

Health risk assessment and identification of the contribution of pollutant sources of some heavy metals in street dust in Boroujerd city using the Positive matrix factorization (PMF)

Parvin Goudarzi Yaghoubi¹, Javad Varvani^{*2}, Bahman Shams EsfandAbadi³, Hamid Torangzar⁴, Abbas Ahmadi⁵

1. PhD Student, Department of Environment, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: Goudarzi-2020@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Agriculture and Natural Resources, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak , Iran. E-mail: varvanijavad7@gmail.com
3. Assistant Professor, Department of Agriculture and Natural Resources, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak , Iran. E-mail: bshams1357@gmail.com
4. Associate Professor, Department of Environment, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: htorangzar@yahoo.com
5. Associate Professor, Department of Agriculture and Natural Resources, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: abahmadi@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Full Length Research Paper</p> <p>Article history: Received: Revised: Accepted:</p> <p>Keywords: Street dust, Positive matrix factorization (PMF), health risk, Boroujerd,</p>	<p>Background and Objective: Among the complex components of street dust are heavy metals, which have become an urban and environmental problem due to their high toxicity, concealment, persistence, and bioaccumulation, and have attracted much attention. The presence of heavy metals in street dust causes them to accumulate in the human body and thus become health hazards. The study aimed to assess the health risk and identify the contribution of pollutant sources of some heavy metals in street dust in Boroujerd city using the using the Positive matrix factorization (PMF).</p> <p>Materials and Methods: 41 street dust samples were collected. The samples were obtained as a composite (mixture of 3 samples together at a distance of 5 to 10 m) and with an approximate weight of 100 g and the samples were transferred to the laboratory for heavy metal analysis and finally the total (semi-total) concentration of As, Cd, Pb, Zn, Cu and Ni metals was first extracted by acid digestion method using 4 N nitric acid. The Positive matrix factorization (PMF) was used to identify and contribute the pollutants.</p> <p>Results: The average concentrations of lead, cadmium, copper, nickel, zinc and arsenic were 66.61, 0.97, 19, 49.76, 264.43 and 40.04 mg/kg respectively. Therefore, the trend of heavy metal concentrations based on the average is as follows: Zn > Pb > Ni > As > Cu > Cd. According to the PMF results, the share of each factor in the total share of sources was obtained. Of which natural source (F1), vehicle tire coating source (F2), industrial gas source (F3) and transportation source (F4) constitute 27.1%, 17.3%, 29.6% and 26% of the total share, respectively. According to the risk assessment results, the HI value of lead and arsenic metals for children was higher than the threshold (HI=1), indicating that these metals may have high risks of non-cancerous diseases for children,</p>

but for adults, the HI value for all metals was calculated to be less than 1. The risk of cancer through inhalation for children and adults is also almost negligible.

Conclusion: The concentrations of heavy metals in street dust in the study area were mostly influenced by industrial gases. Overall, the results of this study provide useful information for local authorities to select and develop sustainable policies to control and reduce pollution emissions.

Cite this article: Varvani, Javad, Goudarzi Yaghoubi, Parvin, Shams, Bahman, Torangzar, Hamid, Ahmadi, Abbas .2025. Health risk assessment and identification of the contribution of pollutant sources of some heavy metals in street dust in Boroujerd city using the Positive matrix factorization (PMF). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*



© The Author(s).

DOI: -----

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ارزیابی خطر سلامتی و شناسایی سهم منابع آلاینده برخی فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهرستان بروجرد با استفاده از مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF)

پروین گودرزی یعقوبی^۱، جواد وروانی^{۲*}، بهمن شمس اسفندآبادی^۳، حمید ترنج زر^۴، عباس احمدی^۵

۱- دانشجوی دکتری گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

رایانامه: Goudarzi-2020@gmail.com

۲- دانشیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

رایانامه: varvanijavad7@gmail.com

۳- استادیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

رایانامه: bshams1357@gmail.com

۴- دانشیار گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

رایانامه: htorangzar@yahoo.com

۵- دانشیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

رایانامه: abahmadi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: از جمله اجزای پیچیده گرد و غبار خیابانی، فلزات سنگین می‌باشند که به دلیل سمیت بالا، پنهان شدن، پایداری و تجمع بیولوژیکی تبدیل به یک مشکل شهری و زیست محیطی شده است و توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. وجود فلزات سنگین در گرد و غبار خیابان باعث می‌شود که آن‌ها در بدن انسان انباشته و در نتیجه تبدیل به خطرات بهداشتی شوند. مطالعه با هدف ارزیابی خطر سلامتی و شناسایی سهم منابع آلاینده برخی فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهرستان بروجرد با استفاده از مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF) انجام شد.
تاریخ دریافت: تاریخ ویرایش: تاریخ پذیرش:	
واژه‌های کلیدی: گرد و غبار خیابانی، مدل ماتریس تجزیه مثبت،	مواد و روش‌ها: ۴۱ نمونه گرد و غبار خیابانی جمع‌آوری شد. نمونه‌ها به صورت ترکیبی (مخلوط ۳ نمونه با هم در فاصله ۵m تا ۱۰) و با وزن تقریبی ۱۰۰ g بدست آمدند و نمونه‌ها برای انجام آنالیز فلزات سنگین به آزمایشگاه منتقل گردیدند و در نهایت غلظت کل (شبه‌کل) فلزات As, Cd, Pb, Zn, Cu و Ni ابتدا از روش هضم اسیدی با استفاده از اسید نیتریک ۴ نرمال عصاره‌گیری شد. از مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF) برای

یافته‌ها: میانگین غلظت سرب، کادمیم، مس، نیکل، روی و آرسنیک به ترتیب ۶۶/۶۱، ۰/۹۷، ۱۹، ۴۹/۷۶، ۲۶۴/۴۳ و ۴۰/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابر این ترتیب غلظت فلزات سنگین بر اساس میانگین به این صورت است: $Zn > Pb > Ni > As > Cu > Cd$. با توجه به نتایج PMF سهم هر فاکتور از کل سهم منابع به دست آمد. که منبع طبیعی (F1)، منبع پوشش لاستیک وسایل نقلیه (F2)، منبع گازهای صنعتی (F3) و منبع حمل و نقل (F4) به ترتیب ۲۷/۱٪، ۱۷/۳٪، ۲۹/۶٪ و ۲۶٪ از کل سهم را تشکیل می‌دهند. طبق نتایج ارزیابی خطر، مقدار HI فلزات سرب و آرسنیک برای کودکان بیشتر از حد آستانه ($HI = 1$) به دست آمد که نشان‌دهنده این است که این فلزات ممکن است خطرات بیماری‌های غیر سرطانی بالایی برای کودکان داشته باشند، اما برای بزرگسالان مقدار HI برای همه فلزات کمتر از ۱ محاسبه شد. خطر بیماری‌های سرطانی از طریق مسیر استنشاق برای کودکان و بزرگسالان نیز تقریباً ناچیز است.

نتیجه‌گیری: غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی منطقه مورد مطالعه بیشتر تحت تأثیر گازهای صنعتی بودند. با توجه به عبور و مرور وسایل نقلیه در شهرستان بروجرد، منبع حمل و نقل (F4) نیز ۲۶٪ از کل سهم آلودگی در منطقه را تشکیل می‌دهند که عمدتاً شامل فلزات سرب و روی است. با توجه به سهم بالای این فلزات می‌توان احتمال داد غلظت بالای این فلزات می‌تواند بیشتر ناشی از ترافیک شهری باشد. به طور کلی نتایج این تحقیق اطلاعات مفیدی را برای مقامات محلی ارائه می‌دهد تا برای کنترل و کاهش انتشار آلودگی در شهرستان بروجرد، سیاست‌های پایدار را انتخاب و توسعه دهند.

استناد: وروانی، جواد، گودرزی یعقوبی، پروین، شمس، بهمن، ترنج زر، حمید، احمدی، عباس. (۱۴۰۴). ارزیابی خطر سلامتی و شناسایی سهم منابع آلاینده برخی فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهرستان بروجرد با استفاده از مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF). نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار.

DOI: -----

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان



مقدمه

گرد و غبار خیابانی عبارت است از ذرات معدنی و آلی با منشأ مختلف از جمله منابع صنعتی و منابع مرتبط با ترافیک وسایل نقلیه که شاخص ارزشمندی برای توصیف کیفیت محیط زیست شهری است (۱). گرد و غبار خیابانی موجود در خیابان‌ها و پیاده روها به عنوان یکی از مهمترین پیامدهای محیط زیستی فعالیت‌های انسان در چند سال اخیر مورد توجه بسیاری از محققین علوم محیط زیست قرار گرفته است (۲، ۳). از بین آلاینده‌های متعدد همراه با گرد و غبار خیابانی، فلزات سنگین می‌باشند که به دلیل سمیت بالا، پایداری و تجمع بیولوژیکی تبدیل به یک مشکل شهری و زیست محیطی شده است و توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (۴). فلزات سنگین موجود در گرد و غبار خیابانی یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌های شهری است که بیشتر ناشی از ترافیک سنگین وسایل نقلیه، صنایع، فرسایش ساختمان‌ها، فرسایش لاستیک و قطعات استفاده شده در خودروها، فعالیت‌های معدنی و احتراق سوخت‌های فسیلی است. این فلزات به دلیل تهدیداتی که می‌تواند متوجه سلامت انسان کند بسیار مهم هستند و به دلیل خاصیت تجمع‌پذیری و سرطان‌زایی می‌توانند مشکلات متعدد بهداشتی و محیط زیستی ایجاد کنند (۵). فلزات سنگین از قبیل مس، سرب، روی، آرسنیک، کروم، نیکل و کادمیم به دلیل خاصیت سمی و تجمع زیستی از مهم‌ترین آلاینده‌ها محسوب می‌شوند و بیشترین اثر سمی را بر روی اکوسیستم می‌گذارند. وجود فلزات سنگین در گرد و غبار خیابان باعث می‌شود که آن‌ها در بدن انسان انباشته و در نتیجه تبدیل به خطرات بهداشتی شوند. سرطان‌ها از مهم‌ترین امراض غیر واگیر هستند که بار بیماری عمده‌ای را به جامعه تحمیل می‌کنند. از جمله اثرات فلزات سنگین ناشی از گرد و غبار خیابانی بر سلامت انسان می‌توان به مشکلات قلبی

عروقی، تنفسی، کبدی و کلیوی، اختلالات سیستم عصبی مرکزی و غدد درون ریز اشاره کرد که بر عملکرد اندام‌های داخلی تأثیر می‌گذارند و به عنوان کوفاکتور برای سایر بیماری‌ها عمل می‌کنند (۶).

ماتریس تجزیه مثبت (PMF) یک مدل گیرنده است که به طور گسترده‌ای برای تعیین تعداد منبع و سهم هر منبع آلودگی گرد و غبار خیابانی استفاده شده است. در سال‌های اخیر، مدل ماتریس تجزیه مثبت در زمینه شناسایی سهم منابع آلاینده گرد و غبار خیابانی و خاک مورد استفاده زیادی قرار گرفته است. ما و همکاران (۲۰۲۵) ارزیاب خطر سلامتی و شناسایی منابع آلاینده گرد و غبار خیابانی در شهر شیانگتان را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که خطر غیرسرطان‌زایی گرد و غبار جاده برای بزرگسالان در محدوده قابل قبولی بود. منابع آلاینده نیز شامل فعالیت‌های صنعتی (۳۲/۰۵٪)، حمل و نقل (۳۴/۹۰٪) و ترکیبی از فعالیت‌های حمل و نقل، صنعتی و ساختمانی (۳۳/۰۵) بود (۷). عسگری و همکاران (۲۰۲۵) تقسیم منابع و خطرات زیست محیطی فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهر کرمانشاه مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که شاخص خطر برای بزرگسالان و کودکان در محدوده ایمن بود. مدل PMF انشار و منابع ترافیکی، احتراق سوخت‌های فسیلی، منابع طبیعی و انتشارات صنعتی را به عنوان منابع اصلی فلزات سنگین شناسایی کرد (۸). قنواتی (۲۰۱۸) خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI) کلیه فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهر آبادان را برای کودکان بیشتر از بزرگسالان به دست آورد که این امر نشان داد که کودکان بیشتر از بزرگسالان در معرض خطر فلزات سنگین قرار دارند. در هر دو گروه سنی فلز کروم دارای بیشترین خطر سرطان‌زایی (RI) و فلز سرب دارای کمترین خطر بود (۹). افزایش وسایل نقلیه و سایر منابع آلاینده در شهر بروجرد لزوم ارزیابی جامع از وضعیت آلودگی محیط

در گرد و غبار خیابانی شهرستان بروجرد با استفاده از مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF) انجام شد.

فصل خشک در تیرماه ۱۴۰۲ از نقاط پرترافیک، میدین شهر، خیابان‌های اصلی شهر، مراکز خرید و مناطق مسکونی از سطح پیاده‌روها، آسفالت خیابان‌ها و مکان‌هایی که گرد و غبار برای مدتی در آن تجمع یافته است برداشت شد. گرد و غبار خیابانی نقاط به گونه‌ای انتخاب شدند که بتوانند کل منطقه مورد مطالعه را پوشش دهند که مجموع این نقاط ۴۱ نقطه شد. نمونه‌ها به صورت ترکیبی (مخلوط ۳ نمونه با هم در فاصله ۵m تا ۱۰) و با وزن تقریبی ۱۰۰ g بدست آمدند. گرد و غبار از سطح زمین با استفاده از بُس‌های قلمی در سطح تعیین شده جدا و بدون دخالت هر گونه ابزار فلزی در شیشه‌های کهربایی قرار گرفته و توسط فویل آلومینیوم مهر و موم شد تا از ورود مستقیم نور به آنها جلوگیری شود. پس از نمونه‌برداری، تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه از الک ۲۰۰ مش عبور داده شدند و تا زمان آزمایش نمونه‌ها در یخچال در دمای ۴°C نگهداری شدند.

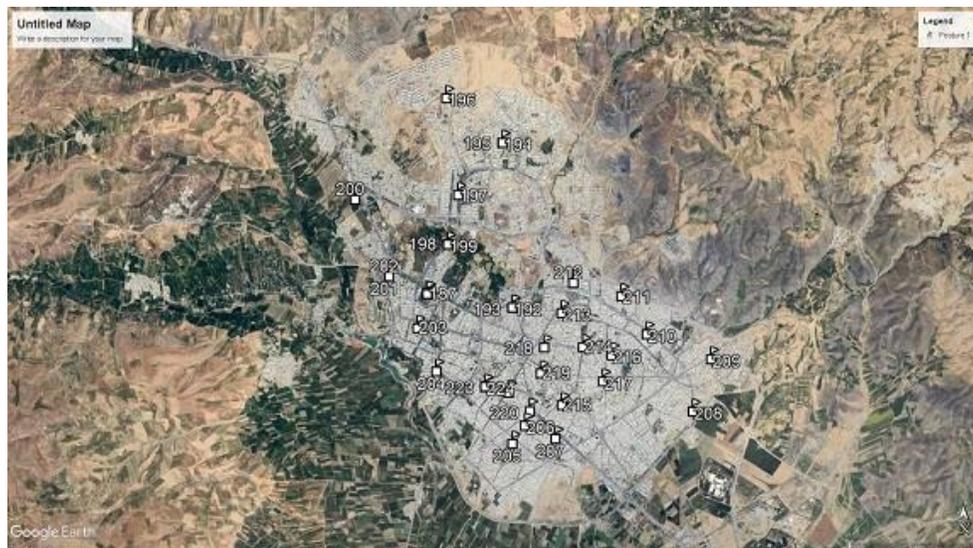
زیست به خصوص فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی را ضروری می‌کند لذا این مطالعه با هدف ارزیابی خطر سلامتی و شناسایی سهم منابع آلاینده برخی فلزات سنگین

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شهرستان بروجرد در استان لرستان می‌باشد. بروجرد دارای آب و هوای سرد کوهستانی با زمستان‌های پر برف و سرد و تابستان‌های معتدل است. میزان باران سالانه شهرستان بروجرد حدود ۵۰۰ میلی‌متر است که یک چهارم آن در فصل بهار انجام می‌گیرد. در زمستان بارش‌ها بیشتر به صورت برف است. میانگین دراز مدت بارش سالانه در ایستگاه هواشناسی شهرستان بروجرد ۴۵۹ میلی‌متر بوده است. میانگین دمای سالیانه نیز ۱۴/۸ درجه سانتی‌گراد است. باد غالب در بروجرد به سمت جنوب می‌وزد. میانگین سرعت روزانه باد ۳/۲۶ متر بر ثانیه است. شدیدترین باد در طول دوره آماری ۴۰ متر بر ثانیه از سمت شمال غرب وزیده است. باد غالب سهم سالانه ۱۸/۹ درصد و باد آرام سهم سالانه ۳۲/۷۸ درصد است.

مطالعات میدانی

در این تحقیق به منظور مطالعه غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهرستان بروجرد، نمونه‌برداری در



شکل ۱- نقشه پراکندگی نقاط نمونه‌برداری در شهرستان بروجرد

Figure 1. Distribution map of sampling points in Borujerd County.

$$CDI_{inhalation} = [(C_i \times InhR \times EF \times ED) / (PEF \times BW \times AT_{noncarc})] \quad (2)$$

$$CDI_{dermal} = [(C_i \times SA \times CF \times AF \times ABS \times EF \times ED) / (BW \times AT_{noncarc})] \quad (3)$$

$$CDI_{total} = CDI_{ingest} + CDI_{inhalation} + CDI_{dermal} \quad (4)$$

که در آن C_i غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی (میلی گرم بر کیلوگرم)، CDI_{ingest} ، $CDI_{inhalation}$ و CDI_{dermal} به ترتیب مقدار میانگین جذب روزانه فلزات (بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم در روز) از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی است. $InhR$ و $IngR$ به ترتیب نرخ بلع (میلی گرم بر کیلوگرم) و تنفس گرد و غبار (متر مکعب در روز)، CF فاکتور تبدیل، EF فراوانی قرار گرفتن در معرض فلزات (روز در سال)، ED مدت زمان قرار گرفتن در معرض فلزات (سال)، PEF فاکتور انتشار ذرات (متر مکعب بر کیلوگرم)، BW میانگین وزن بدن (کیلوگرم) و AT مدت زمان قرار گیری در معرض هر مقدار از فلزات به طور میانگین (روز)، SA ناحیه‌ای از پوست که با خاک در تماس است (سانتی متر مربع)، AF ضریب چسبندگی خاک (میلی گرم بر سانتی متر مربع) و ABS فاکتور جذب سطحی پوست است. متغیرهای (عامل) مورد استفاده برای محاسبه CDI در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- متغیرهای معادلات ارزیابی خطر فلزات سنگین برای محاسبه CDI

Table 1. Variables of heavy metal risk assessment equations for calculating CDI .

AT_{ca}	AT_{nc}	BW	PEF	ABS	AF	SA	ED	EF	FC	$InhR$	$IngR$	variable
70*	365	80	1.36E-9	0.001	0.07	6032	20	350	10^{-6}	20	100	Adults
70*	365	15	1.36E-9	0.001	0.2	2373	6	350	10^{-6}	7.6	200	Children

غیر سرطان‌زایی برای هر فلز از شاخص خطر (HQ) طبق معادله (۵) محاسبه شد:

تجزیه های آزمایشگاهی

پس از انتقال نمونه ها به آزمایشگاه، تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه از الک ۲۰۰ مش عبور داده شدند و تا زمان آزمایش نمونه‌ها در یخچال در دمای $4^{\circ}C$ نگهداری شدند غلظت کل فلزات As, Cd, Pb, Zn, Cu و Ni در خاک ابتدا از روش هضم اسیدی با استفاده از اسید نیتریک ۴ نرمال عصاره‌گیری انجام شد (۱۰). غلظت کل (شبه‌کل) Cd, Pb, Zn, Cu و Ni پس از آماده‌سازی نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفوتومتری جذب اتمی مدل (AAS) Model GBC 932AB Plus و غلظت کل As با دستگاه اندازه‌گیری پلاسما جفت شده القائی (ICP OES) (GBC Integra XL) قرائت شد.

ارزیابی خطر سلامتی انسان

ارزیابی مواجهه و خطر بیماری‌های غیر سرطانی

مواجهه با فلزات سنگین به وسیله جذب روزانه فلزات (CDI) (بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم در روز) و با استفاده از معادلات ۱ تا ۴ محاسبه شد (۱۱، ۱۲):

$$CDI_{ingest} = [(C_i \times IngR \times CF \times EF \times ED) / (BW \times AT_{noncarc})] \quad (1)$$

پس از اینکه میانگین جذب روزانه فلزات (CDI) هر مسیر محاسبه خواهد شد، برای ارزیابی پتانسیل خطر بیماری‌های

$$HQ = \frac{CDI_{total}}{RfD} \quad (5)$$

در معرض خطرات سرطان‌زا است. مقادیر CR طبق معادلات ۷ و ۸ محاسبه شد:

$$CR = CDI \times SF \quad (7)$$

$$TCR = \sum CR = CR_{ingest} + CR_{inhale} + CR_{dermal} \quad (8)$$

که در آن TCR خطر کل بیماری‌های سرطانی (بدون واحد) و SF فاکتور شیب سرطانی فلزات سنگین است (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) است. اگر مقدار TCR کمتر از 1×10^{-6} (احتمال سرطان یک نفر از هر یک میلیون نفر) باشد اثرات قابل توجهی بر سلامت انسان ندارد و این خطر قابل اغماض است، در حالی که TCR بیشتر از 1×10^{-4} (یک نفر از هر ده هزار نفر) غیر قابل قبول و برای سلامت انسان مخاطره آمیز است. مقدار TCR بین محدوده 1×10^{-6} و 1×10^{-4} نشان‌دهنده خطرپذیری تحت شرایط کنترل و نظارت است. مقادیر مختلف مقدار مرجع برای هر سه مسیر بلع، استنشاق و تماس پوستی و فاکتور شیب سرطانی فلزات سنگین در مسیرهای مختلف در معرض قرار گرفتن در جدول ۲ آورده شده است.

که در آن RfD نشان‌دهنده مقدار مرجع (میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) است و به عنوان تخمینی از قرار گرفتن روزانه انسان در مسیرهایی است که در معرض فلزات سنگین قرار می‌گیرد. با توجه به ارزیابی خطر کل فلزات سنگین، مقادیر محاسبه شده HQ برای فلزات سنگین جمع شد و به عنوان شاخص خطر تجمعی غیر سرطانی (HI) بیان شده و سپس HI با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد:

$$HI = \sum HQ = HQ_{ingest} + HQ_{inhale} + HQ_{dermal} \quad (6)$$

اگر $HI < 1$ (سطح ایمن) باشد، فرد در معرض احتمال تأثیر نامطلوب و نگران کننده‌ای قرار نمی‌گیرد، در مقابل $HI > 1$ ، احتمال تأثیرات بیماری‌های غیر سرطانی با افزایش مقدار HI افزایش می‌یابد.

ارزیابی خطر بیماری‌های سرطانی

خطر بیماری‌های سرطانی (CR) نشان دهنده احتمال ابتلاء به هر نوع سرطان در طول مدت زندگی به دلیل قرار گرفتن

جدول ۲- مقادیر مرجع و فاکتور شیب برای ارزیابی خطرپذیری فلزات سنگین (۱۳)

Table 2. Reference values and slope factors for assessing the risk of heavy metals.

RfD			SF			heavy metals
dermal	Inhalation	Ingestion	dermal	Inhalation	Ingestion	
0.00001	0.001	0.001	-	6.3	6.1	Cd
0.012	0.04	0.04	-	-	-	Cu
0.0054	0.0206	0.02	-	0.84	-	Ni
0.06	0.3	0.3	-	-	-	Zn
0.000525	0.00352	-	-	-	-	Pb

برای تقسیم منابع توصیه شده است و این مدل به طور گسترده‌ای برای تعیین تعداد منبع و سهم هر منبع آلودگی گرد و غبار استفاده شده است. یکی از مزیت‌های PMF در

مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF)

ماتریس تجزیه مثبت یک مدل گیرنده است که توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا به عنوان ابزار جهانی

نظر گرفتن عدم قطعیت متغیرهاست. در PMF، ماتریس داده‌های غلظت نمونه (X_{ij}) به دو ماتریس تقسیم می‌شود: ماتریس سهم فاکتور (g_{ik}) و ماتریس مشخصات فاکتور (f_{kj}) (معادله ۹).

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (9)$$

که در آن i تعداد نمونه، j نوع فلز، p تعداد فاکتورها و e_{ij} ماتریس باقی‌مانده است. سهم فاکتور و مشخصات فاکتور در مدل PMF با به حداقل رساندن تابع هدف Q به دست می‌آیند (معادله ۱۰).

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (10)$$

نتایج و بحث

بررسی غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

غلظت کل فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی در جدول ۳ خلاصه شده است. از آنجا که هیچ استاندارد خاصی برای غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی وجود ندارد، از میانگین خاک‌های جهانی و استاندارد کیفیت خاک کشور کانادا برای حفاظت از محیط‌زیست و سلامت انسان به منظور مقایسه استفاده شد. تغییرات غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار به ترتیب از $20/2$ تا $309/1$ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای سرب، $0/5$ تا $2/7$ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای کادمیم، $8/5$ تا $34/6$ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای مس، $28/1$ تا $68/3$ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای نیکل، $79/8$ تا $1140/6$ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای روی و $9/23$ تا 60 میلی‌گرم بر کیلوگرم برای آرسنیک، بود. میانگین غلظت سرب، کادمیم، مس، نیکل، روی و آرسنیک به ترتیب $66/61$ ، $0/97$ ، 19 ،

که در آن: u_{ij} عدم قطعیت فلز j در نمونه i است. قبل از آن که مدل PMF مورد تجزیه قرار بگیرد، کیفیت داده‌ها بر اساس نسبت سیگنال به نویز (S/N) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که نشان دهد که متغیرهای اندازه‌گیری واقعی هست یا دارای نویز هستند. بر اساس نسبت (S/N) متغیرها به صورت قوی ($S/N > 2$)، ضعیف ($0/2 < S/N < 2$) و بد ($S/N < 0/2$) طبقه‌بندی می‌شوند (۱۴).

آنالیزهای آماری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

توصیف آماری داده‌ها شامل میانگین، حداکثر، حداقل، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. به منظور تعیین منشأ احتمالی فلزات سنگین تجزیه مؤلفه اصلی مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام مدل PMF از نرم افزار EPA-PMF 5.00 استفاده شد.

$49/76$ ، $264/43$ و $40/04$ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابر این روند غلظت فلزات سنگین بر اساس میانگین به این صورت است: $Zn > Pb > Ni > As > Cu > Cd$. میانگین غلظت کادمیم، روی، سرب، نیکل و آرسنیک به ترتیب 2 ، $4/4$ ، $2/3$ ، $1/9$ و $4/7$ برابر بیشتر از میانگین خاک‌های جهانی است و برعکس مس غلظت کمتر از میانگین خاک‌های جهانی را نشان می‌دهد. بر اساس استاندارد کیفیت خاک کشور کانادا، میانگین غلظت روی و آرسنیک بیشتر از استاندارد تعریف شده است در حالی که میانگین غلظت کادمیم، سرب، مس و نیکل کمتر از استاندارد کیفیت خاک کانادا است (جدول ۳). درصد نمونه‌های گرد و غبار بیشتر از استاندارد کیفیت خاک کانادا برای سرب، کادمیم، نیکل، روی و آرسنیک به ترتیب 21 ٪، 8 ٪، 34 ٪، 24 ٪ و 100 ٪ بود. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرونف تأیید کرد که آرسنیک و نیکل دارای توزیع نرمال

تغییرات کمتر از ۵۰٪ نشان دادند. مقادیر ضریب تغییرات برای فلزات سنگین که توسط عوامل طبیعی کنترل می‌شوند نسبتاً کم است در حالی که فلزاتی که تحت تأثیر عوامل انسان‌زاد هستند زیاد است (۱۵).

هستند در حالی که روی، مس، کادمیم و سرب عدم توزیع نرمال را نشان می‌دهند. بالاترین ضریب تغییرات مربوط به سرب و روی بود که نشان‌دهنده تغییرات زیاد این فلزات در گرد و غبار خیابانی است؛ در حالی که به جز نیکل، فلزات آرسنیک، مس و کادمیم تغییر پذیری متوسطی را با ضریب

جدول ۳- خلاصه آماری غلظت کل فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) گرد و غبار خیابانی

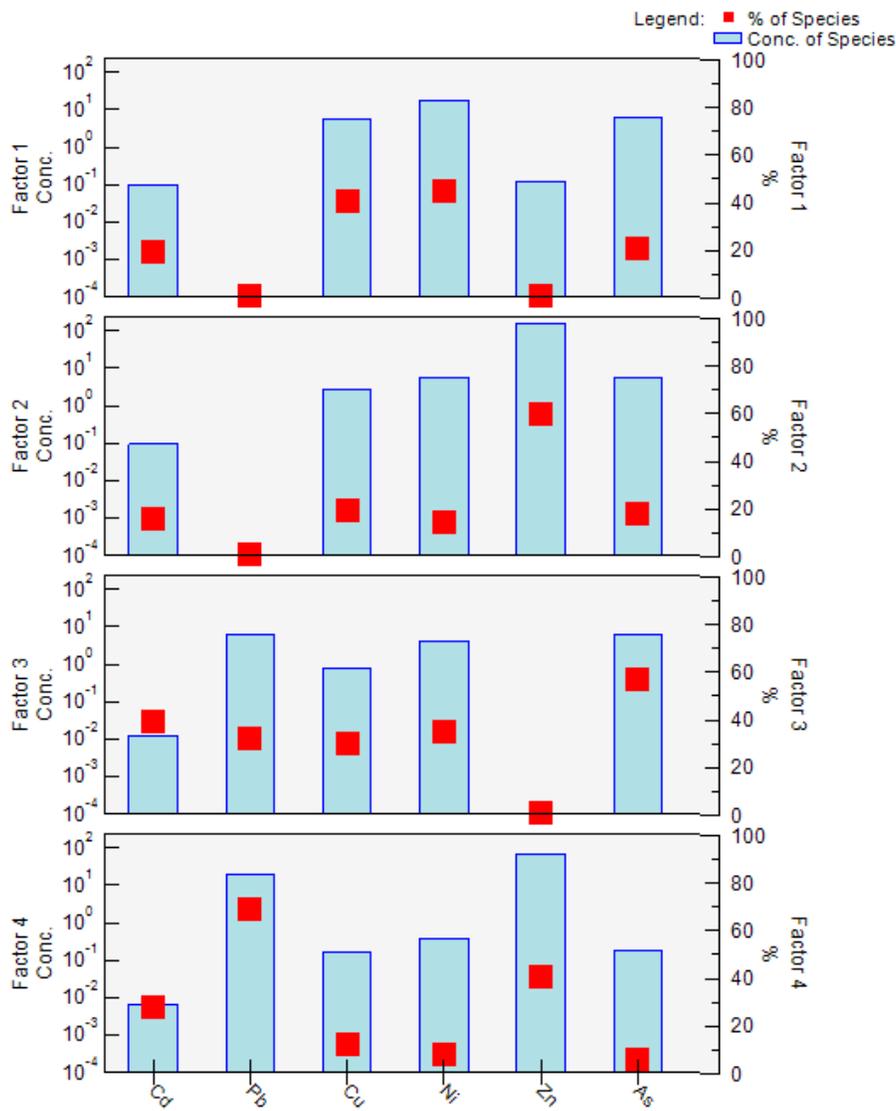
Table 3. Statistical of total concentration of heavy metals (mg/kg) in street dust.

As	Zn	Ni	Cu	Cd	Pb	Heavy metals
9.23	79.8	28.1	8.5	0.5	20.2	Minimum
60	1140.6	68.3	34.6	2.7	309.1	Maximum
40.04	264.43	49.76	19	0.97	66.61	Mean
10.37	262.3	9.22	5.65	0.42	59.5	standard deviation
25.92	99.15	18.52	29.77	43.42	89.33	CV(%)
8.4	60	26	23	0.45	28	Average world soil
97.4	100	0	13.2	100	84.2	Percentage of samples greater than background values (%)
12	200	50	63	1.4	70	Canada's soil quality standard for protecting the environment and human health

حداقل بود و بیشترین باقیمانده فلزات بین ۳ و ۳- بود (۱۶). نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای فلزات سنگین بیشتر از ۶/۵ بود که به عنوان قوی طبقه‌بندی می‌شود، که بیان‌کننده این است که مدل PMF می‌تواند برای شناسایی منابع فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد و تغییرات در اندازه‌گیری‌ها واقعی بودند (۱۷). نتایج تجزیه و تحلیل مدل PMF برای فلزات سنگین (mg/kg) در شکل ۲ ارائه شده است.

شناسایی منشأ آلودگی فلزات سنگین (طبیعی و انسانی) و سهم هر یک از منابع آلاینده

برای اطمینان از منطقی بودن تجزیه و تحلیل در مدل PMF، یافتن حداقل Q برای کنترل ماتریس باقی‌مانده و سپس تعیین تعداد بهینه از فاکتورها ضروری است. در این پژوهش بهترین راه حل (solution) با pmf شامل ۴ فاکتور بود. تعداد فاکتورها بر روی اعداد ۳، ۴ و ۵ ست شد و pmf نیز ۲۰ بار اجرا شد. زمانی که تعداد فاکتورها ۴ بود، مقدار Q



شکل ۲- فاکتورهای استخراج شده بر اساس مدل مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF)

Figure 2. Extracted factors based on the PMF.

ترافیک غیر آگروز مربوط می‌شود (۱۹). استفاده از روی در روغن‌های روان کننده و پوشش لاستیک وسایل نقلیه و استفاده مستمر از وسایل نقلیه در محیط‌های شهری باعث انتشار قابل توجهی از روی به اتمسفر می‌شود (۲۰). این فاکتور می‌تواند به عنوان منبع پوشش لاستیک وسایل نقلیه در نظر گرفته شود. محتمل ترین منبع عنصر روی در گرد و غبار خیابانی عمدتاً ناشی از اکسید روی استفاده شده در ولکانیزاسیون لاستیک تایرها است. فاکتور سوم (F3) عمدتاً

فاکتور اول (F1) شامل نیکل و مس می‌باشد که سهم آن‌ها به ترتیب ۴۵٪ و ۴۰٪ است. میانگین غلظت این فلزات کمتر از مقادیر زمینه است. بنابر این منشأ این فلزات ممکن است از منابع زمین‌شناسی باشد (۱۸). بنابر این فاکتور اول می‌تواند به عنوان منبع طبیعی شناخته شود. فاکتور دوم (F2) به طور قابل توجهی تحت تأثیر روی (۶۰٪) است که میانگین غلظت آن بالاتر از مقادیر زمینه است. مطالعات مرتبط نشان داده است که غلظت بالای روی به انتشار

شامل آرسنیک (۵۷٪) و کادمیم (۳۹٪) می‌باشد. منشا این فلزات سنگین احتمالاً از منابع انسان‌زاد مانند ترافیک،

از کل سهم منابع آورده شده است. مشخص شده است که منبع طبیعی (F1)، منبع پوشش لاستیک وسایل نقلیه (F2)،

%RMSE	RMSE	ME	Heavy metals
1.37	2.08	-0.023	As
41.02	0.48	0.0039	Cd
2.29	0.31	0.0059	Cu
1.37	1.28	-0.013	Ni
0.73	0.76	-0.0026	Zn
1.97	0.75	-0.0071	Pb

فرسودگی سوختن زباله و گازهای صنعتی باشد. و فاکتور سوم به عنوان گازهای صنعتی در نظر گرفته می‌شود. فاکتور چهارم (F4) عمدتاً شامل فلزات سرب (۶۸٪) و روی (۴۰٪) است. با توجه به سهم بالای این فلزات می‌توان احتمال داد غلظت بالای این فلزات می‌تواند بیشتر ناشی از ترافیک شهری باشد. از این رو این فاکتور می‌تواند به عنوان منبع حمل و نقل تفسیر شود.

منبع گازهای صنعتی (F3) و منبع حمل و نقل (F4) به ترتیب ۲۷/۱٪، ۱۷/۳٪، ۲۹/۶٪ و ۲۶٪ از کل سهم را تشکیل می‌دهند. غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی منطقه مورد مطالعه بیشتر تحت تأثیر گازهای صنعتی بودند. بنابر این با توجه به سهم بالای منابع آلاینده انسانی در منطقه مورد مطالعه، نباید تأثیر این آلاینده‌ها را بر انسان و اکوسیستم نادیده گرفت.

مطالعات دهقانی و همکاران (۲۰۱۷) در گرد و غبار خیابانی شهر تهران نشان داد که آلودگی ناشی از فلزات سنگین سرب و روی به وضوح مربوط به منابع انسان‌زاد نظیر ساییدگی تایر و ترمز وسایل نقلیه، سایش جاده و احتراق سوخت‌های فسیلی است. (۲۱) مطالعات نشان می‌دهند که اصلی‌ترین منبع انتشار سرب در گرد و غبار خیابانی، مواد افزودنی به سوخت خودروهاست. با توجه به آنکه در حال حاضر بنزین سرب‌دار تولید و استفاده نمی‌شود و در عین حال افزایش میزان سرب با افزایش میزان ترافیک مرتبط است. با توجه به نتایج PMF سهم هر فاکتور

در جدول ۴ اعتبار سنجی مدل PMF نشان داده شده است. میانگین خطای تخمین (ME) فلزات نزدیک صفر (بین -۰/۰۰۷۱ تا ۰/۰۰۵۹) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۰/۳۱ تا ۲/۰۸ است. مقدار %RMSE برای فلزات آرسنیک، مس، نیکل، روی و سرب بین صفر تا ۴۰ می‌باشد که نشان‌دهنده تخمین خوب مدل است، درحالی‌که مقدار %RMSE برای کادمیم ۴۱/۰۲ است که بیان‌کننده تخمین متوسط می‌باشد.

جدول ۴- اعتبار سنجی مدل PMF

Table 4. PMF model validation.

ارزیابی خطر سلامتی انسان

ارزیابی خطر بیماری‌های غیر سرطانی

در جدول ۵ مقدار جذب روزانه فلزات (CDI) برای فلزات سنگین به تفکیک کودکان و بزرگسالان از سه مسیر اصلی بلع، استنشاق و تماس پوستی نشان داده شده است. روند تغییرات CDI کل به صورت: $Zn > Pb > Ni > As > Cu$

Cd است. بیشترین و کمترین مقدار CDI در هر دو گروه سنی برای کلیه فلزات سنگین به ترتیب مسیر بلع < جذب پوستی < تنفس بود. همچنین مقدار CDI کل برای کودکان بیشتر از بزرگسالان مشاهده شد.

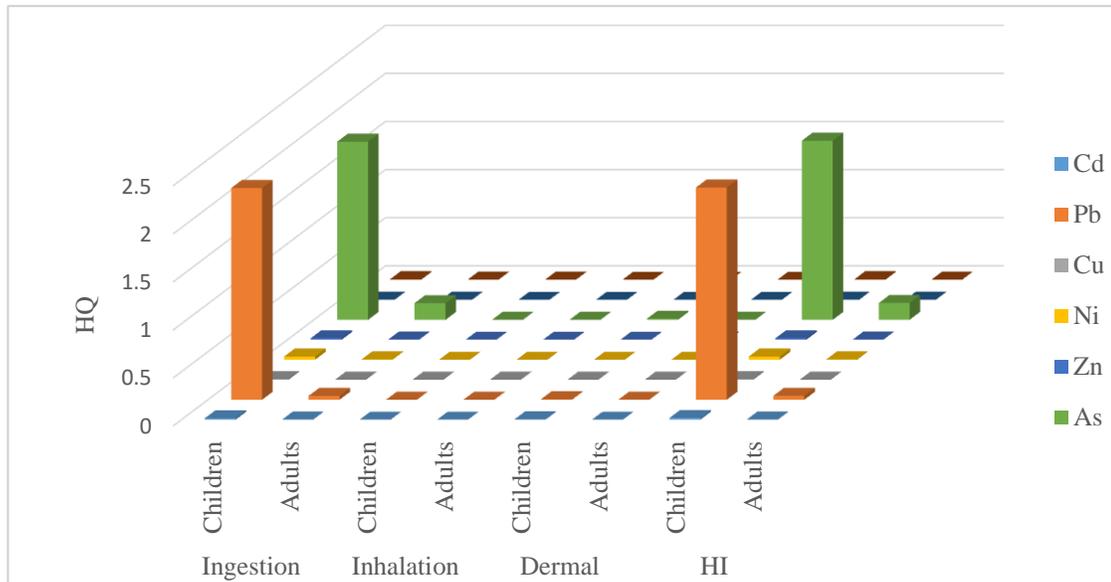
جدول ۵ - مقادیر جذب روزانه فلزات (CDI) گرد و غبار در هر مسیر به تفکیک بزرگسالان و کودکان

Table 5. CDI of dust in each route, separated into adults and children.

total CDI		dermal contact CDI		ingestion CDI		inhalation CDI		Heavy metals
adults	children	adults	children	adults	children	adults	children	
5.23E-5	5.57E-4	2.2E-7	1.32E-6	7.66E-9	1.55E-8	5.21E-5	5.56E-4	As
1.34E-6	1.42E-5	5.62E-9	3.37E-8	1.96E-10	3.96E-10	1.33E-6	1.42E-5	Cd
2.51E-5	2.67E-4	1.05E-7	6.32E-7	3.68E-9	7.44E-9	2.5E-5	2.67E-4	Cu
6.36E-5	6.77E-4	2.67E-7	1.6E-6	9.31E-9	1.88E-8	6.33E-5	6.74E-4	Ni
4.22E-4	4.49E-3	1.77E-6	1.06E-5	6.18E-8	1.25E-7	4.2E-4	4.49E-3	Zn
1.04E-4	1.1E-3	4.36E-7	2.61E-6	1.52E-8	3.1E-8	1.03E-4	1.1E-3	Pb

اختلال رشد، کاهش ضریب هوشی (IQ)، کاهش درک کلامی، از دست دادن حافظه کوتاه مدت و اختلالات یادگیری می‌شود. بنابراین، قرار گرفتن در معرض سرب و آرسنیک در گرد و غبار خیابانی تهدیدی برای کودکان ساکن در منطقه مورد مطالعه است و اقدامات اصلاحی فوری برای از بین بردن یا کاهش آلودگی گرد و غبار در منطقه مورد نیاز است. مقدار HI برای بزرگسالان کمتر از ۱ محاسبه شد که بیانگر این است که خطرات غیرسرطانی برای بزرگسالان از نظر فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه قابل توجه نمی‌باشد. مرادی باصری و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه ارزیابی ریسک غیر سرطانی فلزات سنگین حیوه و مس در گرد و غبار سطحی خیابان‌های شهر زاهدان مقدار HQ را برای فلزات مورد مطالعه و برای کودکان و بزرگسالان کمتر از یک به دست آوردند که مشابه نتایج این پژوهش است (۲۵). هو و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه گرد و غبار خیابانی در کشور چین، خطرات غیر سرطانی سرب را برای کودکان و بزرگسالان نسبتاً بیشتر از سایر فلزات به دست آوردند و در عین حال هیچ از مقادیر HI به استثنای سرب برای کودکان (۱/۰۷۴) از سطح ایمن بالاتر نبود (۲۶).

مقادیر شاخص خطر (HQ) و شاخص خطر تجمعی غیر سرطانی (HI) فلزات سنگین برای کودکان و بزرگسالان در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر HQ در مسیر بلع < جذب پوستی < تنفس بود که این روند توسط مطالعات طبقه و همکاران (۲۰۱۹) و میهن‌خواه و همکاران (۲۰۲۰) نیز تأیید شده است (۲۲، ۲۳). مقدار HQ برای فلزات برای کودکان به صورت: $Pb > As > Ni > Cd > Zn > Cu$ و برای بزرگسالان به صورت: $As > Pb > Ni > Cd > Zn > Hg$ است. مقدار HI کل فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی برای کودکان ۴/۱۵ و برای بزرگسالان ۰/۲۲ به دست آمد که این امر نشان‌دهنده آن است که کودکان به دلیل ویژگی‌های رفتاری (به عنوان مثال: بازی در زمین) در معرض خطر بیشتر قرار دارند. مطالعات کشاورزی و همکاران (۲۰۱۵) در گرد و غبار خیابانی شهر شیراز نشان دادند که HQ در کودکان بیشتر از بزرگسالان است. مقدار HI محاسبه شده برای اکثر فلزات (به جز سرب و آرسنیک) برای کودکان کمتر از سطح ایمن ($HI < 1$) بود که نشان می‌دهد هیچ خطر سرطانی از نظر مس، کادمیم، روی، و نیکل برای کودکان وجود ندارد (۲۴). قرار گرفتن در معرض سرب و آرسنیک در کودکان باعث مشکلاتی مانند



شکل ۳- مقادیر شاخص خطر (HQ) و شاخص خطر تجمعی غیر سرطانی (HI) فلزات سنگین گرد و غبار خیابانی به تفکیک بزرگسالان و کودکان

Figure 3. The hazard quotient (HQ) and the cumulative hazard index (HI) values of trace elements in street dust separated into adults and children.

(USEPA) توصیه می‌کند (1×10^{-6})، بنابر این خطر سرطانی ناشی از قرار گرفتن در معرض این فلزات در گرد و غبار خیابانی را می‌توان نادیده گرفت. جیانگ و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی خطرات سرطانی فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه صنعتی شمال غربی چین مقدار CR کادمیم و کروم را برای کودکان و بزرگسالان به ترتیب (1×10^{-11}) $5/66 - 1/09 \times 10^{-10}$ و ($4/61 \times 10^{-10} - 8/93 \times 10^{-10}$) به دست آوردند که بیانگر خطر پذیری ناچیز این فلزات است (۲۷). جهاننداری (۲۰۲۰) با مطالعه گرد و غبار شهری در ۱۶ شهر ایران روند تغییرات CR را به صورت $Cr > Ni > Cd$ گزارش کردند. همچنین سطح CR این سه فلز سرطان‌زا در شهرهای مورد مطالعه کمتر از 1×10^{-6} محاسبه شد که خطر سرطانی ناچیز را نشان می‌دهد (۲۸).

ارزیابی خطر بیماری‌های سرطانی

مقادیر متوسط طول عمر دوز روزانه (LADD) و خطر بیماری‌های سرطانی (CR) فلزات سنگین گرد و غبار خیابانی از طریق مسیر تنفس در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر CR در کودکان به ترتیب: آرسنیک (2×10^{-8}) $<$ نیکل ($1/36 \times 10^{-9}$) $<$ کادمیم ($2/14 \times 10^{-10}$) و در بزرگسالان به ترتیب آرسنیک ($3/3 \times 10^{-8}$) $<$ نیکل (1×10^{-9}) $<$ کادمیم ($2/23 \times 10^{-10}$) است. بدین ترتیب در هر دو گروه سنی، آرسنیک دارای بیشترین خطر سرطانی و کادمیم کمترین خطر را دارد. مقادیر CR در بزرگسالان بیشتر از کودکان می‌باشد.

مقدار TCR برای کودکان و بزرگسالان به ترتیب 1×10^{-8} و $2/45 \times 10^{-8}$ به دست آمد که کمتر از مقادیری است که سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا

جدول ۶- مقادیر متوسط طول عمر دوز روزانه (LADD) و خطر بیماری‌های سرطانی (CR) فلزات سنگین گرد و غبار خیابانی از طریق مسیر تنفس به تفکیک کودکان و بزرگسالان

Table 6. Values of the lifetime average daily dose (LADD) and carcinogenic risk (CR) of trace elements in street dust through inhalation route.

CR		LADD		Heavy metals
adults	children	adults	children	
3.3E-8	2E-8	2.19E-9	1.33E-9	As
3.51E-10	2.14E-10	5.59E-11	3.39E-11	Cd
2.23E-9	1.36E-9	2.66E-9	1.62E-9	Ni
4.03E-8	2.45E-8			TCR

سرب و آرسنیک برای کودکان بیشتر از حد آستانه ($HI = 1$) به دست آمد که نشان‌دهنده این است که این فلزات ممکن است خطرات بیماری‌های غیر سرطانی بالایی برای کودکان داشته باشند، اما برای بزرگسالان مقدار HI برای همه فلزات کمتر از ۱ محاسبه شد. خطر بیماری‌های سرطانی از طریق مسیر استنشاق برای کودکان و بزرگسالان نیز تقریباً ناچیز است. به طور کلی نتایج این تحقیق اطلاعات مفیدی را برای مقامات محلی ارایه می‌دهد تا برای کنترل و کاهش انتشار آلودگی، سیاست‌های پایدار را انتخاب و توسعه دهند.

نتیجه گیری کلی

مطالعه حاضر نشان داد که میانگین غلظت کادمیم، روی، سرب، نیکل و آرسنیک به ترتیب ۲، ۴/۴، ۲/۳، ۱/۹ و ۴/۷ برابر بیشتر از میانگین خاک‌های جهانی است و برعکس مس غلظت کمتر از میانگین خاک‌های جهانی را نشان داد. نتایج مدل PMF نشان داد که چهار منبع در تجمع فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی مهم هستند: منبع طبیعی (F1)، منبع پوشش لاستیک وسایل نقلیه (F2)، منبع گازهای صنعتی (F3) و منبع حمل و نقل (F4) به ترتیب ۲۷/۱٪، ۱۷/۳٪، ۲۹/۶٪ و ۲۶٪ از کل سهم آلاینده‌ها را تشکیل می‌دهند. طبق نتایج ارزیابی خطر، مقدار HI فلزات

منابع

- Chen, H., Zhan, C., Liu, S., Zhang, J., Liu, H., Liu, Z., Liu, T., Liu, X. & Xiao, W. (2022). Pollution characteristics and human health risk assessment of heavy metals in street dust from a typical industrial zone in Wuhan City, Central China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), p.10970. doi.org/10.3390/ijerph191710970
- Gebremariam, D., Kuhilen, T., Seboka, H. & Grum, B. (2024). Effect of Sidewalk Design and Obstructions on Pedestrian Mobility: A Case Study of the Main Streets of Mekelle City, Northern Ethiopia. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1), p.5672280. doi.org/10.1155/2024/5672280
- Alharbi, H.A., Rushdi, A.I., Bazeyad, A. & Al-Mutlaq, K.F. (2024). Aliphatic and cyclic hydrocarbons in urban street dust from Riyadh city, Saudi Arabia: Levels, distribution, and sources. *Atmospheric Pollution*

- Research*, 15(11), p.102261. **doi.org/10.1016/j.apr.2024.102261.**
4. He, Y., Zhang, Y., Peng, C., Wan, X., Guo, Z. & Xiao, X., (2021). Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil and street dust with different land uses, a case in Changsha, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), p.10733. **doi.org/10.3390/ijerph182010733.**
 5. Delgado-Iniesta, M.J., Marín-Sanleandro, P., Díaz-Pereira, E., Bautista, F., Romero-Muñoz, M. & Sánchez-Navarro, A., (2022). Estimation of ecological and human health risks posed by heavy metals in street dust of Madrid City (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), p.5263. **doi.org/10.3390/ijerph19095263.**
 6. Mahmoud, N., Al-Shahwani, D., Al-Thani, H. & Isaifan, R.J. (2023). Risk assessment of the impact of heavy metals in urban traffic dust on human health. *Atmosphere*, 14(6), p.1049. **doi.org/10.3390/atmos14061049.**
 7. Ma, Y., Zhang, Y. & Song, L. (2025). Ecological and health risk assessment and anthropogenic sources analysis of heavy metals in different types of urban road dust. *Process Safety and Environmental Protection*, p.106813. **doi.org/10.1016/j.psep.2025.106813.**
 8. Asgari, A., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. & Sadr, M.K. (2025). Source apportionment, ecological and health risks of potentially toxic elements in street dusts across different land uses in city of Kermanshah, Iran. *Scientific Reports*, 15(1), p.2517. **doi.org/10.1038/s41598-025-86677-6.**
 9. Ghanavati, N. (2018) Human health risk assessment of heavy metals in street dust in Abadan. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2018;11(1):63-74. **doi/full/10.5555/20193272040.**
 10. Sposito, G., Lund, L.J., & Chang, A.C. (1982). Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal*. 46: 260-265. **doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600020009x.**
 11. USEPA. (1989). Risk Assessment Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual, (Part A) Vol. 1. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA [EPA/540/1-89/002].
 12. USEPA. (2011). Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, EPA/600/R-09/052F.
 13. Eziz, M., Mohammad, A., Mamut, A. & Hini, G. (2018). A human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Yanqi Basin, Silk Road Economic Belt, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 24 (5): 1352-1366. **doi.org/10.1080/10807039.2017.1412818.**
 14. Tian, S., Liang, T., Li, K. & Wang, L. (2018). Source and path identification of metals pollution in a mining area by PMF and rare earth element patterns in road dust. *Science of the Total Environment*. 633: 958-966. **doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.227.**
 15. Benhaddya, M.L. & Hadjel, M. (2014). Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria. *Environmental*

- Earth Sciences*. 71 (3): 1473-1486.
doi.org/10.1007/s12665-013-2552-3.
16. Guan, Q., Wang, F., Xu, C., Pan, N., Lin, J., Zhao, R., Yang, Y. & Luo, H. (2018). Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: A case study in Hexi Corridor, northwest China. *Chemosphere*. 193: 189-197.
doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.151.
 17. Wang, F., Guan, Q., Tian, J., Lin, J., Yang, Y., Yang, L. & Pan, N. (2020). Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor. *Catena*. 191: 1-10.
doi.org/10.1016/j.catena.2020.104573.
 18. Suryawanshi, P.V., Rajaram, B.S., Bhanarkar, A.D. & Rao, C.C. (2016). Determining heavy metal contamination of road dust in Delhi, India. *Atmósfera*. 29 (3): 221-234.
doi.org/10.20937/ATM.2016.29.03.04
 19. Amato, F., Cassee, F.R., van der Gon, H.A.D., Gehrig, R., Gustafsson, M., Hafner, W., Harrison, R.M., Jozwicka, M., Kelly, F.J., Moreno, T. & Prevot, A.S. (2014). Urban air quality: the challenge of traffic non-exhaust emissions. *Journal of Hazardous Materials*. 275: 31-36.
doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.053.
 20. Souto-Oliveira, C.E., Babinski, M., Araújo, D.F., Weiss, D.J. & Ruiz, I.R. (2019). Multi-isotope approach of Pb, Cu and Zn in urban aerosols and anthropogenic sources improves tracing of the atmospheric pollutant sources in megacities. *Atmospheric Environment*. 198: 427-437.
doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.007.
 21. Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B. & Beverley, A.H. (2017). Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran. *Ecotoxicology and environmental safety*, 136, pp.92-103.
doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.10.037.
 22. Torghabeh, A.K., Jahandari, A. & Jamasb, R. (2019). Concentration, contamination level, source identification of selective trace elements in Shiraz atmospheric dust sediments (Fars Province, SW Iran). *Environmental Science and Pollution Research*. 26 (7): 6424-6435.
doi.org/10.1007/s11356-018-04100-2.
 23. Mihankhah, T., Saeedi, M. & Karbassi, A. (2020). A comparative study of elemental pollution and health risk assessment in urban dust of different land-uses in Tehran's urban area. *Chemosphere*. 241: 1-12.
doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124984.
 24. Keshavarzi, B., Tazarvi, Z., Rajabzadeh, M.A. & Najmeddin, A. (2015). Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran. *Atmospheric Environment*, 119, pp.1-10.
doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.001.
 25. Moradi Baseri, M., Kamani, H., Ashrafi, S., Bazrafshan, E., & Kord Mostafapour, F. (2018) Non-carcinogenic risk assessment of Hg and Cu in streets dusts of Zahedan city. *Iranian Journal of Health and Environment*, 11 (3) :391-402 (In persian).
 26. Hou, S., Zheng, N., Tang, L., Ji, X., Li, Y. & Hua, X. (2019). Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018. *Environment international*, 128, pp.430-437.
doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.046
 27. Jiang, Y., Shi, L., Guang, A.L., Mu, Z., Zhan, H. & Wu, Y. (2018).

Contamination levels and human health risk assessment of toxic heavy metals in street dust in an industrial city in Northwest China. *Environmental Geochemistry and Health*. 40 (5): 2007-2020. **doi.org/10.1007/s10653-017-0028-1.**

28. Jahandari, A. (2020). Pollution status and human health risk assessments of selected heavy metals in urban dust of 16 cities in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 27 (18): 23094-23107. **doi.org/10.1007/s11356-020-08585-8.**