



Original Research Paper

The carcinogenic and non-carcinogenic effects of cadmium accumulated in suspended particles inside and outside the buildings of Karaj metropolis on human health in the winter

Shokoofeh Sajedi Sabegh, Nabiollah Mansouri *, Lobat Taghavi, Seyed Alireza Mirzahosseini

Department of Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Key Words

Carcinogenic risk
Non-carcinogenic risk
Spatial distribution
Inhalation
Land accumulation index
Enrichment factor

Abstract

Introduction: Air pollution has been a serious health-related problem to citizens existing in highly-polluted metropolitan cities where atmospheric dusts are contaminated with heavy metals.

Materials & Methods: In this study, 23 stations were selected in winter in 4 different parts of Karaj city to sample indoor and outdoor dusts. Passive sampling of internal and external angles and surfaces was performed. Samples were then prepared in the laboratory and injected by acid digestion to measure the concentration of cadmium using ICP-MS model HP-4500 equipped with ASX-520 autosampler. Based on the obtained concentrations, spatial distribution, Müller accumulation index (I_{geo}), enrichment factor (EF) and non- and carcinogenic health risks were examined.

Results: The results showed that the highest concentration of cadmium was in station No. 21 (outside the building) and in station No. 10 (inside the building). I_{geo} index showed values of -0.4 to -4 and -0.36 to 4.03 and EF index showed values of 2.8 to 48.59 and 2.34 to 48.57 for indoor and outdoor spaces, respectively. In addition, health risk in the three pathways of skin absorption, inhalation and digestion showed that the highest risk of non-carcinogenicity (children: $2.9E-01$ and adults: $3.0E-01$) and carcinogenicity (children: $2.5E-01$ and adults: $9.9E-01$) of cadmium was inhalation indoors.

Conclusion: Dust particles contaminated with heavy metals in the urban environment can pose a serious threat to the health of citizens, especially in highly-polluted metropolitan cities.

* Corresponding Author's email: nmansouirin@gmail.com, nmansouri@srbiau.ac.ir

Received: 22 June 2021; Reviewed: 23 July 2021; Revised: 24 September 2021; Accepted: 25 October 2021

(DOI): [10.22034/AEJ.2021.309941.2660](https://doi.org/10.22034/AEJ.2021.309941.2660)

اثرات سرطان زایی و غیر سرطان زایی کادمیم تجمع یافته در ذرات معلق داخل و خارج ساختمان های کلان شهر کرج بر سلامت انسان در فصل زمستان

شکوفه ساجدی سابق، نبی الله منصوری*، لعبت تقوی، سیدعلیرضا میرزاحسینی

گروه محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

کلمات کلیدی

خطر سرطان زایی
خطر غیر سرطان زایی
توزیع مکانی
جذب استنشاقی
شاخص زمین انباشتی
شاخص غنی شدگی

چکیده

مقدمه: یکی از مشکلات جدی مربوط به سلامت شهروندان ساکن کلان شهرهای بزرگ موضوع آلودگی هوا با گرد و غبار حاوی فلزات سنگین می باشد.

مواد و روش ها: در این مطالعه ۲۳ ایستگاه در فصل زمستان در ۴ بخش مختلف شهر کرج جهت نمونه برداری گرد و غبار فضای داخلی و خارجی ساختمان انتخاب شدند. نمونه برداری به روش غیر فعال از زوایا و سطوح داخلی و خارجی انجام شد. برای سنجش غلظت فلز کادمیم از دستگاه ICP-MS مدل ۴۵۰۰HP مجهز به اتوسمپلر ۵۲۰asx استفاده شد. توزیع مکانی، شاخص زمین انباشتی مولر (I_{geo})، شاخص غنی شدگی (EF) و ریسک سلامت غیر سرطان زایی فلز کادمیم مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج: بیشترین میزان غلظت فلز کادمیم در ایستگاه شماره ۲۱ در فضای بیرون ساختمان و در ایستگاه شماره ۱۰ در فضای داخلی ساختمان بوده است. شاخص I_{geo} مقادیر $-۰/۴$ تا ۴ و $-۰/۳۶$ تا $۴/۰۳$ و شاخص EF مقادیر $۲/۸$ تا $۴۸/۵۹$ و $۲/۳۴$ تا $۴۸/۵۷$ را به ترتیب برای فضای داخلی و خارج ساختمان نشان داد. ریسک سلامت در سه مسیر جذب پوستی، استنشاقی و گوارشی نشان داد که بیشترین میزان خطر غیر سرطان زایی (کودکان: $۲/۹ \times ۱۰^{-۱}$ و بزرگسالان: ۳×۱۰^{-۱}) و سرطان زایی (کودکان: $۲/۵ \times ۱۰^{-۱}$ و بزرگسالان: $۹/۹ \times ۱۰^{-۱}$) کادمیم از طریق مسیر استنشاقی برای گروه های هدف در محیط داخلی ساختمان بوده است.

بحث و نتیجه گیری: ذرات گرد و غبار آلوده به فلزات سنگین می توانند تهدید جدی برای سلامت شهروندان به خصوص در کلان شهرهای آلوده باشند.

مقدمه

با توسعه شهرنشینی و افزایش جمعیت میزان آلاینده‌های موجود در شهرها افزایش یافته است. هم‌چنین وقوع تغییرات جوی از جمله خشکسالی‌های مکرر و پدیده ریزگردها باعث هجوم گرد و غبار به محیط زیست انسان گردیده است (۱). فلزات سنگین موجود در دود وسایل نقلیه موتوری و احتراق سوخت‌های فسیلی توسط ذرات گرد و غبار به راحتی به اطراف پراکنده می‌شوند (۲). این شرایط برای شهرهای شلوغ و پرجمعیت نظیر تهران، کرج، پکن، نیویورک، دهلی و مسکو بیش از سایر مناطق به وقوع پیوسته است (۳). دود ناشی از سوخت‌های فسیلی حاوی فلزات سنگین، گازهای سمی، بخارات خطرناک و ذرات بسیار کوچکی است که به راحتی در هوا پراکنده می‌گردد. ذرات گرد و غبار نیز که عمدتاً ناشی از خیزش طوفان و بلند شدن ذرات با جریان باد هستند نیز به این مشکل افزوده است و هوای کلان‌شهرها را آلوده کرده است (۴). فلزات سنگین از جمله مهم‌ترین ترکیبات مضر و خطرناک موجود در هوای مناطق شهری و پرجمعیت می‌باشند. فلزات سرب، جیوه، کادمیم، نیکل، آرسنیک و کروم در گرد و غبار شهری و سایر نقاط و سطوح در مناطق شهری وجود دارند (۵). مطالعات زیادی در خصوص سنجش و اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در هوای کلان‌شهرها انجام شده است (۶). سوخت‌های فسیلی حاوی فلزات سنگین و بسیاری از ترکیبات بیماری‌زا و سرطان‌زا هستند که در محیط زیست شهری سلامت انسان و سایر موجودات زنده را تهدید می‌کنند. در تحقیقی به بررسی ارزیابی ریسک اکولوژیک برخی فلزات سنگین غبار انتشار یافته از صنایع غیرفلزی شهرستان اردکان یزد پرداخته شد، نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین غلظت روی، سرب، آرسنیک، آلومینیوم، کبالت، آهن، برلیوم و مولیبدن در کلیه نمونه‌ها به ترتیب ۹۶۱، ۶۲/۰۸، ۱۹/۱۹، ۱۳/۳۲، ۳۶۵۲۷/۹۱، ۱/۴۲ میلی گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. براساس شاخص آلودگی منفرد عناصر سرب، روی و آرسنیک در گروه آلودگی شدید و براساس شاخص منفرد، فاکتور آلودگی دو عنصر روی و آلومینیوم در گروه با آلودگی بسیار بالا قرار گرفتند. گروه آلودگی شاخص‌های تلفیقی درجه آلودگی و درجه آلودگی اصلاح شده به ترتیب قابل توجه تا بسیار بالا و متوسط تا بالا متغیر بود. براساس شاخص تلفیقی بار آلودگی، کلیه نمونه‌ها در گروه آلوده قرار گرفتند (۷). Halil و همکاران، به بررسی آلودگی زیست‌محیطی برخی از فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهر آبادان پرداختند. میانگین غلظت فلزات سنگین سرب، روی، مس، کروم، کادمیم، نیکل، وانادیوم، آرسنیک و کبالت به ترتیب ۱۳/۵۹، ۵۰/۲۸۷، ۹۷/۱۲۲، ۳/۵۰، ۵۰/۰۰، ۷۷/۵۶، ۸۳/۵۳، ۱۰/۷ و ۵۳/۷ میلی گرم بر کیلوگرم بود. براساس میانگین فاکتور غنی‌شدگی نیکل،

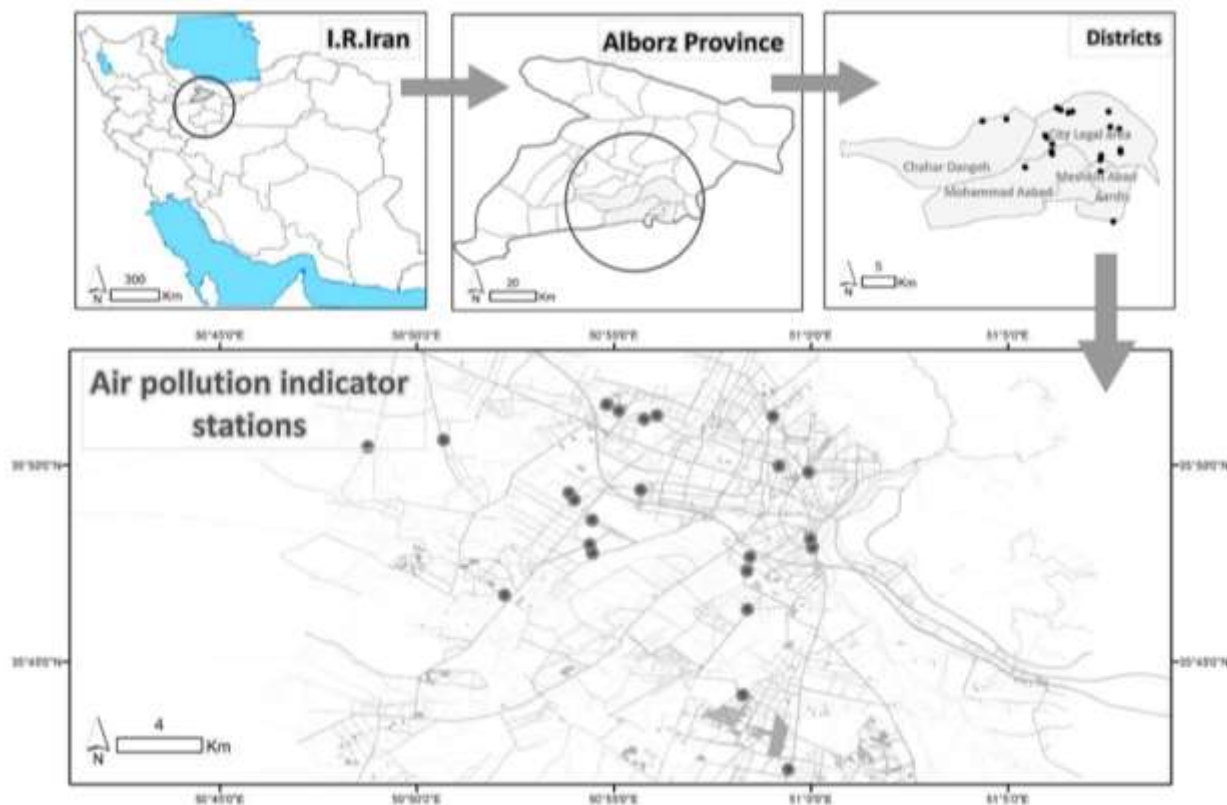
مس و سرب دارای آلودگی بسیار زیاد و روی دارای آلودگی به شدت زیاد بود. براساس میانگین شاخص آلودگی روی و سرب برای هوای مناطق شهری دارای آلودگی زیاد هستند (۸). کادمیم معمولاً به‌طور طبیعی در آب‌های سطحی و زیرزمینی وجود دارد. این عنصر ممکن است به‌صورت یون هیدراته یا ترکیبات پیچیده معدنی و یا آلی همراه با اسید هومیک یافت شود. کادمیم از طریق سنگ و خاک بستر، رسوبات آلوده اتمسفری ناشی از کارخانجات صنعتی، پساب مناطق آلوده و استفاده از لجن و کود در کشاورزی وارد اکوسیستم آبی می‌شود (۹). کادمیم یک فلز سنگین نسبتاً کمیاب بوده که به‌طور طبیعی نیز در خاک وجود دارد و به دلیل این که یکی از عناصر حاصل از سوخت خودروها می‌باشد در غبار خیابان قابل مشاهده است. این عنصر هم‌چنین در باتری و کاربراتور وسایل نقلیه کاربرد دارد و پس از احتراق بنزین به‌عنوان آلیاژ منتشر می‌گردد (۱۰). بنابراین تماس زیاد با انتشارات حاصل از غبار جاده‌ای مسمومیت با این عنصر را به همراه خواهد داشت. قرار گرفتن در معرض کادمیم به مدت طولانی باعث آسیب به اندام‌های مختلف بدن به‌ویژه کلیه، ریه، کبد، اسکلت، اعضای تناسلی و رگ‌های خونی می‌گردد (۱۱). کادمیم پس از جذب در بدن کودکان و بزرگسالان می‌تواند از مسیرهای مختلف نظیر سلول‌های کیسه‌های هوایی ریه، در سطح روده‌ها و سلول‌های سنگفرشی پوست وارد خون گردد و با سیدن به اندام‌های حیاتی بدن نظیر قلب، مغز، کلیه و کبد باعث بروز مسمومیت‌ها و انواع سرطان‌ها گردد (۱۲). فلزات سنگین بسته به نوع و ساختار شیمیایی که دارند می‌توانند به‌عنوان عامل خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی برای بدن انسان دسته‌بندی شوند (۱۳). این ترکیبات از مسیرهای مختلفی نظیر استنشاق، گوارش و سطح پوست بدن می‌توانند وارد بدن انسان شوند و به راحتی با ورود به سیستم گردش خون در اختیار سلول‌های بدن قرار گیرند (۱۴). ایجاد سرطان‌های مختلف، آسیب‌های کبدی، ناهنجاری‌های کلیوی، بیماری‌های مغز و اعصاب، ناهنجاری‌های تنفسی و بیماری‌های قلبی از مهم‌ترین عوارض فلزات سنگین موجود در گرد و غبار شهری است که سلامت انسان را تهدید می‌کند (۱۵). در این خصوص ظرفیت‌های بالقوه خطرناک فلزات سنگین با استفاده از روش‌های ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی برای گروه‌های هدف جامعه مطالعه می‌شود. ویژگی‌های ارزیابی ریسک سلامت فلزات سنگین ناشی از گرد و غبار جمع‌آوری شده بر روی فیلترهای هوای خانگی (۱۶)، مقایسه ویژگی‌های گرد و غبار داخلی در یک شهر صنعتی با گرد و غبار بیرون و ذرات معلق در جو (۱۷)، ویژگی‌ها، تقسیم منابع و ارزیابی ریسک سلامت قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین از طریق گرد و غبار خانگی در شش شهر چین (۱۷) و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و سلامت سطح فلزات سنگین در ارتباط با حجم ترافیک در گرد و غبار جاده مسقط عمان (۱۸) از

نزدیکی انسان باعث بروز خطرات سلامتی فراوانی می‌شود (۲۲). همچنین تماس با این ذرات در محیط‌های شلوغ شهری و خیابان‌ها می‌تواند برای افراد خارج از محیط‌های سر بسته مشکل آفرین باشد. این وضعیت به‌خصوص در فصل زمستان که شهرهای پرجمعیت و پر ترافیک با معضل وارونگی و سکون هوا مواجه هستند مانند کرج به مراتب مشکل‌سازتر می‌باشد. بنابراین هدف مطالعه حاضر ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی فلز کادمیوم تجمع یافته در گرد و غبار داخل و خارج ساختمان‌های شهر کرج در فصل زمستان می‌باشد که از طریق استنشاق، جذب گوارشی و جذب پوستی وارد بدن کودکان و بالغین می‌گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: در این مطالعه شهر کرج به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید (شکل ۱). تعداد ۲۳ ایستگاه در فصل زمستان و در چهار بخش منطقه پر ترافیک شهری و ایستگاه پمپ بنزین، بخش تجاری و بازار و منطقه صنعتی، منطقه کم ترافیک و مسکونی و منطقه فضای سبز یا کوهستانی انتخاب گردید.

جمله مطالعات انجام شده درخصوص ارزیابی خطر سلامت فلزات سنگین موجود در هوا می‌باشد. کلان‌شهر کرج به‌دلیل موقعیت جغرافیایی از لحاظ قرار گرفتن در مسیر شاه‌راه‌های ارتباطی بین غرب و جنوب کشور، دسترسی به جمعیت ساکن در تهران و نزدیکی این شهر به تهران، دارا بودن حجم بالای واحدهای صنعتی و استقرار صنایع استراتژیک و بزرگ، سبب رشد سریع جمعیت و در نتیجه، رشد روز افزون گستره شهر و تراکم جمعیتی خارج از ظرفیت شده است (۱۹). از مشکلات محیط‌زیستی که سلامت ساکنان شهر کرج را تهدید می‌کنند گرد و غبار حاوی فلزات سنگین سطح شهر کرج می‌باشد. منشاء فلزات سنگین موجود در گرد و غبار شهر کرج می‌تواند ناشی از دو منبع طبیعی مانند بیابان‌های اطراف شهر و منبع فعالیت‌های انسانی نظیر حمل و نقل و شهرک‌های صنعتی باشد (۲۰). از مهم‌ترین دلایل آلودگی شهر کرج استقرار صنایع و شهرک‌های صنعتی بسیار بزرگ، ترافیک بالای وسایل نقلیه موتوری، جمعیت بالا و رابط ترانزیتی شمال‌غرب کشور می‌باشد که به‌طرز چشمگیری در فصول سرد سال از جمله زمستان آلودگی‌های هوا در مقایسه با سایر فصول افزایش می‌یابد (۲۱). محیط‌های داخل و خارج ساختمان‌ها از جمله فضاهایی هستند که شهروندان در آن زندگی می‌کنند. نفوذ ذرات گرد و غبار به فضاهای داخلی منازل و تجمع و رسوب این ذرات در



شکل ۱: ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح کلان‌شهر کرج

درجه سانتی گراد قرارداده شدند تا عمل هضم انجام پذیرد (۲۲). پس از اتمام مراحل هضم، محلول با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ و کیف پلی اتیلنی در بالن ژوژه ۲۵ میلی لیتری صاف گردیده و نهایتاً با استفاده از آب دیونیز حجم محلول به ۲۵ میلی لیتر رسانده شد. تمام ظروف مورد استفاده، از قبل به مدت ۲۴ ساعت در اسید نیتریک ۵٪ قرار داده شد سپس با آب مقطر شستشو و خشک گردیدند. در ادامه برای اندازه گیری مقدار عناصر مورد مطالعه از دستگاه ICP-MS با مشخصات مدل HP-4500 (ساخت آمریکا)، مجهز به اتوسمپلر Asx-520 استفاده گردید. در ادامه میزان غلظت کادمیم با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$M \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{g}} \right) = \frac{(C \times V)}{W} \times A \quad (1)$$

که M بیانگر غلظت نهایی عناصر نمونه بر حسب $\mu\text{g/g}$ ، C بیانگر غلظت به دست آمده از دستگاه بر حسب $\mu\text{g/l}$ ، V بیانگر حجم نهایی نمونه بر حسب l (۰/۰۲۵)، W بیانگر وزن نمونه اولیه برای هضم اسیدی (g) و A بیانگر ضریب رقت است.

شاخص های مورد بررسی

ارزیابی شدت آلودگی نمونه های گرد و غبار: در محیط زیست معیارها و شاخص های مختلفی به منظور ارزیابی و تعیین شدت آلودگی وجود دارد. در این مطالعه میزان آلودگی نمونه های گرد و غبار با استفاده از شاخص زمین انباشتگی مولر (I_{geo}) و شاخص غنی شدگی (EF) ارزیابی شد. شاخص زمین انباشتگی مولر براساس رابطه ۲ و شاخص غنی شدگی براساس رابطه ۳ محاسبه شدند.

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5 B_i} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه I_{geo} شاخص زمین انباشتگی، C_i غلظت فلز سنجش شده در نمونه و B_i غلظت زمینه فلز که معادل ۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم برای کادمیم است. مقادیر محاسبه شده شاخص زمین انباشتگی براساس جدول ۱ گروه بندی گردیدند.

جدول ۱: درجات مختلف فاکتور زمین انباشتگی در شدت های مختلف

سطح	فاکتور زمین انباشتگی
غیر آلوده	$I_{\text{geo}} \leq 0$
غیر آلوده تا آلودگی متوسط	$0 < I_{\text{geo}} < 1$
آلودگی متوسط	$1 < I_{\text{geo}} < 2$
آلودگی متوسط تا شدید	$2 < I_{\text{geo}} < 3$
آلودگی شدید	$3 < I_{\text{geo}} < 4$
آلودگی شدید تا بسیار شدید	$4 < I_{\text{geo}} < 5$
آلودگی بسیار شدید	$I_{\text{geo}} > 5$

$$EF = \frac{\left(\frac{C_n}{C_{Fe}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{C_n}{C_{Fe}} \right)_{\text{Background}}} \quad (3)$$

اطلاعات آب و هوایی شامل وزش باد بسیار ملایم با سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت، جهت وزش غربی-شرقی، رطوبت ۳۴ درصد و هوای کاملاً صاف و آفتابی و بدون بارش برای روزهای نمونه برداری از ایستگاه هواشناسی اخذ شدند. نقاط نمونه برداری به نحوی انتخاب شدند که کل منطقه مورد مطالعه را تحت پوشش قرار دهند. نمونه های رسوب از داخل و خارج ساختمان ها به روش غیرفعال از زوایای داخلی ساختمان که قابل ماندگاریست براساس روش انجام شده توسط Ghanavati با کمی تغییرات انجام گردید (۲۳). نمونه های گرد و خاک از گوشه های اتاق در حاشیه دیوار که قابل تمیز کردن نباشد یا از کادر کناف سقفی و یا روی کابینت ها که مدت طولانی تمیز نشده باشد و بالای قاب عکس ها و یا حاشیه لوسترها به میزان ۳ تا ۵ گرم برداشت شد. در نمونه های خارج از ساختمان هم از گوشه لبه طاقچه پنجره ها که سایبان داشته و بارندگی آن را تحت تاثیر قرار نداده و یا زیر پله های بیرون ساختمان و گوشه حیاط برداشت شد. این نمونه برداری با استفاده از قلم موی کوچک نقاشی و یک مقوای نازک جمع آوری و بلافاصله در ظروف نمونه برداری پلاستیکی کوچک ریخته شد و به آزمایشگاه منتقل گردید.

آنالیزهای آزمایشگاهی و سنجش غلظت کادمیم: برای آماده

سازی و هضم شیمیایی نمونه ها از لوله های هضم جهت هضم اسیدی نمونه ها، الک مش ۶۳ میکرون، اسید نیتریک ۶۵٪ و اسید پرکلریک ۷۰٪ با درجه خلوص بسیار بالا که همگی از شرکت مرک آلمان تهیه گردید. کیف پلی اتیلنی، کاغذ صافی واتمن ۴۲ و بالن ژوژه های ۲۵ میلی لیتری برای صاف کردن نمونه های هضم شده، کاغذ صافی واتمن ۴۲، Sampler (برند آلمان) یک میلی لیتری، پیپت و قوطی پلی اتیلنی ۱۰۰ میلی لیتری جهت نگهداری نمونه های هضم شده، آماده سازی نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت (۲۴). نمونه های گرد و غبار پس از ارسال به آزمایشگاه در داخل دسیکاتور قرار داده شدند (۲۵). سپس با الک سایز ۶۳ میکرون الک شده و در نهایت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد در آون به مدت یک شبانه روز (۲۴ ساعت) خشک شدند (۲۶). پس از خشک شدن نمونه ها تقریباً ۰/۲۵ گرم از گرد و غبار الک شده را با ترازوی دیجیتالی (دقت ۰/۰۰۰۱ گرم مدل AAA 250 L شرکت Adam Equipment انگلستان) وزن کرده و در داخل لوله های پلی اتیلنی مخصوص هضم ریخته و برای هضم شیمیایی نمونه ها از ترکیب اسید نیتریک و اسید پرکلریک استفاده شد. به منظور هضم اسیدی نمونه ها، ابتدا مقدار ۱ گرم از نمونه ای آماده شده توزین و داخل لوله های پلی اتیلنی ریخته شد و به مقدار ۸ میلی لیتر اسید نیتریک به آن اضافه گردید. سپس ۴ میلی لیتر اسید پرکلریک به نمونه ها اضافه شد و لوله های پلی اتیلنی را به مدت ۱ ساعت داخل دستگاه هاضم با درجه ۸۰ درجه سانتی گراد و ۳ ساعت دمای ۱۵۰

به صورت متوسط)، CDI_{inh} جذب روزانه مزمن از مسیر تنفسی بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم بر روز، $InhR$ نرخ تنفسی، PEF فاکتور توزیع ذرات بر حسب مترمکعب بر کیلوگرم، CDI_{dermal} جذب روزانه مزمن از طریق مسیر پوستی بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم بر روز و SA سطح تماس پوست بدن بر حسب سانتی متر مربع می باشد.

$$HQ_{inh} = \frac{Dinh}{RfCi \times 1000 \mu g \text{ mg}^{-1}} \quad (7)$$

$$HQ_{ing} = \frac{Ding}{RfDo} \quad (8)$$

$$HQ_{dermal} = \frac{Ddermal}{RfDo \times GIABS} \quad (9)$$

در این روابط HQ فاکتور خطر غیر سرطان زایی، D مقدار به دست آمده جذب مزمن روزانه، Rf دوز رفرنس فلز می باشد.

خطر سرطان زایی: در این مطالعه خطر سرطان زایی فلز کادمیم از مسیرهای جذب گوارشی، استنشاقی و پوستی بر اساس دستورالعمل و روابط محاسباتی ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند (۳۱):

$$CR_{ing} = D_{ing} \times SFo \quad (10)$$

$$CR_{dermal} = D_{dermal} \times (SFo / GIABS) \quad (11)$$

$$CR_{inh} = IUR \times D_{inh} \quad (12)$$

که در این روابط SFo فاکتور شیب دهانی، $RfDo$ دوز رفرنس، $RfCi$ غلظت رفرنس تنفسی، $GIABS$ فاکتور جذب دستگاه گوارشی، IUR ریسک واحد تنفسی می باشد (۳۱).

آنالیز آماری: به منظور انجام محاسبات ارزیابی ریسک از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ استفاده گردید. هم چنین از نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ برای بررسی نرمال بودن داده ها و تست کلو موگرواسمیرنو و شاپیروویک استفاده گردید. هم چنین برای رسم نقشه ها از نرم افزار تخصصی ArcGIS نسخه ۱۰.۸.۱.۱ استفاده شد.

نتایج

نتایج حاصل از توزیع فضایی غلظت فلز کادمیم در ۲۳ ایستگاه نمونه برداری در شکل ۲ (فضای بیرون ساختمان ها) و ۳ (فضای داخل ساختمان ها) نشان داده شده است. بر اساس نتایج مشخص گردید که بیشترین غلظت فلز کادمیم در ایستگاه شماره ۲۱ در فضاهای خارج از ساختمان بوده است. هم چنین بیشترین میزان غلظت کادمیم در ایستگاه های نمونه برداری شده از فضاهای داخل ساختمان ها مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ بوده است.

که در این رابطه C_n غلظت فلز بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم، C_{Fe} غلظت فلز آهن در نمونه ها بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم، B_n غلظت زمینه فلز در پوسته زمین و B_{Fe} غلظت زمینه فلز آهن در پوسته زمین بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم می باشد. مقادیر محاسبه شده فاکتور غنی شدگی بر اساس جدول ۲ گروه بندی گردیدند.

جدول ۲: درجات مختلف فاکتور غنی شدگی در شدت های مختلف

فاکتور غنی شدگی	شدت غنی شدگی
$EF < 2$	کم
$2 \leq EF < 5$	متوسط
$5 \leq EF < 20$	قابل توجه
$20 \leq EF < 40$	خیلی زیاد
$EF \geq 40$	به شدت زیاد

ارزیابی ریسک سلامت: ارزیابی ریسک خطر برای کودکان (میانگین سنی ۶ سال) و بزرگسالانی (میانگین سنی ۶۰ سال) که در معرض عناصر سمی موجود در گرد و غبار می باشند، با استفاده از یک مدل ارزیابی ریسک توسعه یافته توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده انجام گردید (۲۷، ۲۸). محاسبه برای سه مسیر اصلی گوارشی، استنشاقی و پوستی در معرض قرارگیری با عناصر سمی موجود در گرد و غبار انجام گرفت (۲۹).

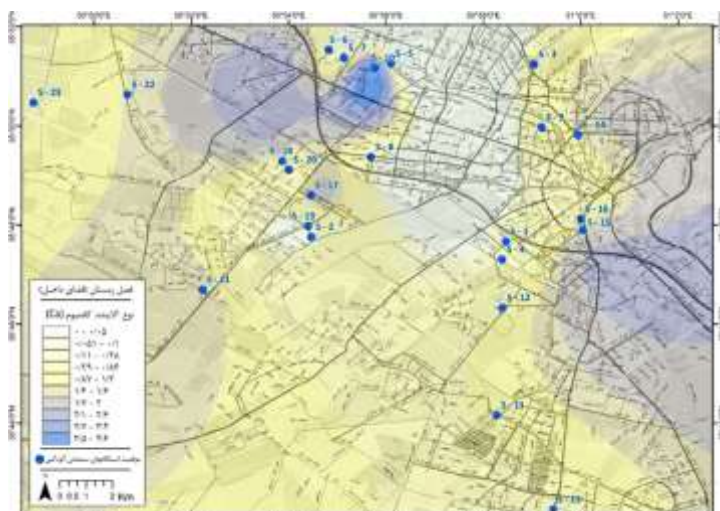
خطر غیر سرطان زایی: خطر غیر سرطان زایی برای عنصر کادمیم طبق رابطه ۴ محاسبه گردید. با استفاده از معادلات زیر میزان جذب روزانه مزمن (CDI) برای هر عنصر با هر کدام از سه روش در معرض گیری محاسبه گردید (۲۷، ۲۸، ۳۰). توضیحات و مقادیر فاکتورهای مورد استفاده در معادلات در جدول ۴ نشان داده شده است.

$$CDI_{ing} \left(\frac{mg}{kg \text{ day}} \right) = \frac{C \times IngR \times EF \times ED \times 10^{-6}}{AT \times BW} \quad (4)$$

$$CDI_{inh} \left(\frac{mg}{kg \text{ day}} \right) = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{AT \times BW \times PEF} \quad (5)$$

$$CDI_{dermal} \left(\frac{mg}{kg \text{ day}} \right) = \frac{C \times EF \times ED \times SA \times AF \times ED}{AT \times BW} \quad (6)$$

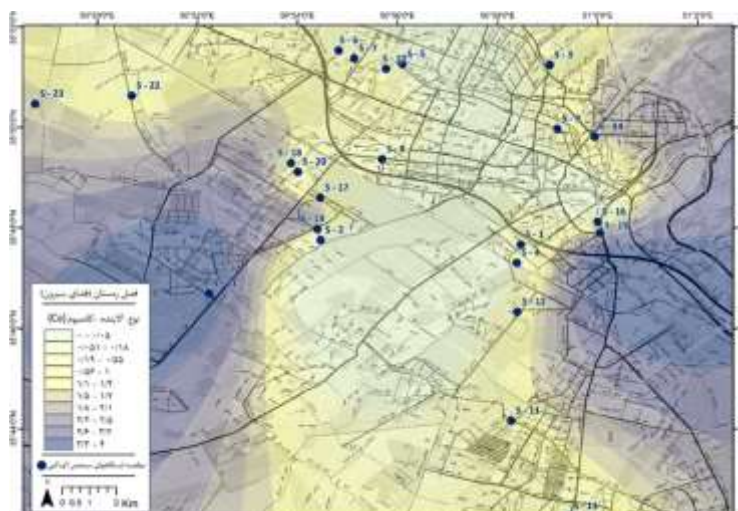
که در این روابط CDI_{ing} جذب روزانه مزمن فلز بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم بر روز، C غلظت فلز بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم، $IngR$ نرخ هضم، EF فراوانی روزهای در معرض قرارگیری بر حسب روز در سال، ED طول مدت در معرض قرارگیری بر حسب سال، AT میانگین زمان در معرض قرارگیری (برای ریسک غیر سرطان زایی $ED \times 365$)، BW وزن بدن بر حسب کیلوگرم (بالغین ۶۰ و کودکان ۳۰ کیلوگرم)



شکل ۳: نقشه توزیع مکانی فلز کادمیوم موجود در ذرات معلق و گرد و غبار رسوب شده در ایستگاه‌های مسکونی تجاری اداری و پر ترافیک و فضای سبز صورت پهنه‌بندی در فضای داخل ساختمان در کلان‌شهر کرج در فصل زمستان ۱۳۹۸

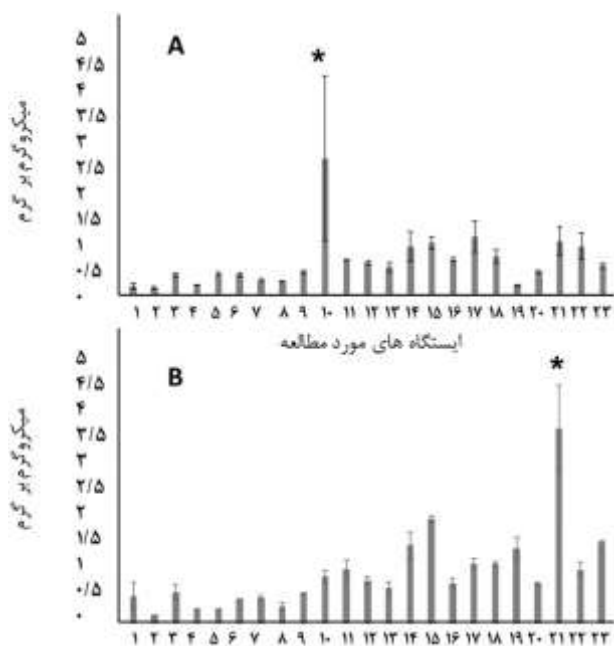
ساختمان و ۲۱ در فضای خارج ساختمان با بالاترین مقدار شاخص غنی‌شدگی (در محدوده ۴۸/۵) در گروه به "شدت زیاد" طبقه‌بندی شدند و سایر ایستگاه‌ها درجات مختلفی از آلودگی زیاد و قابل توجه را نشان دادند. نوع منشأ کادمیوم در رسوبات جمع‌آوری شده از نوع انسانی ارزیابی گردید. مقایسه میزان کادمیوم در داخل و خارج ساختمان در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان کادمیوم در فصل سرد در داخل ساختمان مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ مطب دندان‌پزشکی در حصارک بالا واقع در میدان شهرداری به میزان $3/6 \pm 2/16$ میکروگرم بر گرم (شکل ۲A) (میانگین کل ایستگاه‌ها $0/90 \pm 0/20$) و در خارج ساختمان در ایستگاه شماره ۲۱ واقع شده در چهار باغ، میدان چهار باغ، بلوار شهدا، مغازه ابزارآلات به میزان $3/67 \pm 0/8$ میکروگرم بر گرم بوده است (شکل ۲B) (میانگین کل ایستگاه‌ها $0/95 \pm 0/12$).

ریسک سلامت انسانی: نتایج حاصل از ارزیابی ریسک سلامت انسانی برای دو گروه کودکان و بالغین در جدول ۴ ارائه شده است. بر این اساس نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی برای کودکان و بالغین در فضای داخلی ساختمان‌ها و از طریق مسیر استنشاقی بوده است. هم‌چنین کادمیم تجمع یافته بر گرد و غبار موجود در فضاهای خارجی که از طریق مسی استنشاقی می‌تواند برای کودکان و بالغین خطر داشته باشد، دارای کم‌ترین میزان ریسک سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی بود.



شکل ۲: نقشه توزیع مکانی فلز کادمیوم موجود در ذرات معلق و گرد و غبار رسوب شده در ایستگاه‌های مسکونی تجاری اداری و پر ترافیک و فضای سبز صورت پهنه‌بندی در فضای بیرون ساختمان در کلان‌شهر کرج در فصل زمستان ۱۳۹۸

شاخص‌های زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی: نتایج حاصل از ارزیابی شاخص‌های زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی در محیط‌های داخل ساختمان و خارج ساختمان در فصل زمستان در جدول ۳ آورده شده است. براساس نتایج مشخص گردید که کم‌ترین میزان شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) در فضای داخل ساختمان مربوط به ایستگاه شماره ۲ به مقدار $-0/04$ و بیش‌ترین میزان آن مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ به مقدار $4/00$ بوده است. هم‌چنین مقادیر این شاخص برای فضاهای خارج ساختمان در فصل زمستان کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار را به ترتیب در ایستگاه شماره ۲ به میزان $-0/36$ و ایستگاه شماره ۲۱ به میزان $4/03$ نشان داد (جدول ۳). میانگین شاخص زمین‌انباشت کادمیم برای فضای داخل و خارج ساختمان‌ها در فصل زمستان به ترتیب $1/68 \pm 0/96$ و $1/75 \pm 1$ ارزیابی گردید. براساس طبقه‌بندی جدول ۱ ایستگاه‌های شماره ۱۰ در فضای داخل ساختمان و ۲۱ در فضای خارج ساختمان با بالاترین مقدار شاخص زمین‌انباشت (در محدوده ۴) در گروه با "آلودگی شدید" طبقه‌بندی شدند و سایر ایستگاه‌ها درجات مختلفی از آلودگی متوسط را نشان دادند. هم‌چنین کم‌ترین میزان شاخص غنی‌شدگی (EF) در فضای داخل ساختمان مربوط به ایستگاه شماره ۴ به مقدار $2/80$ و بیش‌ترین میزان آن مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ به مقدار $48/59$ بوده است. هم‌چنین مقادیر این شاخص برای فضاهای خارج ساختمان در فصل زمستان کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار را به ترتیب در ایستگاه شماره ۲ به میزان $2/34$ و ایستگاه شماره ۲۱ به میزان $48/57$ نشان داد (جدول ۳). بر اساس طبقه‌بندی جدول ۲ ایستگاه‌های شماره ۱۰ در فضای داخل



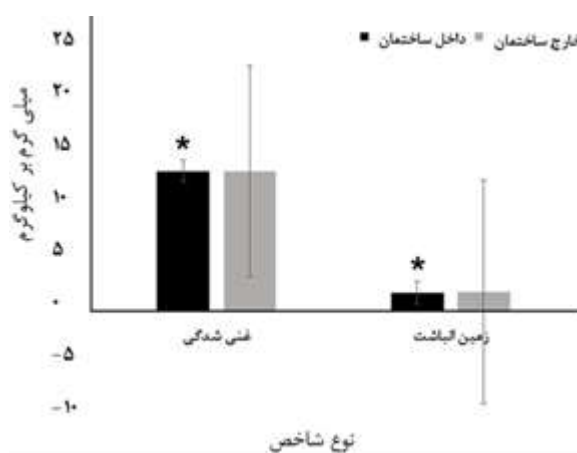
شکل ۵: مقایسه بین میزان غلظت کادمیم در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری شده در فضای داخل ساختمان (A) و خارج ساختمان (B)

بحث

مشکل گرد و غبار شهری در طی یک دهه اخیر به یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی و بهداشتی در شهرهای پرجمعیت و شلوغ تبدیل شده است. این معضل که عمدتاً به علت وقوع خشکسالی‌های طولانی و تغییرات اقلیمی ایجاد شده است به همراه فلزات سنگین معلق در هوای آلوده شهرها وضعیت به مراتب نامناسب‌تری را برای محیط زیست انسانی فراهم نموده است (۱۰). آلودگی هوای ناشی از سوخت‌های فسیلی و وسایل نقلیه موتوری حاوی فلزات سنگین و سمی از جمله سرب، جیوه، آرسنیک، کادمیم، نیکل و کروم هستند که می‌توانند از مسیرهای مختلف از جمله گوارشی، استنشاقی و پوستی جذب بدن شده و در اندام‌های مختلف باعث بروز بیماری‌های متعدد از جمله سرطان ریه، سرطان کبد، سرطان‌های پوستی، بیماری‌های گوارشی، حملات قلبی، ضعف و بی‌حالی و از کار افتادن برخی اندام‌های حیاتی نظیر کلیه‌ها شود (۲۶). گرد و غبار موجود در محدوده زیست انسان در فضاهای باز و فضاهای بسته همواره به عنوان یک ناقل عمل نموده و باعث انتقال فلزات سنگین به محیط زیست انسان می‌گردد (۳۲). در این خصوص نتایج تحقیق پیش‌رو نشان داد که در شهر پرجمعیت و شلوغ کرج فلز کادمیم در ایستگاه‌های مختلف غلظت‌های گوناگونی را نشان داده‌اند. همچنین با توجه به بروز پدیده‌های جوی تشدیدکننده وضعیت آلودگی هوا در فصل زمستان از جمله سکون و وارونگی دمایی لذا این فصل به عنوان یکی از آلوده‌ترین فصول در کلان‌شهر کرج انتخاب گردید. نتایج تحقیق پیش‌رو نشان داد که

جدول ۳: مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) و غنی‌شدگی (EF) در ایستگاه‌های مختلف و فضاهای داخل و خارج ساختمان‌های نمونه‌برداری شده

ایستگاه	شاخص زمین‌انباشتگی		شاخص غنی‌شدگی	
	داخل ساختمان	خارج ساختمان	داخل ساختمان	خارج ساختمان
۱	۰/۲۳	۱/۲۱	۴/۰۸	۶/۹۵
۲	-۰/۰۴	-۰/۳۶	۳/۳۹	۲/۳۴
۳	۱/۳۲	۱/۴۳	۵/۲۲	۷/۵۵
۴	۰/۴۲	۰/۳۰	۲/۸۰	۳/۴۵
۵	۱/۳۵	۰/۳۰	۱۳/۵۱	۳/۱۵
۶	۱/۳۳	۱/۰۵	۱۳/۳۳	۵/۲۹
۷	۰/۸۹	۱/۱۵	۶/۹۸	۶/۲۴
۸	۰/۷۶	۰/۵۹	۶/۳۸	۴/۲۴
۹	۱/۴۹	۱/۳۵	۸/۴۸	۷/۰۲
۱۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴۸/۵۹	۱۰/۹۹
۱۱	۲/۰۷	۲/۲۰	۱۳/۳۹	۱۳/۶۸
۱۲	۱/۹۶	۱/۸۶	۱۲/۳۶	۱۰/۸۱
۱۳	۱/۷۷	۱/۶۱	۱۰/۶۴	۱۰/۱۸
۱۴	۲/۵۲	۲/۷۳	۱۷/۹۹	۲۲/۰۳
۱۵	۲/۶۳	۳/۱۴	۹/۲۶	۱۴/۷۱
۱۶	۲/۰۹	۱/۷۹	۶/۳۵	۵/۷۷
۱۷	۲/۷۹	۲/۳۳	۲۲/۰۹	۱۷/۹۲
۱۸	۲/۲۱	۲/۳۴	۱۴/۷۰	۱۷/۹۸
۱۹	۰/۳۳	۲/۶۶	۵/۲۰	۱۹/۳۰
۲۰	۱/۵۱	۱/۷۷	۱۱/۷۲	۱۰/۴۳
۲۱	۲/۶۸	۴/۰۳	۱۸/۷۳	۴۸/۵۷
۲۲	۲/۵۳	۲/۱۹	۱۶/۹۱	۱۳/۵۴
۲۳	۱/۸۲	۲/۷۸	۱۵/۲۴	۲۴/۵۷



شکل ۴: مقایسه مقادیر شاخص زمین‌انباشت و غنی‌شدگی در دو محیط داخل و خارج ساختمان در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه

غلظت فلز کادمیم در فضای خارجی ساختمان‌ها $0/52$ میلی گرم بر کیلوگرم بوده است. در مطالعه حاضر میانگین غلظت کادمیم در کل ایستگاه‌های سنجش شده در محیط داخلی ساختمان‌ها $0/90 \pm 0/20$ و در محیط خارجی ساختمان‌ها $0/95 \pm 0/12$ میکروگرم بر گرم بوده است. در مطالعه دیگری که Karyab و همکاران، روی خطر سلامتی ناشی از مواجهه با کادمیم در گرد و غبار خشک اتمسفری انجام دادند، میانگین غلظت کادمیم در گرد و غبار خشک اتمسفری شهر قزوین $0/164$ میلی گرم در کیلوگرم اندازه گیری شد (۳۴). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بیشترین میزان کادمیم در محیط داخلی ساختمان مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ (مطب دندان پزشکی در حصارک بالا واقع در میدان شهرداری) به میزان $2/16 \pm 2/6$ میکروگرم بر گرم (شکل ۲A) و در خارج ساختمان در ایستگاه شماره ۲۱ (واقع شده در چهار باغ، میدان چهار باغ، بلوار شهدا، مغازه ابزار آلات) به میزان $3/67 \pm 0/8$ میکروگرم بر گرم بوده است (شکل ۲B). با این حال میانگین غلظت کادمیم اندازه گیری شده در دو محیط داخلی و خارج ساختمان تفاوت معنی داری را نشان نداد.

بیشترین غلظت فلز کادمیم در ایستگاه شماره ۲۱ در فضاهای خارج از ساختمان بوده است. همچنین بیشترین میزان غلظت کادمیم در ایستگاه‌های نمونه برداری شده از فضاهای داخل ساختمان‌ها مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ بوده است. براساس مطالعات نقشه کلان شهر کرج و داده‌های ترافیکی هر دو ایستگاه ۱۰ و ۲۱ در محدوده‌های پرتراфик و با حجم بالای تردد وسایل نقلیه موتوری قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین دلیل برای این نوع تغییرات وجود فعالیت‌های صنعتی، مناطق مسکونی پرتراکم، ترافیک سنگین در این مناطق و موقعیت آن‌ها در شهر کرج بوده است. از نظر موقعیتی دو ایستگاه مذکور در مکان‌های آلوده و پرتردد شهری با حداکثر آلودگی فلزات سنگین و گرد و غبار شهری واقع شده‌اند (۱۹). در همین رابطه نتایج مطالعات Shokri و Ragheb، Sobhan Ardakani، نشان داد که بیشترین غلظت فلزات سنگین کبالت، کروم و منگنز در رسوبات خشک اتمسفری هوای شهر همدان مربوط به ایستگاه‌های واقع در محدوده‌های پرتراфик بوده است (۳۳). از این نظر نتایج این تحقیق با یافته‌های مطالعه پیش‌رو مطابقت دارد. در مطالعه دیگری Ghanavati، در مطالعه خطرات سلامتی فلزات سنگین موجود در گرد و غبار خیابانی شهر آبادان نشان داد که

جدول ۴: ریسک سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی فلز کادمیم در فضاهای داخلی و خارجی کلان شهر کرج

آمار	فضای داخل				فضای خارج			
	خطر غیر سرطان‌زایی		خطر سرطان‌زایی		خطر غیر سرطان‌زایی		خطر سرطان‌زایی	
	کودکان	بالغین	کودکان	بالغین	کودکان	بالغین	کودکان	بالغین
میانگین	6.2×10^{-6}	3.2×10^{-6}	5.3×10^{-7}	1.1×10^{-6}	7.7×10^{-6}	3.7×10^{-6}	6.4×10^{-7}	1.3×10^{-6}
انحراف معیار	5×10^{-6}	2.4×10^{-6}	4.2×10^{-7}	8.4×10^{-7}	7.5×10^{-6}	3.8×10^{-6}	6.5×10^{-7}	1.3×10^{-6}
کم‌ترین	.	7.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}	2.5×10^{-7}	1.2×10^{-6}	5.8×10^{-7}	.	.
بیش‌ترین	2.4×10^{-5}	1.2×10^{-5}	2×10^{-6}	4.1×10^{-6}	3.4×10^{-5}	1.7×10^{-5}	2.9×10^{-6}	5.9×10^{-6}
میانگین	2.9×10^{-1}	3×10^{-1}	2.5×10^{-2}	9.9×10^{-2}	1.8×10^{-16}	9.5×10^{-17}	1.5×10^{-17}	3.4×10^{-17}
انحراف معیار	2.4×10^{-1}	2.3×10^{-1}	2×10^{-2}	8×10^{-2}	1.4×10^{-16}	7.8×10^{-17}	1.2×10^{-17}	2.7×10^{-17}
کم‌ترین	.	7.2×10^{-2}	6.2×10^{-3}	2.5×10^{-2}	3.2×10^{-17}	1.8×10^{-17}	.	.
بیش‌ترین	1.2×10^1	1.2×10^1	1×10^{-1}	4.1×10^{-1}	6.8×10^{-16}	3.8×10^{-16}	5.8×10^{-17}	1.3×10^{-16}
میانگین	1.6×10^{-8}	1.5×10^{-8}	1.4×10^{-9}	4.9×10^{-9}	1.8×10^{-8}	1.5×10^{-8}	1.5×10^{-9}	5.4×10^{-9}
انحراف معیار	1.3×10^{-8}	1.2×10^{-8}	1.1×10^{-9}	3.9×10^{-9}	1.4×10^{-8}	1.2×10^{-8}	1.2×10^{-9}	4.3×10^{-9}
کم‌ترین	.	3.6×10^{-9}	3.5×10^{-10}	1.2×10^{-9}	3.2×10^{-9}	2.9×10^{-9}	.	.
بیش‌ترین	6.6×10^{-8}	5.9×10^{-8}	5.7×10^{-9}	2×10^{-8}	6.8×10^{-8}	6×10^{-8}	5.8×10^{-9}	2.1×10^{-8}

همکاران، به بررسی عناصر سنگین سرب، نیکل، مس، کروم و کادمیم موجود در غبار ریزشی شهر تهران کردند. آن‌ها گزارش کردند که از بین فلزات مورد مطالعه کادمیم بیشترین مقدار فاکتور زمین انباشت را به خود اختصاص داده است (۳۵). یکی از مهم‌ترین دلایل زمین انباشت کادمیم میزان غلظت بالای آن در محیط شهری به علت استفاده زیاد از سوخت‌های فسیلی در کارخانجات، وسایل گرمایشی در فصل زمستان، پایداری هوا، وارونگی هوا و وزش بادهای غالب می‌باشد (۳۶). علاوه بر این وزش بادهای غربی-شرقی در شهر کرج که از سمت بیابان‌ها و معادن شن و ماسه غرب کرج می‌وزند می‌تواند دلیلی بر انتقال گرد و غبار به محدوده شهری نیز باشد (۲۰). همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مقادیر فاکتور زمین انباشتگی در فضای داخل

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که کم‌ترین میزان شاخص زمین انباشتگی (Igeo) در فضای داخل ساختمان مربوط به ایستگاه شماره ۲ به مقدار $0/04$ - و بیشترین میزان آن مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ به مقدار $4/00$ بوده است. همچنین مقادیر این شاخص برای فضاهای خارج ساختمان در فصل زمستان کم‌ترین و بیشترین مقدار را به ترتیب در ایستگاه شماره ۲ به میزان $0/36$ - و ایستگاه شماره ۲۱ به میزان $4/03$ نشان داد (جدول ۳). شاخص زمین انباشت معیاری از سنجش تجمع فلزات روی سطح زمین می‌باشد که در طی مدت معین توسط گرد و غبار رسوب کرده و تجمع یافته‌اند (۱۱). یافته‌های تحقیق پیش‌رو بین مقادیر زمین انباشت در محیط داخل و خارج ساختمان تفاوت معنی داری را نشان ندادند. در یک مطالعه مشابه Arsalani و

سرطان‌زایی معنی‌داری بر سلامت انسان ندارد. هم‌چنین مقادیر ریسک سرطان‌زایی از طریق بلعیدن در فصل زمستان در داخل و خارج ساختمان برای کودکان زیر 10^{-6} و برای افراد بالغ 10^{-6} اندازه‌گیری شد که هیچ خطر سرطان‌زایی برای گروه‌های هدف ندارد. یکی از اصلی‌ترین مسیرهای تماس با فلزات سنگین موجود در هوا از طریق تنفس و استنشاق می‌باشد (۴۰). مقادیر خطر غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی کادمیم در محیط داخل و خارج ساختمان در فصل زمستان در کودکان و افراد بالغ بالاترین مقادیر خطر را در مقایسه با مسیرهای گوارشی و پوستی نشان داد. مقادیر خطر جذب پوستی نیز نشان داد که کادمیم در دو محیط داخل و خارج ساختمان‌های کلان‌شهر کرج در فصل زمستان فاقد خطرات سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی برای کودکان و افراد بالغ است.

تشکر و قدردانی

تمامی نویسندگان از خانم دکتر صاحبی مدیر آزمایشگاه زیست پویا لب و جناب آقای دکتر علی کاظمی به‌علت همکاری‌ها و رهنمودهای ارزشمندشان در تکمیل مراحل انجام این مطالعه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

1. Iwegbue, C.M., 2011. Polycyclic aromatic hydrocarbons profile of kitchen dusts. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 86: 298-301.
2. Du, W. and Li, M., 2021. The impact of land resource mismatch and land marketization on pollution emissions of industrial enterprises in China. *Journal of Environmental Management*. 199: 113565.
3. Tamrakar, Ch.Sh. and Shakya, P., 2011. Assessment of Heavy Metals in Street Dust in Kathmandu Metropolitan City and their Possible Impacts on the Environment. *Environmental Science*. 10385874.
4. Zhao, X., Li, Z., Tao, Y., Wang, D., Huang, J., Qiao, F., Lei, L. and Xing, Q., 2020. Distribution characteristics, source appointment, and health risk assessment of Cd exposure via household dust in six cities of China. *Build. Environ.* 172: 106728. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106728>.
5. Srivastava, A. and Jain, V. K., 2007. Size Distribution and Source Identification of Suspended Particulate Matters in Atmospheric Aerosols over Delhi. *Chemosphere*. 68: 579-589. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.12.046
6. Liu, Z., Zhou, M., Chen, Y., Chen, D., Pan, Y., Song, T., Ji, D., Chen, Q. and Zhang, L., 2021. The nonlinear response of fine particulate matter pollution to ammonia emission reductions in North China. *Environmental Research Letters*. 16(3): 034014. DOI: 10.1088/1748-9326/abd8f6
7. Shojaei Barjoei, S., Azimzadeh, H. and Mosleh Arani, A., 2020. Ecological Risk Assessment of Some Heavy Metals in the Dust Emitted from Non-Metallic Industries of Ardakan County of Yazd in Summer 2018: A Descriptive Study. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*. 19(2): 173-192. (In Persian)
8. Halil, M., Ghanavati, N. and Nazarpour, A., 2019. Assessment of the Environmental Pollution of some Heavy Metals in Abadan City Street Dust using

و خارج ساختمان‌ها در ایستگاه‌هایی سنجیده شده است که بالاترین غلظت فلز کادمیم را نشان دادند (ایستگاه شماره ۱۰ و ۲۱، جدول ۳). براساس نتایج دو ایستگاه ۱۰ و ۲۱ بالاترین غلظت کادمیم و شاخص انباشتگی در گروه "آلودگی شدید" قرار گرفتند. کلان‌شهر کرج از تراکم جمعیت بسیار بالایی برخوردار است که با دارا بودن صدها واحد صنعتی و کارخانجات مهم و وسایل نقلیه موتوری بسیار زیاد در زمره شهرهای بسیار آلوده قرار دارد. با توجه به وقوع وارونگی و سکون هوا در زمستان احتمال ته‌نشست و رسوب گرد و غبار حاوی فلزات سنگین در روی سطوح داخل و خارج ساختمان بسیار زیاد است (۱۶). یافته‌ها نشان داد که کم‌ترین میزان شاخص غنی‌شدگی (EF) در فضای داخل ساختمان مربوط به ایستگاه شماره ۴ به‌مقدار $2/80$ و بیش‌ترین میزان آن مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ به‌مقدار $48/59$ بوده است. هم‌چنین مقادیر این شاخص برای فضاهای خارج ساختمان در فصل زمستان کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار را به‌ترتیب در ایستگاه شماره ۲ به‌میزان $2/34$ و ایستگاه شماره ۲۱ به‌میزان $48/57$ نشان داد (جدول ۳). این نتایج با یافته‌های Aghilani و همکاران (۳۵) نیز تطابق داشت که عنوان کردند کادمیم بیش‌ترین غلظت و میزان غنی‌شدگی را در ایستگاه‌های مورد مطالعه شهر تهران داشته است. آن‌ها هم‌چنین منشأ کادمیم را انسانی تشخیص دادند که با یافته‌های تحقیق حاضر مبنی بر انسانی بودن منشأ کادمیم در کلان‌شهر کرج مطابقت داشت. در این مطالعه ایستگاه‌های شماره ۱۰ و ۲۱ بالاترین مقادیر فلز کادمیم بیش‌ترین مقدار غنی‌شدگی را در محدوده عدد $48/5$ برای فضاهای داخل و خارج ساختمان‌ها نشان دادند که در این خصوص دو ایستگاه مذکور در گروه "شدت زیاد" طبقه‌بندی شدند. در مطالعه‌ای که Baghaei و Aghili، انجام دادند غلظت کادمیم و سرب موجود در خاک شهر اراک و خطر غیر سرطان‌ی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها عنوان کردند که بیش‌ترین غلظت کادمیم در مناطق پر تردد و پر ترافیک شهر اراک سنجش گردید و بالاترین مقادیر شاخص زمین انباشت را نیز نشان دادند (۳۷). بر این اساس بین میزان غلظت فلز سنگین و شاخص‌های غنی‌شدگی و زمین انباشت رابطه مستقیم وجود دارد به‌نحوی که هرچه قدر غلظت بیش‌تر باشد مقادیر شاخص‌های فوق نیز بیش‌تر است (۳۸). فلز کادمیم به‌عنوان یکی از فلزات خطرناک و سرطان‌زا این قابلیت را دارد که از مسیرهای پوست، گوارش و استنشاق وارد بدن انسان شود. مطالعات متعددی درخصوص اثرات سرطان‌زایی فلز کادمیم در بدن انسان انجام شده است (۴). این فلز قادر است تا با عبور از غشای سلولی باعث ایجاد مسمومیت شود و با ایجاد شکست‌ها و آسیب‌های زیاد در ساختار DNA موجب ایجاد سرطان گردد. بلعیدن از طریق دستگاه گوارش یکی از مسیرهای تماس کادمیم با اندام‌های داخلی بدن می‌باشد (۳۹). نتایج مطالعه پیش‌رو نشان داد که میزان این شاخص برای بلعیدن در داخل و خارج ساختمان در فصل زمستان برای کودکان و افراد بالغ کم‌تر از یک اندازه‌گیری شد که اثرات غیر

- Indoor Dust in Nursery Schools Building. *Procedia, Social and Behavioral Sciences*. 38: 169-175.
26. **Kurt-Karakus, P.B., 2012.** Determination of heavy metals in indoor dust from Istanbul, Turkey: Estimation of the health risk. *Environ. Int.* 50: 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.09.011>
 27. **USEPA. 2004.** Risk Assessment Guidance for Superfund Volume 1. Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment). EPA/540/R/99/005 Ofce of Superfund Remediation and Technology Innovation; U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
 28. **USEPA. 2006.** National Recommended Water Quality Criteria. United States Environmental Protection Agency. Ofce of Water, Ofce of Science and Technology
 29. **Lu, C.G., Gao, X., Yu, Q., Li, C.L. and Chen, L.M., 2006.** Indoor Air Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Rural Tibetan Residence and the Depositions in Human Respiratory Tract. *J. Fudan Univ.* 45: 714-718.
 30. **RAIS. 2014.** The Risk Assessment Information System. <http://rais.ornl.gov>.
 31. **US EPA. 2004.** Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual. National Center for Environmental Assessment, Washington
 32. **Wei, B., Jiang, F., Li, X. and Mu, S., 2010.** Contamination levels assessment of potential toxic metals in road dust deposited in different types of urban environment. *Environ Earth Sci.* 61:1187-1196. doi:10.1007/s12665-009-0441-6
 33. **Shokri Ragheb, P. and Sobhan Ardakani, S., 2016.** Analysis of Co, Cr and Mn Concentrations in Atmospheric Dry Deposition in Hamadan City. *Avicenna J Clin Med.* 23(2): 149-156. (In Persian)
 34. **Karyab, H., Hajizadeh, Y. and Babae, S.A., 2021.** Human Health Risk Assessment of Cadmium Exposure in Dry Deposition of Atmospheric Dust (Uncertainty Analysis). *J Mazandaran Univ Med Sci.* 31(199): 66-80. (In Persian)
 35. **Arsalani, F., Alijani, B., Akbari, M. and Mohammadkhan, Sh., 2020.** Investigation of heavy metals (Cd, Cr,Cu,Ni,Pb) existing in falling dust of Tehran. *Researches in Earth Sciences.* 11(4): 15-36. (In Persian)
 36. **Eslami, H., Esmaili, A., Razaean, M., Salari, M., Hosseini, A.N., Mobini, M. and Barani, A., 2022.** Potentially toxic metal concentration, spatial distribution, and health risk assessment in drinking groundwater resources of southeast Iran. *Geosci. Front.* 13: 101276. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101276>
 37. **Baghaie, A. and Aghili, F., 2018.** Evaluation of Lead and Cadmium Concentration of Arak City Soil and Their Non-Cancer Risk Assessment in 2017. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences.* 17(8): 769-780. (In Persian)
 38. **Hejami, A. Al, Davis, M., Prete, D., Lu, J. and Wang, S., 2020.** Heavy metals in indoor settled dusts in Toronto, Canada. *Sci. Total Environ.* 703: 134895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134895>
 39. **Khan, S.A., Muhammad, S., Nazir, S. and Shah, F.A., 2020.** Heavy metals bounded to particulate matter in the residential and industrial sites of Islamabad, Pakistan: Implications for non-cancer and cancer risks: Evaluation of heavy metals bounded to particulate matter for non cancer and cancer risks. *Environ. Technol. Innov.* 19: 100822. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100822>
 40. **Traczyk, P. and Gruszecka-Kosowska, A., 2020.** The condition of air pollution in kraków, poland, in 2005-2020, with health risk assessment. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 17: 1-22. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176063>
 9. **Kumar, P. and Ram, U., 2017.** Patterns, factors associated and morbidity burden of asthma in India. *PLoS one.* 12(10): e0185938.
 10. **Kabadayi, F. and Cesur, H., 2010.** Determination of Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cd, and Mn in road dusts of Samsun City. *Environ. Monit. Assess.* 168: 241-253. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1108-1>
 11. **Faiz, Y., Tufail, M., Javed, M.T., Chaudhry, M.M. and Naila-Siddique, 2009.** Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan. *Microchem. J.* 92: 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.03.009>
 12. **Abolfazli, Z., 2021.** BOOK REVIEW: Cambridge Handbook of Intercultural Communication. *Iranian Journal of Language Teaching Research.* 9(1): 161-164. (In Persian)
 13. **Xu, J.W., Lin, J., Tong, D. and Chen, L., 2023.** The underappreciated role of transboundary pollution in future air quality and health improvements in China. *Atmos. Chem. Phys.* 23(17): 10075-10089.
 14. **Sah, D., Kumar Verma, P., Kumari Kandikonda, M. and Lakhani, A., 2019.** Pollution characteristics, human health risk through multiple exposure pathways, and source apportionment of heavy metals in PM10 at Indo-Gangetic site. *Urban Climate.* 27: 149-162.
 15. **Mahurpawar, M., 2015.** Effects of heavy metals on human health. *International Journal of Research.* 3(9SE):1-7.
 16. **Al-Harbi, M., Alhajri, I. and Whalen, J.K., 2021.** Characteristics and health risk assessment of heavy metal contamination from dust collected on household HVAC air filters. *Chemosphere.* 277: 130276. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130276>
 17. **Zhou, L., Liu, G., Shen, M., Liu, Y. and Lam, P.K.S., 2021.** Characteristics of indoor dust in an industrial city: Comparison with outdoor dust and atmospheric particulates. *Chemosphere.* 272: 129952. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129952>
 18. **Al-Shidi, H.K., Sulaiman, H., Al-Reasi, H.A., Jamil, F. and Aslam, M., 2021.** Human and ecological risk assessment of heavy metals in different particle sizes of road dust in Muscat, Oman. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28: 33980-33993. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09319-6>
 19. **Monavari, S.M., Hoasami, P., Tajziehchi, S., Khorramchokami, N. and Area, A.S., 2012.** Study of solid waste landfill suitability using regional screening method and AHP in Rasht City. *Int J Engine Phys Sci.* 6(1): 2-27.
 20. **Qishlaqi, A. and Beiramali, F., 2019.** Potential sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dusts of Karaj urban area, northern Iran 11 Medical and Health Sciences 1117 Public Health and Health Services. *J. Environ. Heal. Sci. Eng.* 17: 1029-1044. <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00417-3>
 21. **Saleh, S., Sambakunsi, H., Mortimer, K., Morton, B., Kumwenda, M., Jamie, R. and Chinouya, M., 2021.** Exploring smoke: an ethnographic study of air pollution in rural Malawi. *BMJ Glob Health.* 6(6): e004970. DOI: 10.1136/bmjgh-2021-004970.
 22. **Wan, Y., Wu, Q., Abualnaja, K.O., Asimakopoulos, A.G., Covaci, A., Gevao, B., Johnson-Restrepo, B., Kumosani, T.A., Malarvannan, G., Moon, H.B., Nakata, H., Sinha, R.K., Minh, T.B. and Kannan, K., 2015.** Occurrence of perchlorate in indoor dust from the United States and eleven other countries: Implications for human exposure. *Environ. Int.* 75: 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.005>
 23. **Ghanavati, N., 2018.** Human health risk assessment of heavy metals in street dust in Abadan. *Iran. J. Health & Environ.* 11(1): 63-74. (In Persian)
 24. **Sabzevari, E. and Sobhanardakani, S., 2018.** Analysis of Selected Heavy Metals in Indoor Dust Collected from City of Khorramabad, Iran: A Case Study. *Jundishapur Journal of Health Sciences.* 10(3): e67382. (In Persian)
 25. **Darus, F.M., Nasir, R.A., Sumari, S.M., Ismail, Z.S. and Omar, N.A., 2012.** Heavy Metals Composition of Geographic Information System (GIS). *Journal of Water and Soil Science.* 23(1): 209-221. (In Persian)