غلظت فلزات در غبار خیابانی شهر کرج نشان داد که غلظت فلزات Zn, Cd, Co, Pb, Cr, Cu, Ni, W و Ca چندین برابر مقادیر موجود در پوسته زمین است که این نتیجه بیانگر نقش عمده فعالیت‌های انسانی در تغلیظ این فلزات در غبار خیابانی است. در مقابل غلظت Mg, Na, K, Fe, Mn, Ba, V, Zn, Al, Ca, Sr و Ti در محدوده مقادیر پوسته زمین قرار گرفت که نشان‌دهنده منشأ عمده طبیعی برای این فلزات است. در این راستا، بررسی مقادیر CV فلزات Cr, Pb, Co, W, Cd, Ni و Cu تفاوت زیادی را در کل منطقه مطالعه نشان داد که مشخصه منشأ انسانی است. در تایید این تفسیر، Yuan و همکاران (۲۰۱۴) نیز ضرایب تغییرات کمتری را برای عناصر تحت کنترل منابع طبیعی در مقایسه با عناصر تحت تاثیر منابع انسانی گزارش دادند.^{۲۸} با این وجود Zn و Ca الگوی متفاوتی را نسبت به سایر فلزات نشان دادند، بدین صورت که علی‌رغم مقادیر پایین ضریب تغییرات برای این فلزات، غلظت‌های بسیار بیشتری برای آن‌ها نسبت به مقادیر پوسته زمین مشاهده شد. این نتیجه را می‌توان به وجود منابع انسانی اما با توزیع نسبتاً یکنواخت این منابع در کل منطقه نسبت داد. بررسی توزیع مکانی فلزات مورد مطالعه نشان داد که اغلب فلزات با غلظت‌های بیش از مقادیر پوسته‌ای (Cu, Cd, Co, Cr, Ni)، تجمع و غلظت بیشتری را در منطقه فردیس داشتند که بیانگر آلودگی بیشتر این منطقه با منابع انسانی است. اما همان‌طور که انتظار می‌رفت، فلزاتی که غلظت‌های در محدوده پوسته زمین داشتند (Mg, Na, K, Al, Sr, Ti و Li)، با سهمیه‌های نسبتاً برابری در غبار خیابانی همه مناطق یافت شدند.

در راستای این نتایج، به منظور شناسایی دقیق‌تر منابع انتشار فلزات بررسی شده از تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. همان‌گونه که در بخش پیشین اشاره شد فلزات موجود در غبار خیابانی شهر کرج در دو خوشه کلی قرار گرفتند که

خوشه اول شامل فلزات Na, K و Ti بود و خوشه دوم سایر عناصر را در بر گرفت. فلزات موجود در خوشه اول با توجه به شواهد موجود (ضریب تغییرات و غلظت‌های پایین) ناشی از منشأ طبیعی هستند. Na و K همبستگی معنی‌دار بسیار بالایی ($r=0.83$) را نشان دادند که رابطه نزدیک ژئوشیمیایی این دو فلز را نشان می‌دهد. با این حال Ti فاقد همبستگی معنی‌دار با این فلزات بود که ممکن است به دلیل منشأ زمین‌زاد متفاوت برای آن باشد.

فلزات موجود در خوشه دوم بر اساس شباهت و همبستگی بیشتر مجدداً به زیر خوشه‌های کوچک‌تری تفکیک شدند. بر این اساس، Ca, Mg, Li, Sr و Al در زیر خوشه اول جای گرفتند. همبستگی مثبت معنی‌داری بین Mg, Ca و Li و همچنین بین Sr و Al مشاهده شد. کلیه فلزات این گروه به استثنای Ca دارای غلظت‌های پایین در مقایسه با مقادیر پوسته‌ای بودند. با توجه به پایین بودن غلظت Mg, Li, Sr و Al در غبار خیابانی، آن‌ها احتمالاً ناشی از منابع طبیعی هستند، یعنی مرتبط با ترکیب مواد مادری محلی هستند. عدم همبستگی بین فلزات Ca, Mg و Li و فلزات Sr و Al می‌تواند ناشی از تفاوت در رفتارهای زمین‌شناختی آن‌ها باشد. همچنین Ca به عنوان ردیابی برای گرد و غبار ناشی از ساخت و ساز گزارش شده است، به طوری‌که اغلب مطالعات غلظت‌های بالای کلسیم را به فعالیت‌های ساخت و ساز، تخریب و کیفیت پایین روکش جاده نسبت داده‌اند.^{۲۹} بنابراین به نظر می‌رسد این عنصر تحت تاثیر عملیات ساخت و ساز، سایش روکش جاده و منابع طبیعی همچون هوازدگی سنگ و خاک باشد.

در زیر خوشه دوم، Pb, Zn, Cu, Ba, V, Mn و Fe قرار گرفتند. در بین فلزات این زیر خوشه، Pb, Zn و Cu که در فاصله کمتری نسبت به هم قرار گرفتند، همگی دارای مقادیر ۶-۷ برابر نسبت به غلظت پوسته‌ای زمین بودند که موبد منشأ انسانی غالب برای این فلزات است. مطالعات مختلف، مقادیر

بالای فلزات Zn, Cu و Pb را مرتبط با انتشارات ترافیکی همچون غبار ناشی از سایش ترمز، لاستیک، افزودنی‌های سوخت و رنگ زرد شمرده‌اند^{۳۰،۳۱،۳۲}. این مسئله موافق با مکان استقرار ایستگاه‌ها در این مطالعه است که همگی در مجاورت جاده‌های پر تردد قرار گرفته‌اند. عنصر روی به لاستیک تایر به صورت اکسید روی (ZnO) و به صورت انواعی از ترکیبات آلی روی برای تسهیل ولکانیزاسیون لاستیک اضافه می‌شود. همچنین ترکیبات روی به عنوان آنتی اکسیدان و بهبوددهنده پاشش در مواد روغنی لغزنده استفاده می‌شوند. اگرچه افزودن سرب به بنزین در ایران از اوایل دهه ۲۰۰۰ ممنوع شد، غبار خیابانی آلوده به سرب ممکن است به میزان زیادی به دلیل کاربرد گذشته افزودنی‌های سرب در بنزین با توجه به نیمه عمر طولانی و نرخ آبشویی کم سرب، سایش و پارگی بلبرینگ‌های لاستیک‌ها، پرینت، ضایعات گرافیکی و موارد دیگر باشد^۶. مقادیر بالای مس می‌تواند به دلیل تراوش سوخت و مواد روغنی، سایش قطعات موتور و سایر منابع از جمله فلزکاری‌ها، قطعات خودرو همچون آسترلنت‌های ترمز، فیبرها و سایر لوازم جانبی وسایل نقلیه باشد که در آن‌ها فرمولاسیون فلزات مس-پایه به کار می‌روند. مواد ساخت و ساز نیز حاوی فلزات مختلفی همچون مس هستند که می‌توانند این عنصر را در محیط منتشر سازند^{۱۵}. با این حال غلظت سایر فلزات موجود در این زیرخوشه شامل V, Ba, Mn و Fe در محدوده مقادیر پوسسته زمین قرار گرفت که احتمالاً منشأ عمده طبیعی را برای این فلزات نشان می‌دهد. اما قرار گرفتن این فلزات و به‌ویژه Ba در زیرخوشه مشترک با فلزات شاخص وسایل نقلیه (Pb, Zn و Cu) ممکن است نشان‌دهنده تأثیر منابع انسانی بر روی غلظت آن‌ها در محیط باشد. در واقع Ba به عنوان پرکننده در لنت ترمز برای افزایش تراکم روکش‌های ترمز و به عنوان رقیق‌کننده در رنگ‌ها (BaSO₄) استفاده می‌شود^{۳۱}. مطالعات مختلف ردپاهایی از فلزات Zn, Cu, Fe, Mn, V و Ba را در انتشارات غیر

اگزوزی وسایل نقلیه گزارش نموده‌اند^{۳۲،۳۳،۳۴}. اما با توجه به غلظت نسبتاً پایین آن‌ها در این مطالعه، این منشأ احتمالاً نقش کمتری نسبت به منشأ پوسسته‌ای برای این فلزات دارد. با این حال همان طور که سایر مطالعات نیز گزارش نموده‌اند تشخیص غبار پوسسته‌ای از انتشارات غیر اگزوزی با توجه به ترکیب شیمیایی بسیار مشابه آن‌ها دشوار است^{۳۲،۳۵}.

در نهایت زیرخوشه سوم، فلزات W, Ni, Cr, Co و Cd را در خود جای داد. کلیه فلزات موجود در این زیرخوشه غنا و تجمع چندین برابری را نسبت به پوسسته زمین نشان دادند. بر طبق آزمون ANOVA فلزات Ni, Cr, Co و W در منطقه فردیس دارای مقادیر بسیار بیشتر و اختلاف معنی‌دار (۰/۰۵ < p) با مناطق دیگر هستند. منابع Ni, Cr و Co در درجه اول به عنوان ترکیبی از منابع انسانی همچون فعالیت‌های صنعتی، بقایای مصرف و نیروگاه‌های با سوخت فسیلی هستند. عنصر Cr اغلب با انتشارات صنعتی مرتبط شده است. این فلز به عنوان روکش بر روی مواد مختلف برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی استفاده می‌گردد. در عین حال، فلز Co در مطالعات مختلف به احتراق سوخت‌های فسیلی نسبت داده شده است که ممکن است با نیروگاه‌های حرارتی و احتراق زغال مرتبط باشد^{۳۰،۳۶}. علاوه بر این مقادیر محدودی از Cr و Co از غبار خاک (زمین‌زاد) ناشی می‌شوند و در سطح زمین پس از یک دوره زمانی معین ته‌نشست می‌شوند که به تدریج به دلیل تراکم جمعیت، تراکم وسایل نقلیه و رشد صنایع بر میزان آن‌ها افزوده می‌شود^{۳۶}. با توجه به مجاورت منطقه فردیس با نیروگاه برق و همچنین وجود شهرک‌های صنعتی مختلف همچون سیمین دشت در مجاورت این منطقه می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً فلزات Ni, Cr, Co و W عمدتاً ناشی از منابع صنعتی و احتراق سوخت فسیلی به‌ویژه در نیروگاه باشند. سطوح بالاتر Cd در منطقه فردیس در مقایسه با دو منطقه دیگر و همچنین با توجه به همبستگی معنی‌دار آن با Co و Cr ممکن است تا حدودی مرتبط با انتشارات صنعتی و

انتشارات ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه باشد. با این حال احتراق سوخت‌های فسیلی (بنزین و گازوئیل) در وسایل نقلیه نیز می‌تواند منجر به انتشار فلزات Ni, Co, Cr و به‌ویژه Cd گردد.^۶ قرار گرفتن عنصر Cd در زیر خوشه کوچک‌تر مجزا و مجاورت آن با خوشه فلزات شاخص وسایل نقلیه تاییدی بر این موضوع است. با توجه به آنچه بیان شد این فلزات احتمالاً از ترکیبی از منابع شامل احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه، وسایل نقلیه و انتشارات صنعتی ناشی می‌شوند. در توافق با این مطالعه، دست‌گشاده و همکاران (۱۳۹۳) نیز بیشترین میزان Zn, Pb و Cu را در ایستگاه‌های واقع در مجاورت آزادراه کرج-قزوین و بیشترین میزان Ni و Cr را در جاده ملارد اندازه‌گیری نمودند.^{۱۲} همچنین مقادیر میانگین Cr و Ni به دست آمده در این مطالعه برای شهر کرج (به ترتیب با میانگین ۹۳/۹۶ و ۶۹/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نسبت به مقادیر به دست آمده برای شهر تهران (به ترتیب با میانگین ۳۳/۳۰ و ۳۴/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بسیار بیشتر بود، در صورتی‌که مقادیر سایر فلزات شامل Cu, Zn, Pb و Cd در شهر تهران بیشتر بود.^{۳۷}

در کل بر اساس نتایج تحلیل خوشه‌ای، عناصر فلزی موجود در غبار خیابانی کرج را می‌توان با احتمال بالایی در پنج دسته گروه‌بندی کرد: ۱) منابع مختلط صنعتی و احتراق سوخت‌های فسیلی برای Ni, Co, Cr, W و Cd؛ ۲) منشا ترافیکی برای Cu, Zn و Pb؛ ۳) منشا عمده طبیعی با سهمیه‌ای کمتر از منابع ترافیکی برای Ba, V, Mn و Fe؛ ۴) منابع

مختلط طبیعی، فعالیت‌های ساختمانی و سایش روکش جاده برای Ca, Mg, Li, Al و Sr؛ ۵) منشا طبیعی برای Ti, Na و K.

غلظت فلزات در غبار خیابانی شهرهای مختلف بسته به ترکیب ژئوشیمیایی، شرایط آب و هوایی، جمعیت و منابع آلاینده انسانی متفاوت است.^۳ میانگین غلظت فلزات مطالعه شده در غبار خیابانی شهر کرج با سایر شهرهای ایران و جهان در جدول ۵ مقایسه شده است. سطوح اغلب فلزات بررسی شده در این مطالعه در محدوده سطوح گزارش شده برای کلان‌شهرهای تهران، مشهد، اهواز و شیراز بود. در حالی‌که میزان آن‌ها در مقایسه با شهرهای همدان، بوشهر، زاهدان، یزد و ایلام بسیار بالاتر بود. همچنین در مقایسه با اغلب شهرهای جهان میانگین غلظت Pb و Cd کمتر اما میانگین غلظت Zn, Cu, Cr, Ni, Mn, Co, Fe, Al و V بیشتر بود. در کل همان گونه که ملاحظه می‌شود مقادیر بدست آمده برای فلزات در این مطالعه نسبت به اغلب شهرهای کشور و جهان به میزان قابل توجهی بیشتر است که دلالت بر سطوح آلودگی قابل توجه در این شهر دارد. تراکم جمعیت، استقرار مناطق و واحدهای صنعتی متعدد در شهر کرج به علاوه ۲۰٪ ترافیک برون شهری کشور و توزیع سوخت غیراستاندارد، پتانسیل حضور انواع آلاینده‌ها از جمله عناصر را افزایش داده است که در صورت عدم توجه می‌تواند منجر به بروز شرایط بحرانی و خطرات جدی سلامت شوند.

جدول ۵: مقایسه غلظت فلزات (mg/kg) در غبار خیابانی شهرهای مختلف جهان با کرج

شهر	Cd	Co	Pb	Cr	Cu	Fe	Al	Mn	Ni	V	Zn	Ti	مرجع
تهران	۰/۴۹	-	۲۰۰/۳۳	۱۱۱/۹۴	-	۴/۶۵	۵/۳۴	-	-	-	۶۳۸/۱۴	-	۳۸
مشهد	۰/۳۰	۱۰/۵۶	۱۰۰/۴۸	۸۵/۶۳	۱۱۲/۷۹	۲/۵۱	۱/۱۰	۴۸۰/۲۳	-	-	۳۲۵/۷۹	-	۳۹
شیراز	۰/۵	-	۱۱۵/۷۱	۶۷/۱۶	۱۳۶/۳۴	۲/۰۲	-	۴۳۸/۵	۷۷/۵۲	-	۴۰۳/۴۶	-	۹
همدان	۰/۲۲	-	۶۵/۲	۴۱/۳	۴۸/۸	-	-	-	۷۹/۲	-	۲۱۱	-	۴۰
اهواز	۵/۶۰	-	۱۷۹/۶۰	۱۰۱	۱۷۹/۷۵	-	-	-	-	-	۱۵۰/۱۵	-	۴۱
بوشهر	۰/۳۵	۵/۰۹	۹۴/۸۶	۴۵/۷۶	۱۱۸	۱/۶۷	۰/۵۴	۳۴۶/۳۳	۳۵/۰۵	-	۲۸۳/۰۳	۲۱۰/۴۲	۴۲
زاهدان	۰/۱	-	۲۸/۴	۳۷/۵	۲۹/۷	-	-	-	۵۱/۱	-	۱۸۴/۳	-	۴۳
یزد	۰/۳۶	-	۷۹/۶۲	۹۱/۳۸	۹۰/۳۳	۲/۶۸	۳/۸۳	۰/۰۵	۴۵/۷۱	۶۷/۷۱	۴۱۱/۳۸	-	۴۴
ایلام	۰/۳۷	-	۵۱/۸۰	۴۵/۸۴	۶۳/۱۲	-	-	-	۴۳/۷۶	۳۰/۹۲	۲۱۳/۲۴	-	۴۵
مادرید، اسپانیا	-	۳	۱۹۲۷	۶۱	۱۸۸	-	-	۳۶۲	۴۴	۱۷	۴۷۶	۱۱۰	۴۶
اسلو، نروژ	۱/۴	۱۹	۱۸۰	-	۱۲۳	-	-	۸۳۳	۴۱	-	۴۱۲	۷۴۵۲	۴۶
کاولا، یونان	۰/۲	-	۳۰۱	۱۹۶	۱۲۴	-	-	-	۵۸	-	۲۷۲	-	۴۷
اتاوا، کانادا	۰/۳۷	۸/۳۱	۳۹/۰۵	۴۱/۷	۶۵/۸۴	۱/۸۹	۴/۷۵	۴۳۱/۵	۱۵/۲	۳۴	۱۱۲/۵	-	۴۸
لوآنادا، آنگولا	۱/۱	۲/۹	۳۵۱	۲۶	۴۲	۱/۱۶	۰/۴۸	۲۵۸	۱۰	۲۰	۳۱۷	۱۰۷	۴۹
سنول، کره	۴/۳	-	۲۱۴/۳۰	۱۸۲/۱	۴۴۵/۶۰	-	-	-	۸۹/۶	-	۲۶۶۵	-	۵۰
اسلام‌آباد، پاکستان	۵	-	۱۰۴	-	۵۲	-	-	-	۲۳	-	۱۱۶	-	۵۱
ووهران، چین	-	۱۲/۴	۲۲۴/۲	۷۵/۳	۶۲/۱	۳/۲۱	-	۶۰۲/۹	۲۷/۷	۶۵/۶	۲۲۴/۲	-	۵۲
کرج	۰/۹	۲۱/۰۶	۱۱۳/۵۷	۹۳/۹۶	۱۵۹/۳۷	۴/۵۲	۶/۰۸	۹۱۸/۶۶	۶۹/۳۶	۹۵/۸۹	۴۷۹/۱۵	۴۲۵۴/۱۹	مطالعه حاضر

بر طبق نتایج این مطالعه، بلع ذرات غبار مسیر اصلی مواجهه با فلزات برای کودکان و بزرگسالان در غبار خیابانی شهر کرج است. بنابراین چنین مسیر تماسی نگرانی زیادی به‌ویژه برای کودکان به همراه دارد. نتایج بررسی‌های پیشین نیز موافق با نتایج این مطالعه است و بلع را به عنوان مهم‌ترین مسیر مواجهه برای فلزات گزارش نموده‌اند^{۳۴، ۳۶، ۳۷}. پس از بلع برای کلیه فلزات به استثنای Co، Mn و Fe، به ترتیب مسیرهای پوستی و تنفسی در رده‌های بعدی مواجهه قرار گرفتند. بر طبق نتایج این مطالعه، در مواجهه با فلزات Co، Mn و Fe، مسیر تنفسی مهم‌تر از مسیر پوستی است. Lu و همکاران (۲۰۱۴) نیز خطر ناشی از مواجهه تنفسی با Co و Mn را بیش از خطر ناشی از مواجهه پوستی در غبار گزارش نمودند، در حالی که آن‌ها بیان داشتند که برای سایر فلزات

خطر ناشی از مواجهه پوستی بیش از مواجهه تنفسی است^۴. واضح است که کودکان فعالیت‌های دست به دهان بیشتری دارند اما در عین حال برای بزرگسالان نیز فعالیت‌های روزانه در فضای باز همچون خوردن غذا در فضای باز، پاک کردن عرق و نشستن دست‌ها یا صورت قبل از خوردن یا آشامیدن ممکن است احتمال بلع فلزات موجود در غبار را افزایش دهد^{۲۴}. با این وجود بر طبق نتایج HQ، خطرات غیر سرطان‌زایی از طریق هر سه مسیر برای کودکان و بزرگسالان در غبار خیابانی کرج کمتر از حد ایمن ۱ بود.

در رابطه با شاخص HI، کروم و سرب بیشترین خطر را در کلیه ایستگاه‌های نمونه‌برداری برای کودکان و بزرگسالان به همراه داشتند. مشابه با HQ، مقادیر HI برای فلزات مطالعه شده همگی کمتر از حد ایمن ۱ بودند که نشان‌دهنده عدم

وجود خطر غیر سرطانزایی جدی در مواجهه با این فلزات برای کودکان و بزرگسالان است. با این وجود افزایش دفعات تماس و یا نرخ بلع می‌تواند منجر به بروز آثار مضر غیر سرطانزایی در بافت‌های کودکان شود، به‌ویژه سرب در محیط شهری تاثیر قابل توجهی بر سلامت کودکان دارد و بلع غبار یا خاک آلوده یکی از منابع اصلی سرب موجود در خون برای کودکان است. با در نظر گرفتن افزایش فراوانی مواجهه یا نرخ بلع کودکان، تماس با غبار آلوده برای کودکان می‌تواند خطرات بهداشتی بالقوه بیشتری را به همراه داشته باشد^{۲۴}. فلزات می‌توانند برای مدت طولانی در بدن تجمع یابند و مخصوصاً آثار مضر غیر سرطانزایی Cd، Pb و Cr در بزرگسالان کاملاً جدی است.

نتایج ارزیابی خطر سرطانزایی نشان داد که سطح خطر سرطانزایی برای Ni در کلیه مناطق و برای Cd در اغلب مناطق (به استثنای فردیس) کمتر از معیار احتیاطی پذیرفته شده در سطح بین‌المللی (۱۰^{-۶}) و برای فلزات Cr و به‌ویژه Co کمی بالاتر و در دامنه مقادیر آستانه (۱۰^{-۴} تا ۱۰^{-۶}) در کلیه مناطق است. بنابراین توصیه می‌شود که غلظت فلزات Cr، Co و Cd به طور منظم پایش و اقدامات کنترلی در این زمینه صورت گیرد. در نهایت ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که نتایج ارزیابی خطر بهداشتی برای مواجهه ساکنین شهر کرج با غبار خیابانی تحت تاثیر درجه‌ای از عدم قطعیت است که مرتبط با برآوردهای مقادیر سمیت و پارامترهای مواجهه است. نرخ بلع/تنفس، وزن بدن، فراوانی و مدت مواجهه، ناحیه پوستی در معرض و سایر پارامترهای استفاده شده در مدل ارزیابی خطر بهداشتی نیاز به بررسی بیشتر در منطقه مطالعه دارند. در عین حال در اینجا تنها سطوح عناصر و خطرات آن‌ها برای سلامت انسان در نمونه‌های غبار خیابانی تعیین شده است. در حالی که خطرات محیط‌زیستی فلزات در خاک، رسوب و غبار تنها مرتبط با مقادیر آن‌ها نیست بلکه همچنین به گونه آن‌ها در محیط بستگی دارد. بنابراین شناسایی

گونه فلزات در غبار خیابانی شهر کرج نیاز به بررسی در کارهای آینده برای آنالیز دقیق خطرات محیط‌زیستی آن‌ها دارد. از سوی دیگر، سایر فلزات (مانند آرسنیک، جیوه و آنتیموان) و مسیرهای مواجهه دیگر (مانند خاک‌های آلوده یا غبارهای داخل ساختمان) در این مطالعه در نظر گرفته نشده‌اند. با این حال این مدل به عنوان ابزار مفیدی برای ارزیابی خطر بهداشتی انسان در محیط‌های شهری مورد قبول واقع شده است و می‌تواند برای ارائه اطلاعات مرجع به عموم مردم و دولت در مورد ارزیابی خطرات بالقوه مواجهه با عناصر کمک نماید.

با توجه به نتایج این مطالعه مبنی بر آلودگی قابل توجه هوا در کلان‌شهر کرج، انجام اقدامات مدیریتی یکپارچه جهت بهبود کیفیت هوا ضروری به نظر می‌رسد. از جمله راهکارهای موثر در این زمینه می‌توان به پایش مستمر آلاینده‌های هوا جهت آگاهی از سطوح و میزان تاثیرگذاری آن‌ها، توسعه سیاست‌های کنترلی جامع و یکپارچه، برنامه‌ریزی‌های بلند مدت در راستای بهبود کیفیت هوا و توسعه فضای سبز اشاره نمود. بر طبق نتایج این مطالعه و پژوهش‌های پیشین بخش حمل و نقل مشارکت قابل توجهی در انتشار آلاینده‌های هوا در شهر کرج دارد^{۲۵}. با توجه به گسترش سیستم حمل و نقل به‌ویژه در طی سال‌های اخیر در این کلان‌شهر، اصلاح کیفیت سوخت، بهبود کیفیت خودرو، نوسازی ناوگان وسایل نقلیه عمومی فرسوده، ترویج سیاست‌های تشویقی در جهت استفاده از وسایل نقلیه عمومی و تقویت شبکه یکپارچه اتوبوس‌رانی می‌تواند از جمله اقدامات مدیریتی موثر برای کاهش انتشار آلاینده‌ها در این بخش باشند. همچنین پایش مداوم صنایع و تدوین قوانین سختگیرانه در جهت رعایت مقررات محیط‌زیستی و انتقال صنایع آلاینده به محدوده‌های خارج از شهر از دیگر اقدامات موثر جهت بهبود کیفیت محیط‌زیست شهر کرج است.

نتیجه گیری

بررسی غلظت فلزات در غبار خیابانی شهر کرج نشان داد که در مقایسه با مقادیر پوسته‌ای، Cu, Zn, Cd و Pb دارای سطوح غلظتی بسیار بالا و Ni, Cr, Co, W و Ca دارای غلظت‌های نسبتاً بالا هستند. نتایج تحلیل خوشه‌ای پنج منبع عمده را برای فلزات در غبار خیابانی شهر کرج معرفی کرد: انتشارات ترافیکی، احتراق سوخت‌های فسیلی، فرایندهای صنعتی، فعالیت‌های ساختمانی و منابع طبیعی. مدل ارزیابی خطر بهداشتی نشان داد بلع ذرات غبار بیشترین سهم را در بروز خطر غیر سرطان‌زایی دارد. Pb و Cr بیشترین خطر و Zn, Co و Sr کمترین خطر غیر سرطان‌زایی را برای کودکان و بزرگسالان در غبار خیابانی شهر کرج نشان دادند. همچنین برآورد خطر سرطان‌زایی نشان داد فلزات Co و Cr در کلبه ایستگاه‌ها و Cd در برخی ایستگاه‌ها همراه با خطر سرطان‌زایی هستند که نیازمند اقدامات منظم پیشی و کنترلی در زمینه

کاهش غلظت هستند. به منظور بررسی دقیق‌تر خطرات بهداشتی، نیاز به تحقیقات بیشتری در شهر کرج است که با در نظر گرفتن کاستی‌های این مطالعه بتواند از عدم قطعیت‌های مرتبط با محاسبات ریسک بکاهد. با این حال نتایج این مطالعه اطلاعات پایه‌ای در اختیار دولتمردان و سیاست‌گذاران قرار می‌دهد که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آتی جهت مدیریت و رفع چالش‌های موجود در شهر کرج استفاده گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مادی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در قالب طرح تحقیقاتی با کد ۱۷۳۴-۲۲۳-۹۳ انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت مالی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

1. Bari MA, Kindzierski WB. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in Edmonton, Canada: Source apportionment and potential risk for human health. *Environ Pollut* 2016;218:219-29.
2. Breslow NE. Air pollution: consequences and actions for the UK, and beyond. *The Lancet* 2016; 387:817-916.
3. Rahman MS, Khan MD, Jolly YN, et al. Assessing risk to human health for heavy metal contamination through street dust in the Southeast Asian Megacity: Dhaka, Bangladesh. *Sci Total Environ* 2019;660:1610-22.
4. Lu X, Wu X, Wang Y, et al. Risk assessment of toxic metals in street dust from a medium-sized industrial city of China. *Ecotoxicol Environ Saf* 2014;106 154-63.
5. Men C, Liu R, Wang Q, et al. Uncertainty analysis in source apportionment of heavy metals in road dust based on positive matrix factorization model and geographic information system. *Sci Total Environ* 2019;652:27-39.
6. Gope M, Mastro RE, George J, et al. Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street dust of Asansol, India. *Ecotoxicol Environ Saf* 2017;138:231-41.
7. Dehghani S, Moore F, Keshavarzi B, Beverley AH. Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran. *Ecotoxicol Environ Saf* 2017;136:92-103.
8. Ghanavati N. Human health risk assessment of heavy metals in street dust in Abadan. *IJHE* 2018;11(1):63-74 [In Persian].
9. Keshavarzi B, Tazarvi Z, Rajabzadeh MA, Najmeddin A. Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran. *Atmos Environ* 2015;119:1-0.
10. Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, et al. Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran. *Sci Total Environ* 2015;505:712-23.
11. Ehtemae N, Ghanavati N, Nazarpour A, et al. Assessment of Potential Ecological and Human Health Risk of Some Selected Heavy Metals in Street Dusts in Ilam. *JWSS* 2020; 23(4):183-197 [In Persian].
12. Dastgoshadeh F, Tooni O, Moghadam Sheikhjan S, et al. Contamination assessment of heavy metals in dust of selected roads in Karaj, Iran. *J Environ Stud* 2014;40(2):331-44 [In Persian].

13. Halek, F. Vertical Profile of Particulate Matter Concentrations in Indoor Air (Case Study: Karaj, Iran). Part Sci Technol 2015;33(6): 617-620.
14. Sheikh N, Rezaei M, Shakeri A. Contamination and health risk assessment of potentially toxic metals and semi-metals in the dust of Karaj city. The 8th national conference & exhibition on environmental engineering; 7 November 2016; Tehran, Iran [In Persian].
15. Men C, Liu R, Xu F, et al. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China. Sci Total Environ 2018;612:138-47.
16. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC, USA, 2005.
17. EPA A. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual (part a). EPA/540/1-89/002. 1989.
18. EPA U. Soil screening guidance technical background document, office of solid waste and emergency response. EPA/540/R-95/128. 1996.
19. US Department of Energy. RAIS: Risk Assessment Information System. US Department of Energy, Washington DC. 2004.
20. WHO. Guidelines for Drinking Water Quality, vol. I. Recommendations, second ed. WHO, Geneva. 1993.
21. US EPA, Region 9, Regional Screening Levels. Available online at <http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/index.html>, 2010.
22. Taylor SR, McLennan SM. The geochemical evolution of the continental crust. Rev Geophys 1995;33(2):241-65.
23. Li H, Qian X, Hu W, et al. Chemical speciation and human health risk of trace metals in urban street dusts from a metropolitan city, Nanjing, SE China. Sci Total Environ 2013;456:212-21.
24. Suvarapu LN, Baek SO. Determination of heavy metals in the ambient atmosphere: A review. Toxicol Ind Health 2017;33(1):79-96.
25. Hu X, Zhang Y, Luo J, et al. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China. Environ Pollut 2011;159(5):1215-21.
26. Phil-Eze PO. Variability of soil properties related to vegetation cover in a tropical rainforest landscape. JGRP 2010;3(7):177-184.
27. Yuan GL, Sun TH, Han P, et al. Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China. J Geochem Explor 2014;136:40-7.
28. Ali-Taleshi MS, Moeinaddini M, Feiznia S, Squizzato S. Heavy metal pollution in street dust from Tehran in 2018: metal richness and degree of contamination assessment. J Environ Health Eng 2020; 7(2):179-194 [In Persian].
29. Najmeddin A, Moore F, Keshavarzi B, Sadegh Z. Pollution, source apportionment and health risk of potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban street dust of Mashhad, the second largest city of Iran. J Geochem Explor 2018;190:154-69.
30. Habibi H, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Potential Ecological Risk Assessment of Arsenic and Some Heavy Metals in Street Dusts Collected from Industrial, Commercial and Residential Areas of City of Hamedan in 2019 Using the Ecotoxicological Criteria. J Environ Health Eng 2021;8(2):1-3 [In Persian].
31. Ghanavati N, Nazarpour A. Environmental investigation of heavy metals concentration in Ahvaz city street dust, by using Geographical Information Systems (GIS). J Environ Stud 2018; 44(3): 393-410 [In Persian].
32. Abbasi S, Keshavarzi B, Moore F, et al. Investigation of microrubbers, microplastics and heavy metals in street dust: a study in Bushehr city, Iran. Environ Earth Sci 2017;76(23):1-9.
33. Kamani H, Ashrafi SD, Isazadeh S, et al. Heavy metal contamination in street dusts with various land uses in Zahedan, Iran. Bull Environ Contam Toxicol. 2015;94(3):382-6.
34. Nematollahi MJ, Dehdaran S, Moore F, Keshavarzi B. Potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust of Yazd, a central capital city in Iran: contamination level, source identification, and ecological-health risk assessment. Environ Geochem Health 2021;43(1):485-519.
35. Ehtemae N, Ghanavati N, Nazarpour A, et al. Assessment of Potential Ecological and Human Health Risk of Some Selected Heavy Metals in Street Dusts in Ilam. JWSS 2020;23(4):183-97 [In Persian].
36. de Miguel E, Llamas JF, Chacón E, et al. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead. Atmos Environ 1997;31(17):2733-40.
37. Christoforidis A, Stamatis N. Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece. Geoderma 2009;151(3-4):257-63.
38. Rasmussen PE, Subramanian KS, Jessiman BJ. A multi-element profile of house dust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada. Sci Total Environ 2001;267(1-3):125-40.
39. Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. Atmos Environ 2005;39(25):4501-12.

40. Lee PK, Yu YH, Yun ST, Mayer B. Metal contamination and solid phase partitioning of metals in urban roadside sediments. *Chemosphere* 2005;60(5):672-89.
41. Faiz Y, Tufail M, Javed MT, Chaudhry MM. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along islamabad expressway, Pakistan. *Microchem J* 2009;92(2):186-92.
42. Yang T, Liu Q, Li H, et al. Anthropogenic magnetic particles and heavy metals in the road dust: Magnetic identification and its implications. *Atmos Environ* 2010;44(9):1175-85.
43. Sobhanardakani S. Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biol Trace Elem Res* 2019;187(2):602-10.
44. Gao J, Tian H, Cheng K, et al. The variation of chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China. *Atmos Environ* 2015;107:1-8.
45. Pan H, Lu X, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution. *Sci Total Environ* 2017;609:1361-9.
46. Zannoni D, Valotto G, Visin F, Rampazzo G. Sources and distribution of tracer elements in road dust: the Venice mainland case of study. *J Geochem Explor* 2016;166:64-72.
47. Bukowiecki N, Lienemann P, Hill M, et al. PM₁₀ emission factors for non-exhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland. *Atmos Environ* 2010;44(19):2330-40.
48. Gietl JK, Lawrence R, Thorpe AJ, Harrison RM. Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road. *Atmos Environ* 2010; 44(2): 141-6.
49. Urrutia-Goyes R, Hernandez N, Carrillo-Gamboa O, et al. Street dust from a heavily-populated and industrialized city: Evaluation of spatial distribution, origins, pollution, ecological risks and human health repercussions. *Ecotoxicol Environ Saf* 2018;159:198-204.
50. Ramírez O, de la Campa AM, Amato F, et al. Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Sci Total Environ* 2019;652:434-46.
51. Yadav IC, Devi NL, Singh VK, et al. Spatial distribution, source analysis, and health risk assessment of heavy metals contamination in house dust and surface soil from four major cities of Nepal. *Chemosphere*. 2019;218:1100-13.
52. Salmanzadeh M, Saeedi M, Nabi BG. Heavy metals pollution in street dusts of Tehran and their ecological risk assessment. *J Environ Sci* 2012;38(1):9-18 [In Persian].
53. Wei X, Gao B, Wang P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China. *Ecotoxicol Environ Saf* 2015;112:186-92.
54. Moeinaddini M, Ali-Taleshi MS, Azimi Yancheshmeh R. Spatial modelling of air pollutants emission from mobile sources in Karaj metropolis. *J Nat Environ* 2017;70(4):935-47 [In Persian].

Health Risk Assessment of Metals in Street Dust of Karaj City in 2018

Rokhsareh Azimi-Yancheshmeh^{*1}, Mazaher Moeinaddini², Sohrab Mazloomi³, Sadat Feyz Nia⁴, Reza Shahbazi⁵

¹ Ph.D. in Environmental Science, Environmental pollutions Expert of Department of Environment, Tehran, Iran,

² Ph.D. in Environmental science, Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³ Ph.D. in Environmental Science, Coastal ecosystems Expert of Department of Environment, Tehran, Iran

⁴ Ph.D. in Geology, Retired Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁵ Ph.D. in Natural Resources, Researcher in Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI), Tehran, Iran

*Email:Rox.azimi@yahoo.com

Received: 28 June 2022 ; Accepted: 1 August 2022

ABSTRACT

Background: In the last two decades, air pollution has become a serious problem, leading to a variety of harmful health effects. Street dust is a complex combination of pollutants from different sources, which can be a good indicator of air quality in the urban environment. So, this study was conducted to assess the health risk of toxic metals associated with street dust and identify their emission sources.

Materials and Method: Dust samples were collected from three high-traffic districts in Karaj. After acid digestion, Cu, Zn, Cr, Mn, Ni, Ca, Ba, Sr, Li, Ti, Na, Mg, K, Fe, Al and V were measured using ICP-OES and Cd, Co, W and Pb were measured using ICP-MS.

Results: The results of the measurement of elements in the street dust of Karaj indicated that compared to the amounts of elements in the earth's crust, the concentration (mg/kg) of Cd ($\bar{X}=0.9$), Zn ($\bar{X}=479.15$), Cu ($\bar{X}=159.37$) and Pb ($\bar{X}=113.57$) were at a very high level and the concentration (mg/kg) of Ni ($\bar{X}=69.36$), Cr ($\bar{X}=93.96$), Co ($\bar{X}=21.06$), W ($\bar{X}=5.73$) and Ca ($\bar{X}=75900$) were at a relatively high level. In contrast, the concentrations of other elements (Ba, Mn, V, Sr, Ti, Li, Mg, Na, K, Fe, and Al) were in the range of values found in the earth's crust. Cluster analysis showed that Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Co, and Ca were mainly caused by anthropogenic activities, while other studied metals were associated with natural sources. Ingestion of dust particles was the main exposure pathway of toxic metals for both adults and children in Karaj. The Hazard Index (HI) in the children was higher than the adults, but it was lower than the safe level ($HI \leq 1$) in the both groups. Co, Cr and Cd had the highest carcinogenic risk among the studied metals.

Conclusion: The results of this study indicated that the street dust of Karaj is highly contaminated with toxic metals that long-term exposure with them can cause harmful effects, especially in children. Therefore, continuous monitoring of metal pollutants especially Co, Cr and Cd is recommended.

Keywords: Metals, Health risk, Street dust, Karaj