

(OPEN ACCESS)

**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 Esfand Abad³,
Hamid Torangzar⁴, Abbas Ahmadi⁵**

1. Ph.D. Student of Environment, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: parvin.yaghobi@iau.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Agriculture and Natural Resources, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: javad.varvani@iau.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Environment, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: bahmanshams1357@iau.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Environment, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: htorangzar@iau.ac.ir
5. Associate Prof., Dept. of Agriculture and Natural Resources, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: ab.ahmadi1357@iau.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: 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 leads to their accumulation in the human body, posing health hazards. The study aimed to assess health risks and identify the contributions of pollutant sources to heavy metals in street dust in Boroujerd city using Positive Matrix Factorization (PMF).
Article history: Received: 02.12.2023 Revised: 05.29.2023 Accepted: 05.31.2023	
Keywords: Boroujerd, Health risk, Positive matrix factorization (PMF), Street dust	
	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 quantify the pollutants.
	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 average trend in heavy metal concentrations is as follows: Zn > Pb > Ni > As > Cu > Cd. According to the PMF results, the share of each factor in the total source share 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 values for lead and arsenic in children exceeded the threshold (HI=1), indicating that these metals may pose a high risk of non-cancerous diseases for children; however, for adults, the HI values for

all metals were calculated to be less than 1. The risk of cancer through inhalation for children and adults is also almost negligible.

Conclusion: The concentration of heavy metals in the street dust of the studied area was primarily influenced by industrial emissions. Considering vehicle traffic in Borujerd city, the transportation source (F4) also accounts for 26% of the region's total pollution, mainly consisting of lead and zinc. Given the high proportion of these metals, it can be assumed that their elevated concentrations are largely due to urban traffic. Overall, the results of this study provide useful information for local authorities to select and develop sustainable policies to control and reduce pollution emissions in Borujerd city.

Cite this article: Goudarzi Yaghoubi, Parvin, Varvani, Javad, Shams Esfand Abad, Bahman, Torangzar, Hamid, Ahmadi, Abbas. 2026. 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*, 16 (1), 133-149.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23300.2178

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 اسفندآباد^۳، حمید ترنج زر^۴، عباس احمدی^۵

۱. دانشجوی دکتری محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: parvin.yaghobi@iau.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: javad.varvani@iau.ac.ir

۳. استادیار گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: bahmanshams1357@iau.ac.ir

۴. دانشیار گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: htoranjzar@iau.ac.ir

۵. دانشیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: ab.ahmadi1357@iau.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
سابقه و هدف: از جمله اجزای پیچیده گرد و غبار خیابانی، فلزات سنگین می باشند 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 کرده اند. وجود فلزات سنگین در گرد و غبار خیابان باعث می شود که آن ها 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.	نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰
مواد و روش ها: ۴۱ نمونه گرد و غبار خیابانی جمع آوری شد. نمونه ها به صورت ترکیبی (مخلوط ۳ نمونه با هم در فاصله ۵ m تا ۱۰) و با وزن تقریبی ۱۰۰ g به دست آمدند و نمونه ها برای انجام آنالیز فلزات سنگین به آزمایشگاه منتقل گردیدند و در نهایت غلظت کل (شبه کل) فلزات As, Cd, Pb, Zn, Cu و Ni ابتدا از روش هضم اسیدی با استفاده از اسید نیتریک ۴ نرمال عصاره گیری شد. از مدل ماتریس تجزیه مثبت (PMF) برای شناسایی و سهم آلاینده ها استفاده شد.	واژه های کلیدی: بروجرد، خطر سلامتی، گرد و غبار خیابانی، مدل ماتریس تجزیه مثبت
یافته ها: میانگین غلظت سرب، کادمیم، مس، نیکل، روی و آرسنیک به ترتیب ۶۶/۶۱، ۰/۹۷، ۱۹، ۴۹/۷۶، ۲۶۴/۴۳ و ۴۰/۰۴ میلی گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین ترتیب غلظت فلزات سنگین	

براساس 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 غیرسرطانی 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 تحت‌تأثیر 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. به‌طورکلی نتایج این پژوهش 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: گودرزی‌یعقوبی، پروین، وروانی، جواد، شمس‌اسفندآباد، بهمن، ترنج‌زر، حمید، احمدی، عباس (۱۴۰۵). 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، ۱۶ (۱)، ۱۳۳-۱۴۹.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23300.2178



© 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 پژوهش‌گران 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 زیست‌محیطی 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 مانند 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 غیرواگیر 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 درون‌ریز 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) ارزیابی 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 قابل‌قبولی 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 زیست‌محیطی 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

سالانه ۱۸/۹ درصد و باد آرام سهم سالانه ۳۲/۷۸ درصد است.

مطالعات میدانی: در این پژوهش به منظور مطالعه غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی شهرستان بروجرد، نمونه‌برداری در فصل خشک در تیرماه ۱۴۰۲ از نقاط پرتراфик، 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 ۵ m تا ۱۰) و با وزن تقریبی ۱۰۰ g به‌دست آمدند. گرد و غبار از سطح زمین با استفاده از بُرس‌های قلمی در سطح تعیین شده جدا و بدون دخالت هر گونه ابزار فلزی در شیشه‌های کهربایی قرار گرفته و توسط فویل آلومینیوم مهروموم 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 4°C نگهداری شدند.

بود (۹). افزایش وسایل نقلیه و سایر منابع آلاینده در شهر بروجرد لزوم ارزیابی جامع از وضعیت آلودگی محیط‌زیست به خصوص فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی را ضروری می‌کند بنابراین این 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.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شهرستان بروجرد در استان لرستان می‌باشد. بروجرد دارای آب و هوای سرد کوهستانی با زمستان‌های پربرف 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 به‌صورت برف است. میانگین درازمدت بارش سالانه در ایستگاه هواشناسی شهرستان بروجرد ۴۵۹ میلی‌متر بوده است. میانگین دمای سالیانه نیز ۱۴/۸ درجه سانتی‌گراد است. باد غالب در بروجرد به‌سمت 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



شکل ۱- نقشه پراکندگی نقاط نمونه‌برداری در شهرستان بروجرد.

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

As با دستگاه اندازه‌گیری پلاسمای جفت شده القائی (ICP OES GBC Integra XL) قرائت شد.

ارزیابی خطر سلامتی انسان

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

تجزیه‌های آزمایشگاهی: پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه از الک ۲۰۰ مش عبور داده شدند و تا زمان آزمایش نمونه‌ها در یخچال در دمای ۴°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 اسپکتروفتومتری جذب اتمی مدل (AAS Model GBC 932AB Plus) و غلظت کل)

$$CDI_{ingest} = [(C_i \times IngR \times CF \times EF \times ED) / (BW \times AT_{noncarc})] \quad (۱)$$

$$CDI_{inhale} = [(C_i \times InhR \times EF \times ED) / (PEF \times BW \times AT_{noncarc})] \quad (۲)$$

$$CDI_{dermal} = [(C_i \times SA \times CF \times AF \times ABS \times EF \times ED) / (BW \times AT_{noncarc})] \quad (۳)$$

$$CDI_{total} = CDI_{ingest} + CDI_{inhale} + CDI_{dermal} \quad (۴)$$

فلزات (سال)، PEF فاکتور انتشار ذرات (مترمکعب بر کیلوگرم)، BW میانگین وزن بدن (کیلوگرم) و AT مدت زمان قرارگیری در معرض هر مقدار از فلزات به‌طور میانگین (روز)، SA ناحیه‌ای از پوست که با خاک در تماس است (سانتی‌مترمربع)، AF ضریب چسبندگی خاک (میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع) و ABS فاکتور جذب سطحی پوست است. متغیرهای (عامل) مورد استفاده برای محاسبه CDI در جدول ۱ نشان داده شده است.

که در آن، C_i غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)، CDI_{ingest} ، CDI_{inhale} و CDI_{dermal} به ترتیب مقدار میانگین جذب روزانه فلزات (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی است. $IngR$ و $InhR$ به ترتیب نرخ بلع (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و تنفس گرد و غبار (مترمکعب در روز)، CF فاکتور تبدیل، EF فراوانی قرار گرفتن در معرض فلزات (روز در سال)، ED مدت زمان قرار گرفتن در معرض

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	365×ED	80	1.36E-9	0.001	0.07	6032	20	350	10 ⁻⁶	20	100	Adults
70*365	365×ED	15	1.36E-9	0.001	0.2	2373	6	350	10 ⁻⁶	7.6	200	Children

پس از این که میانگین جذب روزانه فلزات (CDI) هر مسیر محاسبه خواهد شد، برای ارزیابی پتانسیل خطر بیماری‌های غیرسرطان‌زایی برای هر فلز از شاخص خطر (HQ) طبق معادله ۵ محاسبه شد:

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

که در آن، RfD نشان‌دهنده مقدار مرجع (میلی گرم 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 غیرسرطانی (HI) بیان شده و سپس HI با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد:

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

ارزیابی خطر بیماری‌های سرطانی: خطر بیماری‌های سرطانی (CR) نشان‌دهنده احتمال ابتلاء به هر نوع سرطان در طول مدت زندگی به دلیل قرار گرفتن 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 (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) است. اگر مقدار TCR کم‌تر از 1×10^{-6} (احتمال سرطان یک نفر از هر یک میلیون نفر) باشد اثرات قابل‌توجهی 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) غیرقابل قبول و برای سلامت انسان مخاطره‌آمیز 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.

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			
dermal	Inhalation	Ingestion	dermal	Inhalation	Ingestion	heavy metals
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

مزیت‌های PMF در 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).

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

مشخصات فاکتور در مدل PMF با به حداقل رساندن تابع هدف Q به دست می‌آیند (معادله ۱۰).

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

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.

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

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

که در آن، i تعداد نمونه، j نوع فلز، p تعداد فاکتورها و e_{ij} ماتریس باقی مانده است. سهم فاکتور و

که در آن، u_{ij} عدم قطعیت فلز j در نمونه i است. قبل از آنکه 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. براساس 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 نرم افزار

روی و آرسنیک بیش‌تر از استاندارد تعریف شده است در حالی‌که 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 ۰/۸، ۰/۳۴، ۰/۲۴، ۰/۱۰۰ و ۰/۱۰۰ بود. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیروف تأیید کرد که آرسنیک و نیکل دارای توزیع نرمال هستند در حالی‌که 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 حالی‌که به جز نیکل، فلزات آرسنیک، مس و کادمیم تغییر پذیری متوسطی را با ضریب تغییرات کم‌تر از ۰/۵۰ نشان دادند. مقادیر ضریب تغییرات برای فلزات سنگین که توسط عوامل طبیعی کنترل می‌شوند نسبتاً کم است در حالی‌که فلزاتی که تحت تأثیر عوامل انسان‌زاد هستند زیاد است (۱۵).

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 به‌ترتیب از ۲۰/۲ تا ۳۰۹/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای سرب، ۰/۵ تا ۲/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای کادمیم، ۸/۵ تا ۳۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای مس، ۲۸/۱ تا ۶۸/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای نیکل، ۷۹/۸ تا ۱۱۴۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای روی و ۹/۲۳ تا ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای آرسنیک، بود. میانگین غلظت سرب، کادمیم، مس، نیکل، روی و آرسنیک به‌ترتیب ۶۶/۶۱، ۰/۹۷، ۱۹، ۴۹/۷۶، ۲۶۴/۴۳ و ۴۰/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین 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 به‌ترتیب 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 می‌دهد. بر اساس استاندارد کیفیت خاک کشور کانادا، میانگین غلظت

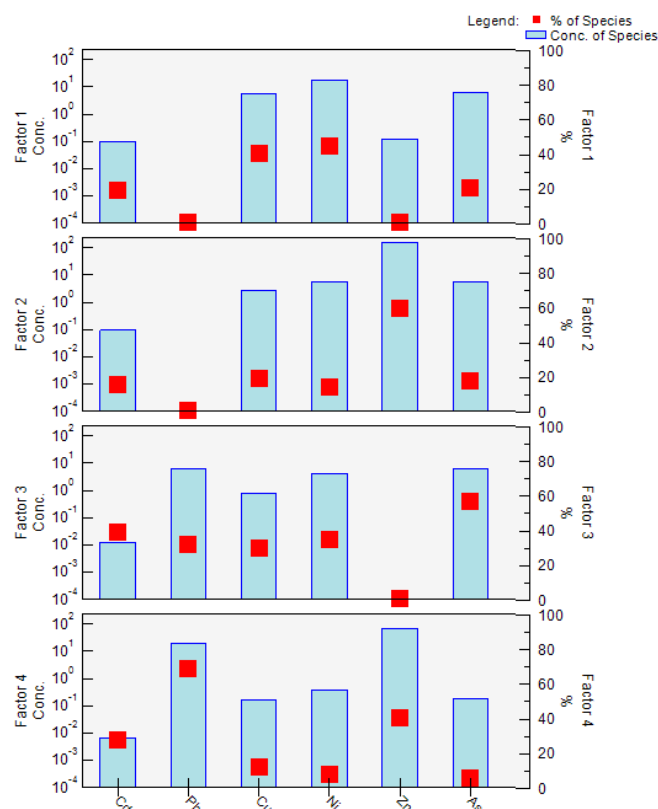
جدول ۳- خلاصه آماری غلظت کل فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) گرد و غبار خیابانی.

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

بیشترین باقی مانده فلزات بین ۳ و ۳- بود (۱۶). نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای فلزات سنگین بیش تر از ۶/۵ بود که به عنوان قوی طبقه بندی می شود، که بیان کننده این است که مدل PMF می تواند برای شناسایی منابع فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد و تغییرات در اندازه گیری ها 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 باقی مانده 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 حداقل بود و



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

Figure 2. Extracted factors based on the PMF.

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 ترافیک غیر آگروز مربوط می شود (۱۹). استفاده از

فاکتور اول (F1) شامل نیکل و مس می باشد که سهم آن ها به ترتیب ۴۵٪ و ۴۰٪ است. میانگین غلظت این فلزات کم تر از مقادیر زمینه است. بنابراین منشأ این فلزات ممکن است از منابع زمین شناسی باشد (۱۸). بنابراین فاکتور اول می تواند به عنوان منبع

روی در روغن‌های روان‌کننده و پوشش لاستیک وسایل نقلیه و استفاده مستمر از وسایل نقلیه در محیط‌های شهری باعث انتشار قابل‌توجهی از روی به اتمسفر می‌شود (۲۰). این فاکتور می‌تواند به عنوان منبع پوشش لاستیک وسایل نقلیه در نظر گرفته شود. محتمل‌ترین منبع عنصر روی در گرد و غبار خیابانی عمدتاً ناشی از اکسید روی استفاده شده در ولکانیزاسیون لاستیک تایرها است. فاکتور سوم (F3) عمدتاً شامل آرسنیک (۰.۵۷٪) و کادمیم (۰.۳۹٪) می‌باشد. منشأ این فلزات سنگین احتمالاً از منابع انسان‌زاد مانند ترافیک، 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 (۰.۶۸٪) و روی (۰.۴۰٪) است. با توجه به سهم بالای این فلزات می‌توان احتمال داد غلظت بالای این فلزات می‌تواند بیش‌تر ناشی از ترافیک شهری باشد. از این‌رو این فاکتور می‌تواند به عنوان منبع حمل و نقل تفسیر شود.

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 از کل سهم منابع آورده شده است. مشخص شده است که منبع طبیعی (F1)، منبع پوشش لاستیک وسایل نقلیه (F2)، منبع گازهای صنعتی (F3) و منبع حمل و نقل (F4) به ترتیب ۰.۲۷/۱٪، ۰.۱۷/۳٪، ۰.۲۹/۶٪ و ۰.۲۶٪ از کل سهم را تشکیل می‌دهند. غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار خیابانی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر تحت‌تأثیر گازهای صنعتی بودند. بنابراین با توجه به سهم بالای منابع آلاینده انسانی در منطقه مورد مطالعه، نباید تأثیر این آلاینده‌ها را بر انسان و اکوسیستم نادیده گرفت.

در جدول ۴ اعتبارسنجی 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- اعتبارسنجی مدل PMF

Table 4. PMF model validation.

%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

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:

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:

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.

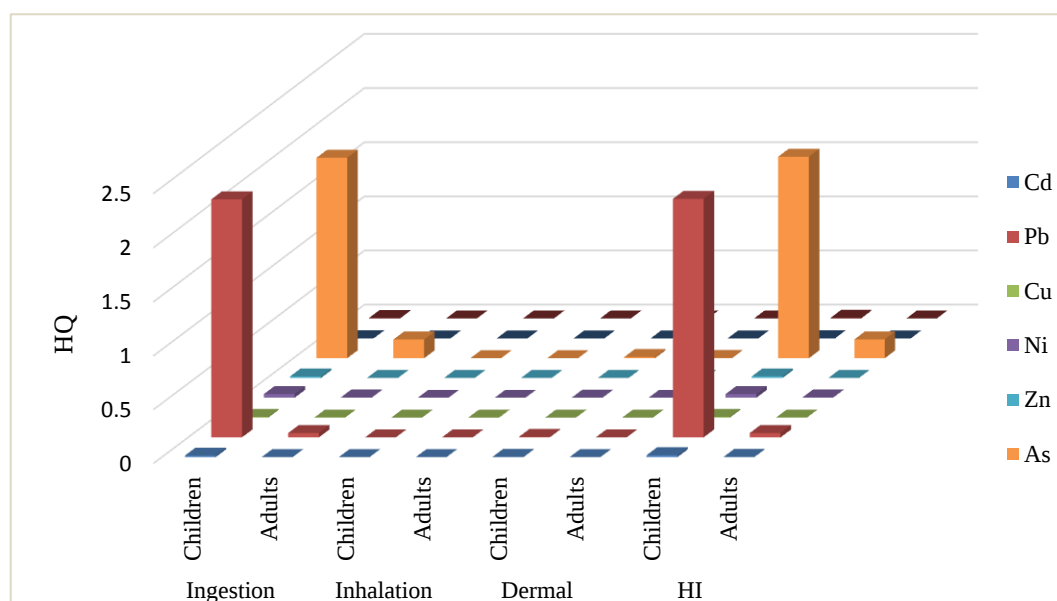
CDI total		CDI dermal contact		CDI Ingestion		CDI Inhalation		Heavy metals
Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	
5.23E-5	5.57E-4	2.2E-7	1.32E-6	7.66E-9	1.55E-8	5.21E-5	5.56E-4	As
1.34E-6	1.42E-5	5.62E-9	3.37E-8	1.96E-10	3.96E-10	1.33E-6	1.42E-5	Cd
2.51E-5	2.67E-4	1.05E-7	6.32E-7	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

مقادیر شاخص خطر (HQ) و شاخص خطر
 تجمعی غیرسرطانی (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 طرقله 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 اختلال رشد، کاهش
 ضریب هوشی (IQ)، کاهش درک کلامی، از دست
 دادن حافظه کوتاه‌مدت 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

پژوهش است (۲۵). هو و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه گرد و غبار خیابانی در کشور چین، خطرات غیرسرطانی 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).

غیرسرطانی برای بزرگسالان از نظر فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه قابل توجه نمی‌باشد. مرادی باصری و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه ارزیابی ریسک غیرسرطانی فلزات سنگین جیوه 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



شکل ۳- مقادیر شاخص خطر (HQ) و شاخص خطر تجمعی غیرسرطانی (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.

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 $2/45 \times 10^{-8}$ و $4/03 \times 10^{-8}$ به دست آمد که کمتر از مقادیری است که سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا (USEPA) توصیه می‌کند (1×10^{-6})، بنابراین 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

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 ($2/23 \times 10^{-9}$) < کادمیم ($3/51 \times 10^{-10}$) است. بدین ترتیب در هر دو گروه سنی، آرسنیک دارای

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 می دهد (۲۸).

سرطانی فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه صنعتی شمال غربی چین مقدار CR کادمیم و کروم را برای کودکان و بزرگسالان به ترتیب $(5/66 \times 10^{-11})$ - $(1/09 \times 10^{-10})$ و $(4/61 \times 10^{-10})$ - $(8/93 \times 10^{-10})$ به دست آوردند که بیانگر خطرپذیری ناچیز این فلزات است (۲۷). جهانگیری (۲۰۲۰) با مطالعه گرد و غبار

جدول ۶- مقادیر متوسط طول عمر دوز روزانه (LADD) و خطر بیماری های 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

فلزات سرب و آرسنیک برای کودکان بیش تر از حد آستانه ($HI=1$) به دست آمد که نشان دهنده این است که این فلزات ممکن است خطرات بیماری های غیرسرطانی بالایی برای کودکان داشته باشند، اما برای بزرگسالان مقدار HI برای همه فلزات کمتر از ۱ محاسبه شد. خطر بیماری های سرطانی از طریق مسیر استنشاق برای کودکان و بزرگسالان نیز تقریباً ناچیز است. به طور کلی نتایج این پژوهش اطلاعات مفیدی را برای مقامات محلی ارایه می دهد تا برای کنترل و کاهش انتشار آلودگی، سیاست های 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، ۳/۲، ۹/۱ و ۷/۴ برابر بیش تر از میانگین خاک های جهانی است و برعکس مس غلظت کم تر از میانگین خاک های 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 (F_1)، منبع پوشش لاستیک وسایل نقلیه (F_2)، منبع گازهای صنعتی (F_3) و منبع حمل و نقل (F_4) به ترتیب ۱/۲۷٪، ۳/۱۷٪، ۶/۲۹٪ و ۲۶٪ از کل سهم آلاینده ها را تشکیل می دهند. طبق نتایج ارزیابی خطر، مقدار HI

منابع

1. 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:10.1016/j.jhazmat.2014.04.053.
2. 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 the city of Kermanshah, Iran. *Scientific Reports*, 15(1), 2517. doi:10.1038/s41598-025-86677-6.
3. 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:10.1007/s12665-013-2552-3.
4. 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), 10970. doi:10.3390/ijerph191710970.
5. 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, 92-103. doi:10.1016/j.ecoenv.2016.10.037.
6. 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), 5263. doi:10.3390/ijerph19095263.
7. 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*, 24(5), 1352-1366. doi:10.1080/10807039.2017.1412818.
8. 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), 5672280. doi:10.1155/2024/5672280.
9. Ghanavati, N. (2018). Human health risk assessment of heavy metals in street dust in Abadan. *Iranian Journal of Health and Environment*, 11(1), 63-74. doi:10.5555/20193272040.
10. 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:10.1016/j.chemosphere.2017.10.151.
11. 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), 10733. doi:10.3390/ijerph182010733.
12. 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, 430-437. doi:10.1016/j.envint.2019.04.046.
13. 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:10.1007/s11356-020-08585-8.
14. 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:10.1007/s10653-017-0028-1.
 15. 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, 1-10. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.001.
 16. 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*, 106813. doi:10.1016/j.psep.2025.106813.
 17. 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), 1049. doi:10.3390/atmos14061049.
 18. 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, 124984. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.124984.
 19. Moradi Baseri, M., Kamani, H., Ashrafi, S., Bazrafshan, E., & Kord Mostafapour, F. (2018). Non-carcinogenic risk assessment of Hg and Cu in street dusts of Zahedan City. *Iranian Journal of Health and Environment*, 11(3), 391-402. [In Persian]
 20. 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:10.2136/sssaj1982.0361599500460020009x.
 21. 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:10.1016/j.atmosenv.2018.11.007.
 22. Suryawanshi, P. V., Rajaram, B. S., Bhanarkar, A. D., & Rao, C. C. (2016). Determining heavy metal contamination of road dust in Delhi, India. *Atmosfera*, 29(3), 221-234. doi:10.20937/ATM.2016.29.03.04.
 23. 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:10.1016/j.scitotenv.2018.03.227.
 24. Torghabeh, A. K., Jahandari, A., & Jamasb, R. (2019). Concentration, contamination level, and 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:10.1007/s11356-018-04100-2.
 25. USEPA. (1989). Risk Assessment Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual (Part A). Vol. 1. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA.
 26. USEPA. (2011). Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). EPA/600/R-09/052F. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
 27. 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, 104573. doi:10.1016/j.catena.2020.104573.

