Vol. 8, No. 1, Spring and Summer 2022, pp. 28-46 ISSN (Print): 2538-449X

Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

Study of contamination, sources and health risk of potentially toxic elements in dusts of Tehran's elementary schools

Fatemeh Hashemabadi[1], Ata Shakeri[2*], Meisam Rastegari Mehr[3]

1. Master of Science, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Alborz, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Alborz, Iran
3. Assistant professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Alborz, Iran

Article info

Article history
Received: 24 May 2022
Accepted: 01 September 2022

Keywords:
Potentially toxic elements, Indoor dust, Elementary schools, PMF model.

Abstract

Concerns about dust contamination with potentially toxic elements are especially important in environments such as schools (particularly elementary schools) because children are more vulnerable to contaminants than adults. Therefore, due to the diversity of air pollution sources in Tehran, the present study was conducted to determine the severity of pollution, origin and health risk assessment of some potentially toxic elements in the dust of elementary schools in three districts of Tehran. For this purpose, 27 dust samples were collected from the indoor and outdoor areas of schools, and the concentration of elements was measured by induced coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). Calculation of different geochemical indices showed that the four elements Cu, Zn, Sb and Pb have the highest enrichment and pollution compared to other elements. The results of calculating the health risk index revealed that As, Cu, Ni, Pb and Zn have similar hazard quotient (HQ) values in children and adults. Also, the health risk of exposure to Cr and Mn through dermal contact is higher in adults than in children, and the total hazard index (HI) of all elements in children is higher than in adults. Among the studied elements, two elements, lead and chromium, threaten the health of children more than others. Based on principal component analysis and positive matrix factorization (PMF) model, three geogenic, traffic and mix sources were identified for different elements. Pb, Zn, Cu and Cd were considered as indicators of traffic origin. The results of this study reveal the need for special attention to students' health.

***Corresponding author:** Ata Shakeri; **E-mail:** atashakeri@khu.ac.ir

How to cite this article: Hashemabadi, F., Shakeri, A., Rastegari Mehr, M., 2022. Study of contamination, sources and health risk of potentially toxic elements in dusts of Tehran's elementary schools. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(1), 28-46

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

On a global scale, among the environmental hazards, air pollution in urban environments with suspended particles or dust is particularly important and can cause an increase in the death rate in cities (WHO, 2006). The chemical composition of dust particles, especially the concentration of trace elements, is the controlling factor for their potential health effects (Hsu et al., 2016). The study of the chemical composition not only helps to evaluate the toxicity of suspended particles, but it can also be used to determine the origin and is especially effective in determining natural and anthropogenic sources (Han et al., 2015). The pollution of potentially toxic elements is one of the most common pollutions caused by human activities, because it has the ability to bio-accumulate and even in low concentrations can cause health abnormalities (Rastegari Mehr et al., 2016). In recent years, several studies have been carried out in Iran in the field of pollution of potentially toxic elements in dust. Considering the size of the city of Tehran, the air pollution in a large number of days of the year, the presence of numerous polluting sources in this city, its high population and also the greater risk of trace elements for children, the present study was carried out with the aim of evaluating the pollution of potentially toxic elements in dust in Tehran schools using geochemical factors, and determining the source based on principal component analysis and PMF model.

Material and methods

In this study, 27 dust samples were collected from inside (17 samples) and outside (10 samples) classrooms in 6 schools located in the 12th, 13th and 18th districts of Tehran. These three districts represent the amount of pollution in the centre, pollution in the east, and an area with less traffic on the outskirts of Tehran. The samples were air dried, and particles smaller than 63 µm were analysed using ICP-MS after multi-acid digestion, to determine the concentration of selected elements. Geochemical and statistical methods including enrichment factor (EF), contamination factor (CF), hazard index (HI), principal component analysis (PCA) and positive matrix factorization (PMF) were used for data analysis (Ho et al., 2010; Naimi and Ayoubi, 2013; Tashakor et al., 2021; Sun et al., 2016).

Results and discussion

The results showed that the average concentration of Pb, Zn, Cu and Sb have the largest difference compared to their global average in soil. Fe, Pb, Cu and Sb having the highest coefficient of variation in the region, show the most unbalanced spatial distribution among the studied elements. The average values of the enrichment factor and contamination factor showed that Sb, Cu and Zn are the most enriched in the indoor dust and Cu, Sb, Zn and Pb are the most enriched in the outdoor dust. In general, in most of the sampling stations the enrichment factor is high, indicating high contamination of dusts for most of the studied metals. Also, based on the intensity of pollution, the three studied districts can be considered as district 13 > district 12 > district 18. The results of the risk assessment revealed that exposure to dust particles for all elements through ingestion in children shows a greater risk than skin contact and inhalation. The highest value of the calculated risk index is related to Cr, As and Pb. In outdoor dust, the risk index for Pb and Cr in children is more than one and threatens children's health.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

Based on the principal component analysis, V, Mn, Al, Co and Fe in the dust of schools in the region are mainly originated from geogenic sources, while Cd, Pb, Zn, Cu and Sb with more pollution in dust are mainly originated from anthropogenic sources, especially traffic. On the other hand, the PMF model determined three main sources for the elements in dust, including traffic, geogenic and mix sources. It should be noted that the non-geogenic origin of the elements in this component can be sources other than traffic, such as paint, industries, and car repair shops in some areas.

Conclusion

In general, this study showed that school dusts of Tehran are highly contaminated, and urban elements (Cd, Cu, Pb and Zn) are highly enriched. The results of statistical analysis and PMF model indicate the important role of traffic in the release of Pb, Cu, Cd, Zn and to some extent Sb into the environment. In general, the schools of region 13 (Shahid Andarzgo School, Parvin Etisami School, and Mahdiun School) and Mehr Maryam School in region 12 have the most pollution. According to the obtained results, the occurrence of severe pollution of some potentially toxic elements in school dust, and the exposure of students to them in the long-term will cause many problems and there is a serious need to manage the main source of these pollutants, including high traffic load, use of non-standard fuel and worn out cars. This study, along with investigating the mobility of metallic elements, can provide a basis for risk assessment and mid-term and long-term planning for pollutant control.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

جلد ۸، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۱، صفحه ۲۸ تا ۴۶ شاپای چاپی: 2538-449X

مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

مطالعه آلودگی، منشأ و خطر سلامت عناصر بالقوه سمناک در غبار مدارس ابتدایی تهران

فاطمه هاشم‌آبادی[۱]، عطا شاکری[۲*]، میثم رستگاری مهر[۳]

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران

۲. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران

۳. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۰

واژه های کلیدی

عناصر بالقوه سمناک، غبار داخلی، مدارس ابتدایی، مدل PMF.

چکیده

نگرانی‌ها در ارتباط با آلودگی غبار به عناصر بالقوه سمناک در محیط‌هایی مانند مدارس (به‌ویژه مدارس ابتدایی) اهمیت ویژه‌ای دارد چرا که کودکان در برابر آلاینده‌ها آسیب‌پذیرتر از بزرگسالان هستند. بنابراین با توجه به تنوع منابع آلاینده هوا در تهران، مطالعه حاضر با هدف تعیین شدت آلودگی، منشأیابی و ارزیابی خطر سلامت برخی از عناصر بالقوه سمناک در غبارهای مدارس ابتدایی سه منطقه از کلان‌شهر تهران انجام شد. برای این منظور ۲۷ نمونه از غبار داخلی و بیرونی به ترتیب از فضای داخل کلاس‌ها و محوطه بیرونی مدارس نمونه‌برداری شد و غلظت عناصر با طیف سنج جرمی پلاسمای جفتیده القایی (ICP-MS) اندازه‌گیری گردید. محاسبه شاخص‌های زمین‌شیمیایی مختلف نشان داد که چهار عنصر مس، روی، آنتیموان و سرب بیشترین غنی‌شدگی و آلودگی را نسبت به دیگر عناصر دارند. نتایج محاسبه شاخص خطر سلامت نشان داد آرسنیک، مس، نیکل، سرب و روی مقادیر خارج قسمت خطر (HQ) مشابهی را در کودکان و بزرگسالان دارند. همچنین خطر سلامت ناشی از قرارگیری در معرض کروم و منگنز از مسیر تماس پوستی در بزرگسالان بیش از کودکان بوده و شاخص خطر کل (HI) تمام عناصر در کودکان بیشتر از بزرگسالان است. از میان عناصر مورد مطالعه، دو عنصر سرب و کروم بیش از سایرین سلامتی کودکان را تهدید می‌کنند. بر اساس تحلیل مؤلفه اصلی و مدل فاکتور سازی ماتریس مثبت (PMF)، سه منشأ زمین‌زاد، ترافیک و ترکیبی برای عناصر مختلف تعیین شد. عناصر سرب، روی، مس و کادمیم به عنوان شاخص منشأ ترافیک در نظر گرفته شدند. نتایج این مطالعه نیاز به توجه ویژه به سلامت دانش آموزان را آشکار می‌سازد.

***نویسنده مسئول:** عطا شاکری atashakeri@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: هاشم‌آبادی، ف.، شاکری، ع.، رستگاری مهر، م. (۱۴۰۱) مطالعه آلودگی، منشأ و خطر سلامت عناصر بالقوه سمناک در غبار مدارس ابتدایی تهران، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۱، صفحه ۲۸ تا ۴۶

CC BY NC

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

مقدمه

تعداد و تنوع آلودگی‌ها در محیط اطراف ما در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است (Long et al., 2013). این آلاینده‌ها می‌توانند محیط‌های مختلف را تحت تأثیر قرار داده و آن‌ها را برای سلامت انسان ناایمن سازند. از میان خاک، رسوب و غبار که عمدتاً از پوسته زمین منشأ می‌گیرند، غبار مهم‌ترین محیطی است که بر سلامت انسان و سایر موجودات اثرگذار است (Rastegari Mehr et al., 2016). در مقیاس جهانی از میان مخاطرات زیست محیطی، آلودگی هوای محیط‌های شهری با ذرات معلق یا غبار اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌تواند موجب افزایش نرخ مرگ و میر در شهرها شود (WHO, 2006). ذرات معلق مجموعه‌ای از ذرات ریز و درشت با منشأهای متفاوت هستند و قرارگیری در معرض مقادیر بالای این ذرات با مشکلات جدی سلامت در ارتباط است (Pope and Dockery, 2006).

غبارهای شهری می‌توانند از خاک، سیمان، نمک دریا، تبخیر سوخت اتومبیل‌ها، خروجی اگزوز خودروها، فرسایش سطح جاده‌ها و یا تعلیق مجدد غبار نهشته شده در سطح خیابان‌ها منشأ بگیرند (Zhao et al., 2006; Maricq, 2007; Tashakor et al., 2021). ترکیب شیمیایی ذرات غبار، به ویژه غلظت عناصر جزئی، عامل کنترل کننده اثرات بالقوه سلامتی آن‌هاست (Hsu et al., 2016). مطالعه ترکیب شیمیایی، نه تنها به ارزیابی سمناکی ذرات معلق کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در تعیین منشأ نیز استفاده شود و به ویژه در تعیین منابع طبیعی و انسان‌زاد مؤثر باشد (Perrino et al., 2008; Han et al., 2015). آلودگی عناصر بالقوه سمناک از شایع‌ترین آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی است، چراکه قابلیت زیست انباشت داشته و حتی در غلظت‌های پایین می‌توانند موجب بروز ناهنجاری‌های سلامتی شوند (Rastegari Mehr et al., 2016). این فلزات با توجه به پایداری، سمیت و طبیعت غیر قابل تخریب در محیط زیست، تهدیدی جدی برای انسان هستند (Khan et al., 2008).

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در ایران در زمینه آلودگی عناصر بالقوه سمناک در غبار انجام شده است. زراسوندی و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه ذرات گرد و غبار در خوزستان نشان دادند روند میزان فاکتور آلودگی عناصر به صورت سرب > روی > کادمیم > آرسنیک > نیکل > کبالت> وانادیم است که میزان این آلاینده‌ها در فصول مختلف متفاوت بوده و منشأ شهری برای آن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. مطالعه ارسلانی و همکاران (۱۳۹۹) بر روی غبار ریزشی تهران بیانگر آلودگی نواحی شرقی شهر نسبت به مناطق غربی است که دلیل آن عمدتاً جهت شرق به غرب باد غالب عنوان شده است. در این مطالعه دلیل غلظت بالاتر عناصر در غبار تهران در فصل زمستان استفاده از وسایل گرمایشی در فصل سرد سال عنوان شده است. همچنین دهقانی و همکاران (۲۰۱۷) با مطالعه خاک و غبار خیابان شهر تهران نشان دادند که فلزات سمی با منشأ انسان‌زاد الزاماً در جزء زیست دسترس‌پذیر استخراج ترتیبی قرار نمی‌گیرند. قنواتی (۱۳۹۷) با مطالعه غبار خیابانی شهر آبادان نشان داد که منبع آلودگی عناصر بالقوه سمناک فعالیت انسان‌زاد از قبیل ترافیک، تأسیسات صنعتی و سوخت‌های فسیلی در منطقه مورد مطالعه است. همچنین کروم در این منطقه بیشترین خطر سرطان‌زایی و سرب کمترین مقدار را در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان نشان داد. با توجه به وسعت شهر تهران، آلودگی هوا در تعداد زیادی از روزهای سال، وجود منابع آلاینده متعدد در این شهر، جمعیت بالای

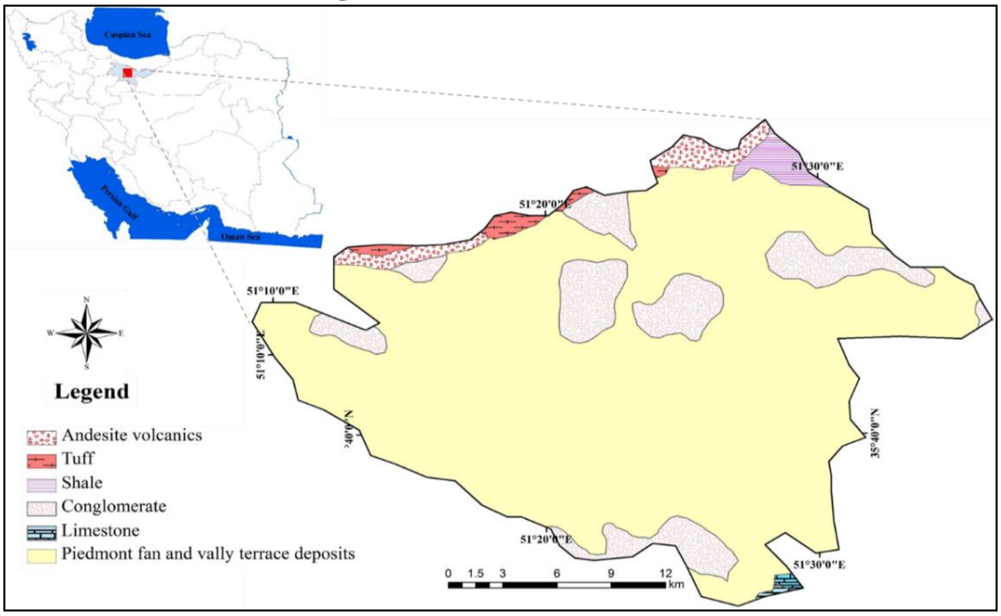
[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

آن و همچنین خطر بیشتر عناصر جزئی برای کودکان، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمناک در غبار موجود در مدارس تهران با استفاده از شاخص‌های زمین‌شیمیایی، و تعیین منشأ بر اساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی و مدل PMF انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهر تهران وسعتی بیش از ۷۰۰ کیلومتر مربع داشته و بین ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی واقع شده است. شهر تهران دارای جمعیت ۸۶۷۹۹۳۶ نفر بوده و از نظر تقسیمات اداری به ۲۲ منطقه، ۱۲۳ ناحیه و ۳۵۵ محله تقسیم شده است (سالنامه آماری تهران ۱۳۹۶). در این مطالعه سه منطقه ۱۲، ۱۳ و ۱۸ از میان مناطق ۲۲ گانه مطالعه شده است. در طی یک دوره سی‌ساله، میانگین بارندگی سالانه شهر تهران ۲۴۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده و به طور میانگین، دمای سالیانه بین ۰ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد متغیر است (Dehghani et al., 2018). از نظر زمین‌شناختی، استان تهران در شمال زون ایران مرکزی و در مجاورت ارتفاعات چین‌خورده البرز قرار دارد. سنگ‌ها و رسوبات دوره های مختلف زمین‌شناسی در این استان دیده می‌شوند که رسوبات کواترنری و پس از آن نهشته‌های ترشیاری، بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده‌اند. به طور کلی تنوعی از رخنمون‌ها شامل نفوذی‌های بازیک، گابرو، گرانیت، دیوریت، شیل، ماسه سنگ، توف، کنگلومرا، آهک و دولومیت، ژیپس، مارن و آبرفت‌های کواترنری و .... در محدوده استان تهران مشاهده می‌شود (محمودیان و همکاران، ۱۳۸۴). شهر تهران نیز عمدتاً بر روی رسوبات کواترنری واقع شده و رخنمون‌هایی از آندزیت، توف، شیل، کنگلومرا و آهک نیز در نقاط مختلف شهر وجود دارد. نقشه زمین‌شناسی شهر تهران در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی شهر تهران

Fig 1. Geological map of Tehran City

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

نمونه‌برداری و تجزیه نمونه‌ها

از مجموع ۲۲ منطقه کلان‌شهر تهران، منطقه ۱۲ به عنوان نماینده میزان آلودگی در مرکز، منطقه ۱۳ به نوعی نشان‌دهنده آلودگی در شرق تهران و منطقه ۱۸ یک منطقه با بار ترافیکی کمتر در حاشیه تهران مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌برداری از فضای داخلی کلاس‌های شش واحد آموزشی از بخش‌های مختلف مانند حاشیه تخته وایت‌بورد، نیمکت‌ها و ویدئو پروژکتور انجام شد. همچنین به‌منظور مقایسه آلودگی داخل کلاس و محیط بیرونی، در برخی مدارس از محیط بیرونی و حیاط مدرسه نیز نمونه غبار گرفته شد. در مجموع ۲۷ نمونه غبار از فضای داخلی و بیرونی کلاس در اسفند ماه ۹۷ جمع‌آوری شد، که از این تعداد ۱۷ نمونه از داخل کلاس و ۱۰ نمونه از محوطه مدرسه برداشته شد. نمونه‌ها به کیسه‌های زیپ‌دار کد گذاری‌شده منتقل و برای آماده‌سازی به آزمایشگاه زمین‌شیمی دانشگاه خوارزمی منتقل شدند. نمونه‌ها در دمای محیط خشک شده و برای جداسازی غبار از مواد زائد از الک با مش ۲۳۰ استفاده شد. ذرات غبار با اندازه کوچک‌تر از ۶۳ میکرون در کیسه‌های پلاستیکی قرارگرفته و برای تعیین غلظت کل عناصر موردمطالعه توسط طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) به آزمایشگاه زرآزما ارسال شدند. جدول ۱ موقعیت و ویژگی‌های نقاط نمونه‌برداری از غبار مدارس را نشان می‌دهد.

روش‌شناسی تحلیل داده‌ها

در این مطالعه از شاخص‌های زمین شیمیایی شامل ضریب غنی‌شدگی (Eby, 2016)، فاکتور آلودگی (Hakanson, 1980) و شاخص خطر سلامت (USEPA, 2001) استفاده شد. همچنین برای تعیین منشأ عناصر انتخابی از آزمون آماری تحلیل مؤلفه اصلی (Principal Component Analysis) با استفاده از نرم افزار SPSS .V23، و مدل PMF (EPA PMF. V5) استفاده شد.

برای محاسبه غنی‌شدگی عناصر در نمونه‌های غبار، از عنصر اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع و از غلظت جهانی عناصر در خاک به عنوان غلظت زمینه طبق معادله زیر استفاده شد (Ho et al., 2010; Rastegari Mehr et al., 2016):

$$EF = \frac{\left(C_x / C_{Sc}\right) Sample}{\left(C_x / C_{Sc}\right) background} \quad (۱)$$

در این رابطه Cx (sample) غلظت عنصر در نمونه غبار مورد مطالعه و CSc (sample) غلظت عنصر مرجع در نمونه غبار است. Cx (background) و CSc (background) نیز به ترتیب غلظت فلز در نمونه مرجع و غلظت عنصر مرجع را در محیط مرجع نشان می‌دهد.

همچنین فاکتور آلودگی عناصر بالقوه سمناک در این مطالعه با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (Naimi and Ayoubi, 2013):

$$CF = \frac{[C] Sample}{[C] Background} \quad (۲)$$

در این رابطه CF فاکتور آلودگی، [C] sample غلظت عنصر مورد بررسی و [C] background غلظت عنصر در نمونه مرجع (غلظت جهانی عناصر در خاک) است.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

جدول ۱- موقعیت و اطلاعات مدارس انتخاب شده جهت نمونه‌برداری
Table 1. Location and information of selected schools for sampling

نام مدرسه	نام منطقه	نوع مدرسه	X	Y	Out/Indoor	کد نمونه
شهید اندرزگو	۱۳	دخترانه-دولتی	539810	3949996	In	D_1
					Out	D_2
میرزا کوچک خان	۱۳	دخترانه-دولتی	529855	3957929	In	D_3
					Out	D_4
پروین اعتصامی	۱۳	دخترانه-دولتی	544219	3952034	In	D_5
ابوذر	۱۳	پسرانه-دولتی	541492	3949950	In	D_6
					Out	D_7
مهدیون	۱۳	پسرانه-دولتی	543792	3950051	In	D_8
علویه	۱۳	پسرانه-دولتی	544588	3952329	In	D9
هدی	۱۲	دخترانه-دولتی	540823	3949426	In	D_{10}
					Out	D_{11}
مهر مریم	۱۲	دخترانه-دولتی	537611	3949916	In	D_{12}
					Out	D_{13}
علوی اسلامی	۱۲	دخترانه-دولتی	539946	3949659	In	D_{14}
شهید محمد امیری کیا	۱۲	پسرانه-دولتی	540319	3948792	Out	D_{15}
					In	D_{16}
امام سجاد	۱۲	پسرانه-دولتی	540378	3947891	In	D_{17}
					Out	D_{18}
سوم شعبان	۱۸	دخترانه-دولتی	528299	3956731	In	D_{19}
					Out	D_{20}
سیزده رجب	۱۸	دخترانه-دولتی	531031	3944948	In	D_{21}
پروین اعتصامی	۱۸	دخترانه-دولتی	521657	3949236	In	D_{22}
					Out	D_{23}
شهدای ایران تایر (شهید تهرانی)	۱۸	دخترانه-دولتی	532624	3943902	In	D_{24}
					Out	D_{25}
متقین	۱۸	دخترانه-دولتی	531088	3945263	In	D_{26}
شهدای خلیج فارس	۱۸	دخترانه-دولتی	522419	3956613	In	D_{27}

علاوه بر این دو شاخص، خطر سلامت ناشی از قرارگیری در معرض غبار آلوده به عناصر بالقوه سمناک از سه مسیر بلع، تنفس و تماس پوستی نیز بر اساس روابط ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا محاسبه و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت (USEPA, 2001; Zheng et al., 2010; Rastegari Mehr et al., 2016; Tashakor and Modabberi, 2021).

در این مطالعه برای شناسایی بهتر منابع اصلی آلاینده‌ها در غبار علاوه بر تحلیل مؤلفه اصلی، از مدل فاکتور ماتریس مثبت (PMF) استفاده شد که یک ابزار مدل‌سازی پیشرفته است و در طیف گسترده‌ای از داده‌ها از جمله آلودگی هوا، خاک و رسوبات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hopke et al., 2006). غلظت‌های مشاهده‌شده به عنوان مجموعه‌ای از p منشأ توسط این مدل توضیح داده می‌شود:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^{p} g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (۳)$$

X_{ij} غلظت j-th از هم نوع در نمونه i-th از مجموعه داده اصلی است، g_{ik} سهم عامل منبع k-th در نمونه i-th است، F_{kj} بخشی از گونه‌های j-th در منبع K-th است، e_{ij} ماتریس باقی‌مانده است، و p تعداد کل منابع حل شده است. فاکتور سهم و پروفایل توسط مدل PMF به

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

وسیله عملکرد هدف Q به حداقل می‌رسد (Sun et al., 2016).

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^{p} g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right] \quad (۴)$$

که در آن U_{ij} مقدار عدم قطعیت تخمین زده شده و دو نسخه Q است که یک پارامتر مهم برای PMF است که برای مدل اجرا می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد مدل به طور کامل در راهنمای کاربر نرم افزار ارائه شده است.

نتایج و بحث

خلاصه آماری غلظت ۱۴ عنصر بالقوه سمناک منتخب (آرسنیک، کادمیم، کبالت، کروم، مس، آهن، منگنز، آلومینیم، آهن، وانادیم، آنتیموان، سرب، روی و نیکل) در غبار داخلی و بیرونی (حیاط مدارس) و نیز میانگین غلظت عناصر در خاک جهانی در جدول ۲ آورده شده است.

بر اساس نتایج، میانگین غلظت عناصر آلومینیم و آهن در غبار داخلی و بیرونی مدارس مطالعه شده در شهر تهران از میانگین غلظت این عناصر در خاک جهانی کمتر است، اما میانگین غلظت عناصر کبالت و وانادیم و منگنز در غبار داخلی مدارس مورد مطالعه تقریباً نزدیک به میانگین غلظت آن‌ها در خاک جهانی و در غبار بیرونی اندکی بیشتر از غلظت آن‌ها در خاک جهانی است. میانگین غلظت عناصر سرب، روی، مس و آنتیموان بیشترین اختلاف را نسبت به میانگین جهانی آن‌ها در خاک نشان می‌دهد. آهن، سرب، مس و آنتیموان با دارا بودن بیشترین مقادیر ضریب تغییرات در منطقه، نامتوازن‌ترین توزیع مکانی را بین عناصر موردمطالعه نشان می‌دهند. روند کاهشی میانگین غلظت فلزات نسبت به میانگین آن‌ها در خاک جهانی در غبار داخلی و غبار بیرونی به صورت زیر است:

غبار داخلی

Sb>Cu>Zn>Pb>Mo>Ni>Cd>As>Cr>Co>Mn>V>Fe>Al

غبار بیرونی

Cu>Zn>Sb>Pb>Mo>Ni>As>Cd>Cr>Mn>Co>V>Fe>Al

بررسی شدت آلودگی و خطر سلامت

نتایج محاسبه ضریب غنی‌شدگی برای ۱۴ عنصر مورد مطالعه در نمونه‌های غبار داخلی و بیرونی مدارس مطالعه شده شهر تهران با استفاده از عنصر اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع در شکل ۲ آورده شده است. مقادیر میانگین این شاخص نشان می‌دهند که در غبار داخلی عناصر آنتیموان، مس و روی در رده غنی‌شدگی خیلی شدید، سرب در رده غنی‌شدگی شدید، نیکل و مولیبدن در رده غنی‌شدگی متوسط تا شدید، آرسنیک، کادمیم و کروم در رده غنی‌شدگی متوسط، منگنز، کبالت، وانادیم و آهن در رده غنی‌شدگی کم و آلومینیم در رده بدون غنی‌شدگی قرار دارند. در غبار بیرونی مس در رده غنی‌شدگی خیلی شدید، آنتیموان، روی و سرب در رده غنی‌شدگی شدید، مولیبدن و نیکل در رده غنی‌شدگی متوسط، آرسنیک، کادمیم، کروم، منگنز، کبالت، وانادیم، آهن در رده غنی‌شدگی کم و آلومینیم به‌جز در ایستگاه D_2 (مدرسه اندرزگو منطقه ۱۳) در سایر ایستگاه‌ها در رده بدون غنی‌شدگی قرار دارند. عنصر سرب در ۸۱ درصد ایستگاه‌ها (۲۲ ایستگاه) در رده غنی‌شدگی شدید، در ۱۴ درصد ایستگاه‌ها (D_2-مدرسه اندرزگو-منطقه ۱۳، D_9 مدرسه علویه- منطقه ۱۳، D_{12} و D_{13} مدرسه مهر مریم-منطقه ۱۲) در رده غنی-شدگی خیلی شدید و ایستگاه D_1 مدرسه اندرزگو در منطقه ۱۳ در رده غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید قرار دارد.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

عنصر آنتیموان در بیش از ۵۵ درصد ایستگاه‌ها در رده غنی‌شدگی خیلی شدید و در ۱۱ درصد ایستگاه‌ها (D_1 مدرسه اندرزگو، D_5 مدرسه پروین اعتصامی، D_9 مدرسه علویه) که تمامی آن‌ها در منطقه ۱۳ واقع شده‌اند در رده غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید قرار دارند. عنصر مس در بیش از ۳۷ درصد ایستگاه‌ها در رده غنی‌شدگی خیلی شدید و در ۱۸درصد ایستگاه‌ها (D_1، D_2 مدرسه اندرزگو) در رده غنی‌شدگی خیلی شدید و ایستگاه D_{12} (مدرسه مهر مریم در منطقه ۱۲) در رده غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید قرار دارد. بنابراین می‌توان گفت که غبار داخل مدارس آلودگی بیشتری از فضای بیرونی دارد. همچنین بر اساس شدت آلودگی، مناطق سه‌گانه موردمطالعه را می‌توان به صورت منطقه ۱۳ > منطقه ۱۲ > منطقه ۱۸ در نظر گرفت.

ضریب آلودگی عناصر در غبار داخلی و بیرونی مدارس شهر تهران در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. روند کاهشی تغییرات میانگین ضریب آلودگی در غبار داخلی و بیرونی مشابه یکدیگر است تنها تفاوت آن‌ها این است که در غبار بیرونی سطح آلودگی مس و روی از آنتیموان بیشتر است. با توجه به مقادیر ضریب آلودگی، عناصر مس، روی، آنتیموان و سرب آلودگی بسیار بالا، مولیبدن، نیکل، آرسنیک، کروم، کادمیم، منگنز، کبالت و وانادیم آلودگی متوسط، آهن و آلومینیم آلودگی کم در نمونه‌های غبار داخلی و بیرونی مدارس نشان می‌دهند.

نتایج ارزیابی خطر با توجه به غلظت میانگین عناصر محاسبه و در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که در معرض قرارگیری ذرات غبار برای تمام عناصر از راه بلع در کودکان خطر بیشتری ایجاد می‌کند و به دنبال آن به ترتیب تماس پوستی و استنشاق قرار گرفته‌اند. در این ارتباط ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2010) در شمال شرق چین با بررسی عناصر موجود در غبار و در معرض قرارگیری کودکان از راه بلع، نتایج مشابهی بدست آوردند. آرسنیک، مس، نیکل، سرب و روی ترتیب مشابهی از خارج قسمت خطر (HQ) را در کودکان و بزرگسالان نشان دادند در حالی که این شاخص برای کروم و منگنز ناشی از تماس پوستی در بزرگسالان بیش از کودکان است. مسیر استنشاق برای قرار گرفتن در معرض کروم و منگنز در بزرگسالان از اهمیت ناچیزی برخوردار است و سطح گسترده پوست بزرگسالان در مقایسه با اطفال خطر بیشتری برای آنان در پی دارد. همچنین شاخص خطر (HI) در تمام عناصر برای کودکان بیشتر از بزرگسالان است.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

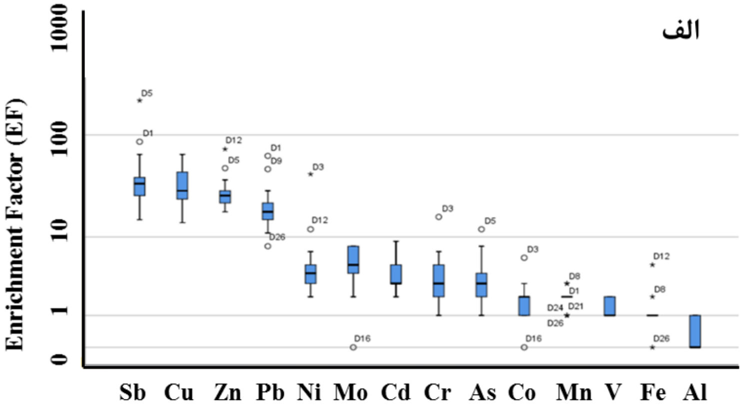
جدول ۲- خلاصه آماری غلظت عناصر در نمونه‌های غبار مدارس تهران (mg/kg)

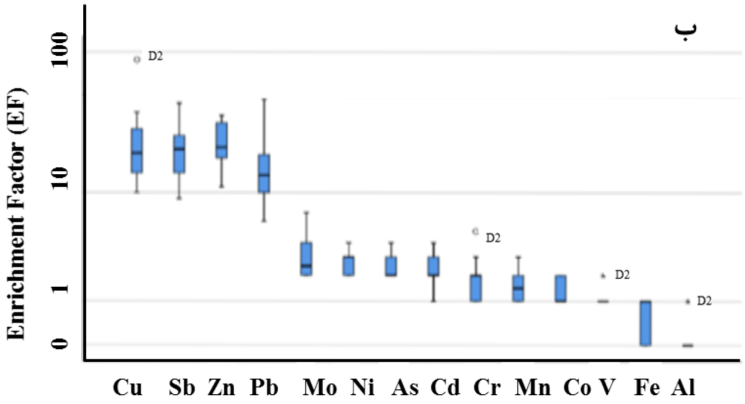
Table 2. Descriptive statistics of elements’ concentration in dust samples of Tehran schools (mg/kg)

Element	Al (%)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (%)	Mn (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Sb (mg/kg)	V (mg/kg)	Zn (mg/kg)
غبار داخلی														
Mean	۳/۱۷	۸/۸	۰/۹۵	۹/۳۵	۹۹/۸۲	۲۱۶/۱۸	۲/۴۹	۴۴۹/۶۵	۴/۶۱	۵۱/۳۵	۲۲۹/۴۱	۸/۵۴	۴۸/۱۸	۸۶۱/۹۴
Std.deviation	۱/۰۸	۳/۵۷	۰/۲۳	۲/۸۲	۵۷/۱۹	۷۲/۸۶	۰/۹۸	۱۲۴/۴۱	۲/۰۹	۴۶/۷۷	۶۹/۵۳	۴/۳۹	۱۳/۵۹	۳۳۰/۳۶
Min	۱/۶۳	۲/۱	۰/۵	۴/۶	۳۹	۱۳۱	۱/۲۴	۲۴۵	۲/۳	۲۵	۹۹	۳/۸	۲۸	۳۶۲
Max	۵/۰۱	۱۵/۸	۱/۶	۱۳/۷	۲۳۵	۴۴۳	۵/۴۸	۶۵۲	۹/۹	۲۲۸	۳۸۲	۲۳/۲	۶۹	۱۳۳۲
CV	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۳	۰/۵۷	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۴۵	۰/۹۱	۰/۳	۰/۵۱	۰/۴۲	۰/۳۸
غبار بیرونی														
Mean	۴/۴۲	۹/۳۹	۰/۹۱	۱۱/۰۴	۸۸/۴	۲۳۲/۲	۲/۷۸	۶۰۸/۳	۴/۶۴	۴۴/۴	۳۱۰/۷	۷/۱۸	۶۴/۳	۱۰۳۵/۲
Std.deviation	۰/۵۳	۱/۸۴	۰/۱۶	۱/۶	۳۱/۴۴	۱۰۲/۵	۰/۱۹	۶۵۴۵۹	۲/۰۶	۹/۸۱	۲۰۲/۹۱	۲/۸۹	۷/۲۲	۲۵۷/۶۳
Min	۳/۴۵	۶/۵	۰/۷	۷/۸	۵۱	۹۹	۲/۴۸	۴۹۸	۲/۸	۳۰	۱۳۶	۳/۴	۵۲	۶۷۴
Max	۵/۲۹	۱۱/۴	۱/۳	۱۳/۴	۱۶۵	۴۸۲	۳	۷۰۱	۸/۶	۶۸	۸۱۶	۱۳/۷	۷۵	۱۴۴۳
CV	۰/۱۲	۰/۲	۰/۱۸	۰/۳	۰/۱۴	۰/۴۴	۱/۱۵	۰/۱۱	۰/۴۴	۰/۲۲	۰/۶۵	۰/۴	۰/۱۱	۰/۲۴
World-Soil average [a]	۷/۱	۴/۷	۰/۵	۸/۲۵	۵۴	۱۴	۳/۵	۴۳۷	۱/۸	۲۰/۵	۲۵	۰/۵	۶۰	۶۴

[a] Kabat-Pendias and Mukherjee (2007)

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

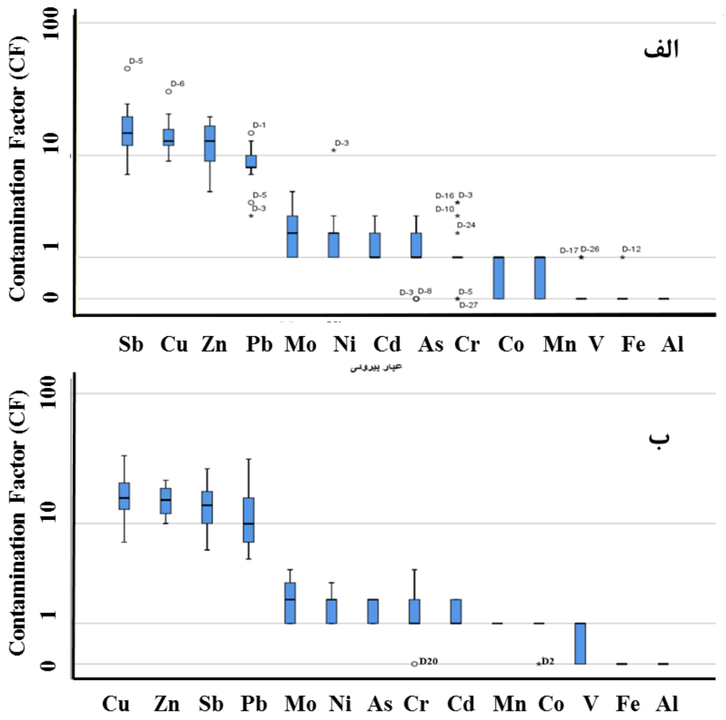




شکل ۲-نمودار جعبه‌ای ضریب غنی شدگی عناصر در نمونه‌های غبار الف) داخلی و ب) بیرونی مدارس

Fig 2. Box plot of elements' enrichment factor in a) indoor and b) outdoor dust samples

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]



شکل ۳-نمودار جعبه‌ای فاکتور آلودگی عناصر در نمونه‌های غبار الف) داخلی و ب) بیرونی مدارس

Fig 3. Box plot of elements’ contamination factor in a) indoor and b) outdoor dust samples

شاخص خطر محاسبه‌شده مربوط به کودکان برای تمام عناصر به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

غبار داخلی

Cr>Pb>As>Mn>Zn>Ni>Cd>Co>Cu

غبار بیرونی

Pb>Cr>As>Mn>Cu>Zn>Ni>Cd>Co

لازم به ذکر است که در غبار بیرونی شاخص خطر برای عناصر سرب و کروم در کودکان بیش از یک است و سلامتی کودکان را تهدید می‌کند. شاخص خطر HI محاسبه‌شده برای بزرگسالان روند کاهشی زیر را نشان می‌دهد:

غبار داخلی

Cr>Pb>As>Mn>Cu>Cd>Ni>Zn>Co

غبار بیرونی

Zn>Pb>Cr>As>Mn>Cu>Ni>Cd>Co

با این وجود شاخص خطر در بزرگسالان کمتر از یک است.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

جدول ۳- خارج قسمت خطر (HQ) و شاخص خطر (HI)در کودکان

Table 3. Hazard Quotient (HQ) and Hazard Index (HI) in children

	As	Co	Cr	Cu	Cd	Pb	Mn	Ni	Zn
غبار داخلی									
HQ_{ing}	$۳/۷۵ \times ۱۰^{-۱}$	$۵/۹۸ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۵۵ \times ۱۰^{-۲}$	$۴/۲۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۰۸ \times ۱۰^{-۳}$	$۸/۳۸ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۲۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۳/۲۸ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۶۷ \times ۱۰^{-۲}$
HQ_{inh}	$۱/۷۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۹/۸۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۶۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۲۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۵/۷۶ \times ۱۰^{-۷}$	$۳/۹۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۸۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۴۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۷۲ \times ۱۰^{-۶}$
HQ_{dermal}	$۸/۳۷ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۰۹ \times ۱۰^{-۵}$	$۹/۰۶ \times ۱۰^{-۱}$	$۶/۴۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۴۳ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۵۶ \times ۱۰^{-۲}$	$۸/۷۴ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۰۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۱۴ \times ۱۰^{-۴}$
HI	$۳/۸۳ \times ۱۰^{-۱}$	$۶/۹۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۹/۵۱ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۷/۵۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۸/۵۳ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۵۲ \times ۱۰^{-۱}$	$۳/۳۱ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۷۲ \times ۱۰^{-۲}$
غبار بیرونی									
HQ_{ing}	$۳/۹۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۷/۰۲ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۳۸ \times ۱۰^{-۱}$	$۷/۷۵ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۲۰ \times ۱۰^{-۲}$	۱/۱۶	$۱/۵۶ \times ۱۰^{-۱}$	$۲/۸۶ \times ۱۰^{-۲}$	$۴/۳۹ \times ۱۰^{-۲}$
HQ_{inh}	$۱/۸۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۱۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۱۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۳/۲۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۵/۶۵ \times ۱۰^{-۷}$	$۴/۰۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۵۰ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۳۰ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۰۶ \times ۱۰^{-۶}$
HQ_{dermal}	$۸/۰۷ \times ۱۰^{-۲}$	$۲/۴۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۶/۱۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۷/۲۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۳۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۱۸ \times ۱۰^{-۲}$	$۲/۵۰ \times ۱۰^{-۲}$	$۲/۹۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۱۴ \times ۱۰^{-۴}$
HI	$۴/۷۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۸/۲۰ \times ۱۰^{-۳}$	۱/۰۵	$۷/۸۲ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۵۳ \times ۱۰^{-۲}$	۱/۲۶	$۲/۰۲ \times ۱۰^{-۱}$	$۲/۸۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۴/۴۵ \times ۱۰^{-۲}$

جدول ۴- خارج قسمت خطر (HQ) و شاخص خطر (HI)در بزرگسالان

Table 4. Hazard Quotient (HQ) and Hazard Index (HI) in adults

	As	Co	Cr	Cu	Cd	Pb	Mn	Ni	Zn
غبار داخلی									
HQ_{ing}	$۴/۰۲ \times ۱۰^{-۲}$	$۶/۵۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۵۵ \times ۱۰^{-۲}$	$۷/۴۰ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۳۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۸/۹۷ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۳۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۵۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۱۱ \times ۱۰^{-۴}$
HQ_{inh}	$۲/۲۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۶۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۱۳ \times ۱۰^{-۷}$	$۷/۳۷ \times ۱۰^{-۸}$	$۵/۰۰ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۴۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۹۱ \times ۱۰^{-۷}$	$۲/۲۰ \times ۱۰^{-۷}$
HQ_{dermal}	$۱/۱۷ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۱۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۹/۰۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۹/۸۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۵/۲۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۳۸ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۵۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۱۹ \times ۱۰^{-۵}$	$۷/۸۵ \times ۱۰^{-۵}$
HI	$۵/۱۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۹۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۳۶ \times ۱۰^{-۱}$	$۷/۵۰ \times ۱۰^{-۳}$	$۶/۵۵ \times ۱۰^{-۳}$	$۹/۲۱ \times ۱۰^{-۲}$	$۱/۵۰ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۵۷ \times ۱۰^{-۳}$	$۲/۹۹ \times ۱۰^{-۴}$
غبار بیرونی									
HQ_{ing}	$۴/۲۲ \times ۱۰^{-۲}$	$۷/۵۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۷۰ \times ۱۰^{-۲}$	$۸/۳۰ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۲۸ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۷۷ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۰۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۷۰ \times ۱۰^{-۱}$
HQ_{inh}	$۲/۳۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۴۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۷۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۶۳ \times ۱۰^{-۷}$	$۷/۲۲ \times ۱۰^{-۸}$	$۶/۹۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۳/۱۹ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۶۷ \times ۱۰^{-۷}$	$۲/۶۶ \times ۱۰^{-۷}$
HQ_{dermal}	$۱/۲۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۷۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۹/۳۸ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۱۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۱۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۳۳ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۷۶ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۵۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۹/۳۸ \times ۱۰^{-۵}$
HI	$۵/۱۹ \times ۱۰^{-۲}$	$۹/۰۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۶۶ \times ۱۰^{-۲}$	$۸/۴۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۸۰ \times ۱۰^{-۳}$	$۱/۲۸ \times ۱۰^{-۱}$	$۲/۲۶ \times ۱۰^{-۲}$	$۳/۱۱ \times ۱۰^{-۳}$	$۴/۷۰ \times ۱۰^{-۱}$

تعیین منشأ عناصر

در این مطالعه از روش آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی به عنوان روش استخراج و از varimax rotation برای نمایش بهتر داده‌ها استفاده شد. برای تعیین تعداد مؤلفه‌ها از ویژه مقدار (eigenvalue) بالاتر از ۱ استفاده شد. بارهای عاملی و اشتراک‌های مؤلفه‌ها برای عناصر موردمطالعه در نمونه‌های غبار در جدول ۵ آورده شده است. نتایج نشان داد که بیش از ۷۹ درصد از واریانس کل توسط ۴ مؤلفه اصلی توضیح داده می‌شود. مؤلفه اول ۳۸/۶۵ درصد از کل واریانس را در بر می‌گیرد و شامل وانادیم، منگنز، آلومینیم، کبالت و آهن است که بار شدیدی در این مؤلفه نشان می‌دهند. همچنین نیکل، کروم، آرسنیک و مولیبدن نیز بار متوسطی را در این مؤلفه نشان می‌دهند. با توجه به نتایج ضرایب زمین‌شیمیایی و

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

استخراج ترتیبی عناصر می‌توان این مؤلفه را منشأ زمین-زاد در نظر گرفت. این امر به ویژه برای وانادیم، منگنز، آلومینیم، کبالت و آهن با بالاترین درصد در فاز بازماندی استخراج ترتیبی (هاشم‌آبادی، ۱۳۹۹) صادق است. مؤلفه دوم ۲۰/۶ درصد از کل واریانس را توضیح می‌دهد و شامل نیکل و کروم است. به نظر می‌رسد این دو عنصر که بار متوسطی نیز در مؤلفه اول داشتند، در برخی ایستگاه‌ها تحت تأثیر منابع انسان‌زاد شهری قرار گرفته‌اند. نیکل وکروم علاوه بر استفاده در قطعات خودرو در پوشش آسفالت نیز غلظت نسبتاً بالایی دارند. کادمیم، سرب، روی، مس و آنتیموان در مؤلفه سوم با توضیح ۱۱/۹۴ درصد از واریانس کل قرار گرفته‌اند. با توجه به آلودگی شدید ذرات غبار به این عناصر و تحرک‌پذیری بالای آن‌ها در منطقه بر اساس نتایج استخراج ترتیبی (هاشم‌آبادی، ۱۳۹۹)، مؤلفه سوم را می‌توان منشأ ترافیکی و کاملاً انسان‌زاد در نظر گرفت. همچنین وجود تعمیرگاه‌های خودرو در مناطق با غلظت بالای برخی از عناصر این مؤلفه (روی و کادمیم) منشأ انسان‌زاد عناصر این مؤلفه را بیش از پیش تأیید می‌کند. مؤلفه چهارم تنها ۸/۳ درصد از واریانس کل را توضیح می‌دهد و با توجه به بار عاملی پایین این مؤلفه، قابل توضیح نیست.

جدول ۵- مولفه‌های محاسبه شده برای عناصر بعد از چرخش واریمکس

Table 5. Calculated components for elements after Varimax rotation

عناصر	مؤلفه			
	۱	۲	۳	۴
V	۰/۹۶۱	-۰/۰۹۸	۰/۱۲۹	۰/۲۱۴
Mn	۰/۹۳۷	-۰/۰۲۲	۰/۱۰۱	-۰/۱۵۷
Al	۰/۹۲۹	-۰/۱۲۵	۰/۱۳۶	-۰/۰۵۴
Co	۰/۷۳۵	۰/۳۵۳	۰/۰۹۰	۰/۰۶۹
Fe	۰/۴۷۱	-۰/۰۰۸	۰/۲۱۸	۰/۱۰۴
Ni	۰/۳۲۴	۰/۸۸۶	-۰/۱۸۴	۰/۱۴۷
Cr	۰/۴۷۲	۰/۸۶۳	۰/۱۰۲	۰/۰۹۶
Cd	-۰/۰۸۵	-۰/۲۰۸	۰/۸۵۲	۰/۲۶۵
Pb	۰/۲۳۱	۰/۱۷۴	۰/۷۶۴	۰/۱۷۴
Zn	۰/۴۷۷	-۰/۰۰۷	۰/۷۶۱	۰/۲۳۳
Cu	-۰/۱۴۹	-۰/۱۳۴	۰/۷۳۵	۰/۲۱۵
Sb	۰/۲۱۵	-۰/۳۷۸	۰/۷۱۵	۰/۱۸۵
Mo	۰/۴۱۵	-۰/۱۹۲	۰/۰۵۴	۰/۶۴۲
As	۰/۴۷۱	۰/۲۹۵	-۰/۲۷۴	۰/۵۱۸

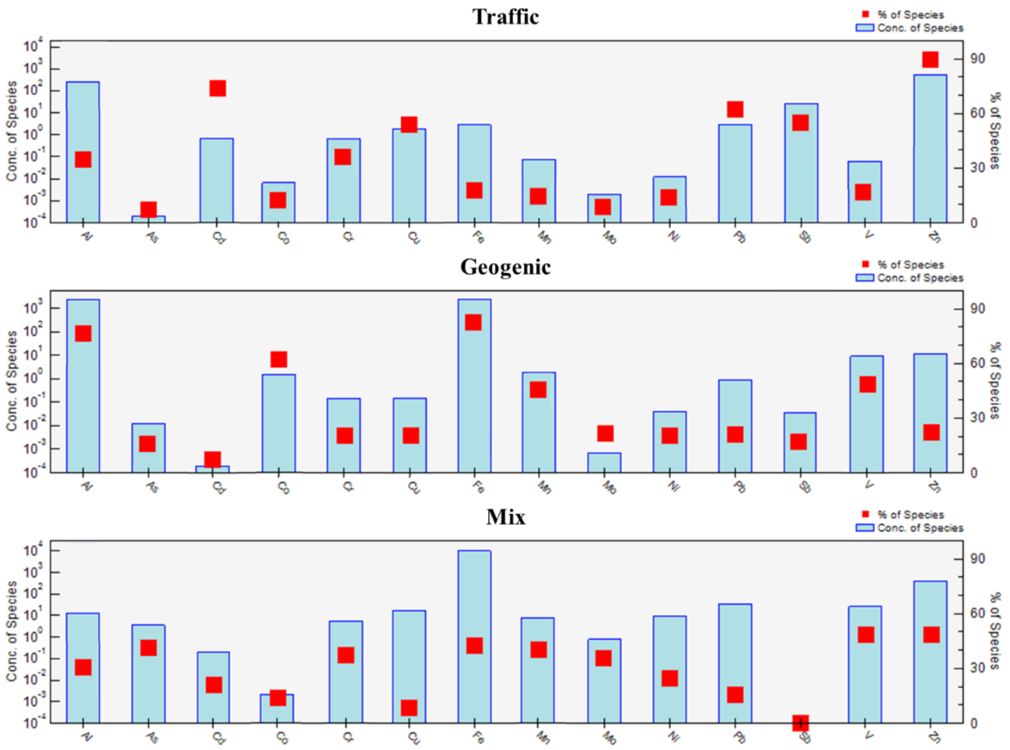
به منظور بررسی کمی منشأ عناصر در ذرات غبار، مدل PMF در این مطالعه اجرا شد. اختلاف مقادیر Q کمتر از ۵۴ درصد بود که بیانگر اثر بسیار ضعیف داده‌های دورافتاده بر مقدار Q است. بر اساس نمودار پراکندگی مشاهده به پیش‌بینی (Obs/Pred) و نسبت سیگنال (S) به نویز (N) آنتیموان و

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

مولیبدن به عنوان گونه ضعیف و سایر عناصر موردمطالعه به عنوان گونه قوی در اجرای مدل رده‌بندی شدند. مدل PMF در این مطالعه ۲۰ مرتبه اجرا شد و ماتریس‌های بازمانده، نمودارهای G و تناسب مقادیر Q برای تعیین تعداد بهینه فاکتورها بررسی شده و در نهایت سه فاکتور تعیین شد. از میان ۲۰ اجرای مدل، اجرای شماره ۱۲ به عنوان مدل اصلی انتخاب شد و تفسیرها بر اساس آن صورت گرفت.

شکل ۴، پروفیل منشأهای مختلف عناصر را در نمونه‌های غبار نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تحلیل مؤلفه اصلی و بار عاملی بالای عناصر شهری شامل کادمیم، مس، سرب و روی در فاکتور اول، این فاکتور به عنوان منشأ ترافیک در نظر گرفته شد. آنتیموان نیز در این فاکتور بار بالایی داشته و درصد متوسطی از کروم نیز در این فاکتور دیده می‌شود. فاکتور دوم به عنوان منبع زمین‌زاد در نظر گرفته شد، چرا که عناصری مانند آلومینیم، کبالت و آهن که آلودگی و غنی شدگی پایین در غبار منطقه دارند نشانگرهای مناسبی برای منابع زمینی و طبیعی محسوب می‌شوند. وانادیم نیز در این مؤلفه درصد بالایی دارد و به نظر می‌رسد عمدتاً از منابع زمین زاد منشأ گرفته است. فاکتور سوم به دلیلی بار متوسط عناصر فاکتورهای اول و دوم، به عنوان منشأ ترکیبی تعیین شد. لازم به ذکر است منشأ غیر زمین زاد عناصر در این مؤلفه می‌تواند منابعی غیر از ترافیک مانند رنگ، صنایع و تعمیرگاه‌های خودرو موجود در برخی مناطق باشد.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]



شکل ۴-پروفیل منشأهای عناصر موردمطالعه با استفاده از تحلیل مدل PMF
Fig 2. Source profiles of the studied elements from PMF model analysis

نتیجه‌گیری

در این مطالعه آلودگی غبار داخل مدارس ابتدایی در سه منطقه تهران به ۱۴ عنصر منتخب بررسی شد. مقادیر میانگین شاخ ضریب غنی‌شدگی نشان می‌دهند که در غبار داخلی عناصر آنتیموان، مس و روی در رده غنی-شدگی خیلی شدید، سرب در رده غنی‌شدگی شدید، نیکل و مولیبدن در رده غنی‌شدگی متوسط تا شدید، آرسنیک، کادمیم و کروم در رده غنی‌شدگی متوسط، منگنز، کبالت، وانادیم و آهن در رده غنی‌شدگی کم و آلومینیم در رده بدون غنی‌شدگی قرار دارند. در حالی‌که در غبار بیرونی مس در رده غنی‌شدگی خیلی شدید، آنتیموان، روی و سرب در رده غنی‌شدگی شدید، مولیبدن و نیکل در رده غنی‌شدگی متوسط، آرسنیک، کادمیم، کروم، منگنز، کبالت، وانادیم، آهن در رده غنی‌شدگی کم و آلومینیم در رده بدون غنی‌شدگی قرار دارند. روند کاهشی تغییرات میانگین فاکتور آلودگی در غبار داخلی و بیرونی مشابه یکدیگر است، تنها تفاوت آن‌ها این است که در غبار بیرونی سطح آلودگی مس و روی از آنتیموان بیشتر است. به طور کلی مدارس منطقه ۱۳ آلودگی بیشتری را در نمونه‌های غبار نشان دادند. نتایج شاخص ارزیابی خطر سلامت نشان داد که در معرض قرارگیری ذرات غبار برای تمام عناصر از راه بلع در کودکان خطر بیشتری نسبت به دیگر مسیرهای در معرضی ایجاد می-کند و به دنبال آن به ترتیب تماس پوستی و استنشاق قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که در غبار بیرونی شاخص خطر برای عناصر سرب و کروم در کودکان بیش از یک

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

است و سلامتی کودکان را تهدید می‌کند. نتایج تحلیل‌های آماری و مدل PMF بیانگر نقش مهم ترافیک در انتشار سرب، مس، کادمیم، روی و تا حدودی آنتیموان به محیط است. به طور کلی مدارس مناطق ۱۳ (مدرسه شهید اندرزگو، مدرسه پروین اعتصامی و مدرسه مهدیون) و مدرسه مهر مریم (منطقه ۱۲) بیشترین آلودگی را دارند این امر می‌تواند به دلیل تردد زیاد وسایل نقلیه باشد چراکه جزو مناطق پر تردد شهر تهران هستند. با توجه به نتایج به دست آمده، بروز آلودگی شدید برخی عناصر بالقوه سمناک در غبار مدارس، و قرارگیری دانش آموزان در معرض آن‌ها دراز مدت مشکلات بسیار زیادی را به وجود خواهد آورد و نیاز جدی به مدیریت منبع اصلی این آلاینده‌ها شامل بار ترافیکی بالا، استفاده از سوخت غیراستاندارد و خودروهای فرسوده احساس می‌شود. این مطالعه در کنار بررسی تحرک‌پذیری عناصر فلزی می‌تواند مبنایی برای ارزیابی ریسک و برنامه‌ریزی میان مدت و طولانی مدت برای کنترل آلاینده‌ها فراهم آورد.

منابع

ارسلانی، ف.، علیجانی، ب.، اکبری، م.، محمدخان، ش.، "بررسی عناصر سنگین (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb) موجود در غبار ریزشی شهر تهران"، نشریه پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۴۴ (۱۳۹۹) صفحات ۱۵ تا ۳۶.

زراسوندی، ع.، حیدری، م.، لاهیجان زاده، ا.، رضایی، م.، ساعد، م.، فریدونی، ز.، "زمین شیمی و شاخص‌های زمین زیست محیطی فلزات سنگین در گرد و غبار با منشأ داخلی در استان خوزستان"، مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، دوره ۴۱، شماره ۱ (۱۳۹۷) صفحات ۱۰۵ تا ۱۲۵.

سالنامه آماری شهر تهران ۱۳۹۶. سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران.

قنواتی، ن.، "ارزیابی خطر فلزات سنگین بر سلامت انسانی بر گرد و غبار خیابانی شهر آبادان"، مجله سلامت و محیط زیست، دوره ۱۱، شماره ۱ (۱۳۹۷) صفحات ۶۳ تا ۷۴.

محمودیان، ع. ا.، قاسمی، ه.، هوشمند طینی، غ.، آریتدار، ر.، "نگاهی به تهران از آغاز تاکنون"، مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی، گیتاشناسی تهران-ایران (۱۳۸۴).

هاشم‌آبادی، ف.، "آلودگی، منشأیابی و ارزیابی ریسک سلامت عناصر بالقوه سمناک در غبارهای برخی مدارس کلان شهر تهران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، (۱۳۹۹) دانشگاه خوارزمی.

Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B. and Beverley, A.H., "Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran", Ecotoxicology and Environmental Safety, 136 (2017) 92-103.

Dehghani, S., Moore, F., Vasiluk, L. and Hale, B.A., "The geochemical fingerprinting of geogenic particles in road deposited dust from Tehran metropolis, Iran: Implications for provenance tracking", Journal of Geochemical Exploration, 190 (2018) 411-423.

Eby, G.N., "Principles of Environmental Geochemistry", (2016) Waveland Press.

Hakanson, L., "An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach", Water Research, 14(8) (1980) 975-1001.

Han, Y.J., Kim, H.W., Cho, S.H., Kim, P.R. and Kim, W.J., "Metallic elements in PM2. 5 in different functional areas of Korea: Concentrations and source identification", Atmospheric Research, 153 (2015) 416-428.

Ho, H. H., Swennen, R., Van Damme A., "Distribution and contamination status of heavy metals in estuarine sediments near Cua Ong Harbor, Ha Long Bay, Vietnam", Geologica Belgica, 13 (1-2) (2010) 37–47.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

Hopke, P. K., Ito, K., Mar, T., Christensen, W. F., Eatough, D. J., Henry, R. C., & Liu, H., "PM source apportionment and health effects: 1. Intercomparison of source apportionment results", Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 16(3) (2006) 275.

Hsu, C.Y., Chiang, H.C., Lin, S.L., Chen, M.J., Lin, T.Y. and Chen, Y.C., "Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2. 5 in the western coastal area of central Taiwan", Science of the Total Environment, 541 (2016) 1139-1150.

Joint, W.H.O. and World Health Organization, "Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution", (2006) (No. EUR/05/5046028). Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y.M., Huang, Y.Z. and Zhu, Y.G., "Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China", Environmental Pollution, 152(3) (2008) 686-692.

Long, Y., Dai, T. and Wu, Q., "Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from the Chang-Zhu-Tan Region, Hunan, China", Environmental Monitoring and Assessment, 185(2) (2013) 1377-1390.

Maricq, M.M., "Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review", Journal of Aerosol Science, 38(11), (2007) 1079-1118.

Naimi S., Ayoubi S., "Vertical and horizontal distribution of magnetic susceptibility and metal contents in an industrial district of central Iran", Journal of Applied Geophysics, 96 (2013) 55-66.

Perrino, C., Canepari, S., Cardarelli, E., Catrambone, M. and Sargolini, T., "Inorganic constituents of urban air pollution in the Lazio region (Central Italy)", Environmental Monitoring and Assessment, 136(1) (2008) 69-86.

Pope III, C.A. and Dockery, D.W., "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect", Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6) (2006) 709-742.

Rastegari Mehr, M., Keshavarzi, B., Moore, F., Sacchi, E., Lahijanzadeh, A.R., Eydivand, S., Jaafarzadeh, N., Naserian, S., Setti, M. and Rostami, S., "Contamination level and human health hazard assessment of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust deposited in Mahshahr, southwest of Iran", Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 22(8) (2016) 1726-1748.

Sun, X., Wang, Y., Li, H., Yang, X., Sun, L., Wang, X., & Wang, W, "Organic acids in cloud water and rainwater at a mountain site in acid rain areas of South China", Environmental Science and Pollution Research, 23(10) (2016) 9529-9539.

Tashakor, M. and Modabberi, S., "Human Health Risks Associated with Potentially Harmful Elements from Urban Soils of Hamedan City, Iran", Pollution, 7(3) (2021) 709-722.

Tashakor, M., Modabberi, S. and Argyraki, A., "Assessing the contamination level, sources and risk of potentially toxic elements in urban soil and dust of Iranian cities using secondary data of published literature", Environmental Geochemistry and Health, (2021) 1-31.

US EPA (US Environmental Protection Agency), "Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites", OSWER, (2001) 9355.4-24.

Zhao, P., Feng, Y., Zhu, T. and Wu, J., "Characterizations of resuspended dust in six cities of North China", Atmospheric Environment, 40(30) (2006) 5807-5814.

Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., Liang, Z., "Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China", Science of the Total Environment, 408 (2010) 726–733.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]