Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 2, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.2.72341

Identification of Sources and Origin of Heavy Metal Emissions in Surface Soils Around Khuzestan Steel Company in Ahvaz City

Fatemeh Jafarian[1], Khoshnaz Payandeh[2*], Ahad Nazarpour[3], Ali Gholami[4] and Kamran Mohsenifar[1]

(Received: October 5-2025; Revised: February 25-2026; Accepted: May 3-2026)

1- Department of Soil Sciences, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
2- Research Group of Artificial Intelligence Application Development in Agriculture, Environment and Medicine, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
3- Department of Geology, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
4- Water Studies Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
*Corresponding Author, Email: Khpayandeh@iau.ac.ir

Abstract
The steel industry plays an important role in the release of toxic pollutants, including heavy metals, into the environment. The present descriptive-applied study was conducted in 2022 to identify the sources of heavy metal emissions in surface soils in the vicinity of a steel industry using positive matrix factor and chemical mass balance models. Soil samples (50 samples) were systematically collected from four areas within the steel plant, and a control area of 15 km was established. Five main sources, including the earth's crust (factor 1), vehicles (factor 2), steel industry (factor 3), biomass (factor 4), and other sources (factor 5), were identified as the main factors of heavy metals in the positive matrix factor model. Cobalt, nickel, and zinc had the highest mean concentrations with values of 14.5, 1.21, and 0.92mg kg-1, respectively. Cadmium and Lead showed the lowest concentrations with values of 0.02 and 0.10 mg kg-1 in samples inside and outside the Khuzestan Steel Company area, respectively. Comparing the contribution of different sources in the release of heavy metals in the identified factors showed that the steel industry, other sources, earth's crust, vehicles, and biomass accounted for 24, 23, 19, 18, and 16 percent in the positive matrix factor model and 23, 22, 20, 18, and 17 percent in the chemical mass balance model, respectively. The positive matrix factor and chemical mass balance models showed that there was a high level of soil contamination with heavy metals in the vicinity of the Khuzestan Steel Company in Ahvaz city.

Keywords: Soil contamination, heavy metals, chemical mass balance model, positive matrix factor model, steel industry

How to cite this article: Jafarian, F., Payandeh, K., Nazarpour, A., Gholami, A. and Mohsenifar, K. 2026. Identification of Sources and Origin of Heavy Metal Emissions in Surface Soils Around Khuzestan Steel Company in Ahvaz City. *J. Water and Soil Sci.* 30(2): 125-141. DOI: 10.47176/jwss.30.2.72341

Copyright © 2026 Jafarian et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۲۵ تا ۱۴۱ 10.47176/jwss.30.2.72341

شناسایی منابع و منشأ انتشار فلزات سنگین در خاک‌های سطحی اطراف شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز

فاطمه جعفریان[۱]، خوشناز پاینده[۲*]، احد نظرپور[۳]، علی غلامی[۴] و کامران محسنی‌فر[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۳ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۳)

۱. گروه خاک‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲. گروه پژوهشی توسعه کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی، محیط زیست و پزشکی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۳. گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۴. مرکز تحقیقات مطالعات آب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Khpayandeh@iau.ac.ir

چکیده

صنعت فولاد نقش مهمی در انتشار آلاینده‌های سمی، از جمله فلزات سنگین به محیط‌زیست دارد. مطالعه توصیفی ـ کاربردی حاضر در سال ۱۴۰۱ برای شناسایی منابع انتشار فلزات سنگین در خاک‌های سطحی در مجاورت یک صنعت فولاد با استفاده از مدل‌های فاکتور ماتریس مثبت و موازنه جرم شیمیایی انجام شد. نمونه‌های خاک (۵۰ نمونه) به طور سیستماتیک از چهار منطقه در محدوده کارخانه فولاد جمع‌آوری شدند و یک منطقه شاهد به مساحت ۱۵ کیلومتر ایجاد شد. پنج منبع اصلی، شامل پوسته زمین (فاکتور ۱)، وسایل نقلیه (فاکتور ۲)، صنعت فولاد (فاکتور ۳)، زیست‌توده (فاکتور ۴) و سایر منابع (فاکتور ۵)، به عنوان عوامل اصلی فلزات سنگین در مدل فاکتور ماتریس مثبت شناسایی شدند. کبالت، نیکل و روی بیشترین میانگین غلظت به ترتیب با مقادیر ۱۴/۵، ۱/۲۱ و ۰/۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم را داشتند. کادمیوم و سرب کمترین غلظت را با مقادیر ۰/۰۲ و ۰/۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب در نمونه‌های محدوده از منطقه شرکت فولاد خوزستان نشان داد. مقایسه سهم منابع مختلف در انتشار فلزات سنگین در عوامل شناسایی‌شده نشان داد که صنعت فولاد، سایر منابع، پوسته زمین، وسایل نقلیه و زیست‌توده به ترتیب ۲۴، ۲۳، ۱۹، ۱۸ و ۱۶ درصد در مدل فاکتور ماتریس مثبت و ۲۳، ۲۲، ۲۰، ۱۸ و ۱۷ درصد در مدل موازنه جرم شیمیایی را تشکیل می‌دهند. مدل‌های فاکتور ماتریس مثبت و موازنه جرم شیمیایی نشان دادند که سطح زیاد آلودگی خاک با فلزات سنگین در مجاورت شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز داشت.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، فلزات سنگین، مدل موازنه جرم شیمیایی، مدل فاکتور ماتریس مثبت، صنعت فولاد

متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

حضور گسترده فلزات سنگین در محیط‌زیست، یک تهدید جهانی بزرگ است که بر سلامت انسان و سیستم‌های اکولوژیکی تأثیر منفی می‌گذارد (۴۸ و ۵۰)؛ درحالی‌که برخی از فلزات سنگین مانند آهن، کبالت، مس و روی که در مقادیر کم برای انسان حیاتی هستند، در غلظت‌های بیشتر می‌توانند سمی باشند (۳۸). از سوی دیگر، فلزاتی مانند سرب، کادمیوم و جیوه حتی در غلظت‌های کم نیز سمی هستند (۱۷). قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین در انسان می‌تواند از طریق استنشاق از جو، بلع از طریق آب آشامیدنی و تماس پوستی از طریق تماس پوستی رخ دهد. مطالعات مختلف روند افزایشی غلظت فلزات سنگین را در اکوسیستم‌های آبی، منابع خاک و جو در سال‌های اخیر نشان داده‌اند (۲۰، ۳۳ و ۴۱). فلزات سنگین در حالت طبیعی خود، به خودی خود تجزیه نمی‌شوند؛ در عوض، آنها به تدریج با گذشت زمان به ترکیبات خطرناک‌تری تبدیل می‌شوند (۱۹). خاک، متشکل از ذرات معدنی و آلی، به دلیل قرار گرفتن مداوم در معرض آلاینده‌ها و ظرفیت نگهداری زیاد، به عنوان منبع و مخزن مهمی از آلاینده‌ها عمل می‌کند و آن را به شاخص مناسبی برای آلودگی و خطرات زیست‌محیطی در یک منطقه تبدیل می‌کند (۴). آمار دقیقی در مورد آلودگی منابع خاک با فلزات سنگین مختلف در سراسر جهان در دسترس نیست؛ اما یک مطالعه جامع انجام‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی نشان داد که آلودگی خاک با فلزات سنگین در بیش از ۱۰۰ کشور در سطوح بسیار زیادی قرار دارد و بیش از یک میلیارد نفر در سراسر جهان را در معرض خطر جدی قرار می‌دهد (۱۱). مطالعات مختلف نشان داده است که ساکنان مناطق شهری، صنعتی و خدماتی بیشتر در معرض خطرات مرتبط با این نوع آلودگی هستند (۲۹). اگرچه فلزات سنگین به طور طبیعی در پوسته زمین وجود دارد، اما منشأ آنها و ماهیت پیوندشان با سایر ترکیبات خاک، خطرات سلامتی و زیست‌محیطی آنها را تعیین می‌کند (۳۳)؛ بنابراین، درک منابع انتشار فلزات سنگین نقش مهمی در تعیین سطح خطر و مدیریت اثرهای زیست‌محیطی این آلاینده‌ها دارد. لئو و همکاران (۲۰۱۵) از مدل‌های تجزیه‌وتحلیل مؤلفه اصلی و ترکیب ایزوتوپ برای تعیین سهم منابع مختلف انتشار فلزات سنگین در خاک‌های شهری استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که وسایل نقلیه منبع اصلی انتشار فلزات سنگین در شیامن، چین هستند (۲۵). وانگ و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود علاوه بر تجزیه‌وتحلیل مؤلفه اصلی از تحلیل خوشه‌ای نیز برای شناسایی منابع فلزات سنگین استفاده کردند (۴۴). جیانگ و همکاران (۲۰۲۰) از مدل فاکتور ماتریس مثبت برای تعیین منابع فلزات سنگین در خاک استفاده کردند (۱۶). بسیاری از پژوهشگران از روش‌های شیمیایی برای تعیین منشأ فلزات سنگین استفاده کردند تا منبع آلودگی (طبیعی و انسانی) را شناسایی کرده و خطر فلزات سنگین را ارزیابی کنند (۱، ۱۸ و ۲۷).

مدل‌های مبتنی بر مشاهده و اندازه‌گیری هستند که برای شناسایی و تعیین کمیت منابع آلاینده در محیط (آب، خاک یا هوا) استفاده می‌شوند. این مدل‌ها برای شناسایی و تعیین کمیت منابع آلاینده‌ها بر اساس تغییرات در سایر خواص فیزیکی و شیمیایی محیط، به معادلات ریاضی و آماری متکی هستند (۲۷). آنها از انواع مختلف توابع خطی، غیرخطی و هوش مصنوعی برای تخمین منابع آلودگی استفاده می‌کنند (۵۱). یکی از این روش‌ها که مورد توجه قرار گرفته است، مدل فاکتور ماتریس مثبت (Positive Matrix Factorization) است. فاکتور ماتریس مثبت یک تکنیک مدل‌سازی پیچیده است که در دهه ۱۹۹۰ توسط پاترو و تاپر (۱۹۹۰) توسعه داده شد، با هدف ارائه تفسیرهای دقیق‌تر و محدودتر از نظر فیزیکی از داده‌ها طراحی شده است (۳۱). فاکتور ماتریس مثبت یک روش تحلیل عاملی چند متغیره است که برای تحلیل داده‌های پراکنده و شناسایی عوامل اصلی مؤثر در ایجاد یک الگوی خاص در داده‌ها استفاده می‌شود (۳). این روش به عنوان یک روش تحلیل عاملی آماری به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف، از جمله علوم محیطی دارد (۶). یکی دیگر از روش‌های شیمیایی مورد

استفاده برای شناسایی منابع آلاینده در محیط‌های گیرنده، مدل موازنه جرم شیمیایی (Chemical Mass Balance) است. موازنه جرم شیمیایی که در ابتدا برای تعیین منابع آلودگی هوا توسعه داده شد، بیشتر توسعه یافته و در مطالعاتی مانند وانگ و همکاران (۲۰۱۵) برای شناسایی منابع فلزات سنگین در خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۴۳). صنعت فولاد که در دسته صنایع فلزی قرار می‌گیرد، منبع قابل توجهی از آلاینده‌های مختلف زیست‌محیطی است. از استخراج مواد اولیه تا تولید محصول نهایی، صنعت فولاد می‌تواند فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم، کروم و نیکل را وارد محیط‌زیست کند (۳۷). فرایندهای شیمیایی و فیزیکی دخیل در تصفیه مواد اولیه، استفاده از انرژی فسیلی در فرایندهای تولید فولاد در برخی موارد و استفاده از فناوری‌های منسوخ به افزایش انتشار آلاینده‌ها، از جمله فلزات سنگین کمک می‌کنند (۳۰).

به طور کلی با توجه به توسعه بهره‌برداری و گسترش صنایع پایین‌دستی، توسعه شهرنشینی و ایجاد صنایع مختلف، امکان آلودگی خاک زیاد بوده و تعیین نقش عوامل مختلف در انتشار فلزات سنگین برای مدیریت محیط‌زیست بسیار مهم است. در این بین استان خوزستان در جنوب غربی ایران بسیار صنعتی است و صنایع عمده نفت و فولاد را در خود جای داده است که اهمیت زیادی برای بررسی غلظت آلاینده‌های فلزی دارد. در این پژوهش با توجه به این که تاکنون پژوهش جامعی در رابطه با میزان غلظت فلزات سنگین در ناحیه صنعتی فولاد خوزستان صورت نگرفته است، این پژوهش در نظر دارد علاوه بر بررسی وضعیت آلودگی منطقه از فلزات سنگین را در خاک سطحی به منظور کاهش آلودگی منطقه و پیشنهاد راهکارهای مناسب بررسی کند و این پژوهش با هدف شناسایی منابع انتشار فلزات سنگین خاک‌های سطحی اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز به کمک مدل‌های فاکتور ماتریس مثبت و موازنه جرم شیمیایی انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

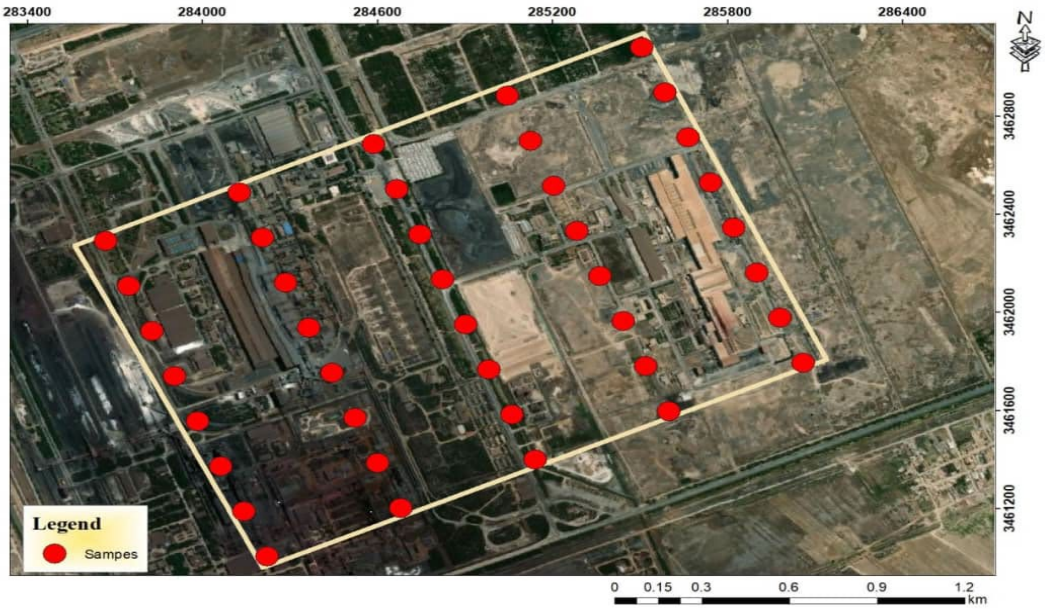
در این پژوهش ۵۰ نمونه خاک در فصل تابستان ۱۴۰۱ بر اساس روش سیستماتیک (شکل ۱) در ۵۰ ایستگاه محدوده کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز و ۳ نمونه خاک از یک منطقه خارج از محدوده به‌عنوان شاهد از عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک‌های سطحی تهیه شد. منطقه شاهد به دلیل وسعت زیاد کارخانه فولاد خوزستان (وسعت حدود ۹ و سه واحد اصلی گندله‌سازی، احیاء مستقیم و بخش فولادسازی) با مساحت ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شد. خصوصیات آب و هوایی، اقلیمی، خاک‌شناسی و زمین‌شناسی محدود شاهد دقیقاً مشابه محل کارخانه فولاد در شهر اهواز است. مختصات مکان‌های مختلف نمونه‌برداری با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی گرفته شد. نمونه‌های خاک در کیسه‌های پلی‌اتیلن زیپ‌لاک تمیز و با برچسب مشخص قرار داده و برای خشک‌کردن، آسیاب و الک و آنالیز به آزمایشگاه منتقل شدند.

روش اندازه‌گیری فلزات

نمونه‌های خاک به روش استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا هضم شیمیایی شدند (۴۲). محلول های استاندارد برای تمام فلزات سنگین مورد مطالعه در سه تا پنج غلظت مختلف برای به‌دست‌آوردن منحنی کالیبراسیون با رقیق‌کردن محلول استاندارد با غلظت mg/L ۱۰۰۰ تهیه شد. فلزات به‌وسیله دستگاه جذب اتمی AA220Z ساخت شرکت واریان کشور استرالیا سنجش شدند. در این دستگاه حد تشخیص (Instrument Detection Limit) فلزات آرسنیک، کادمیوم، سرب، نیکل، کروم، مس، روی و کبالت به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۰۲، ۰/۰۵، ۰/۰۲، ۰/۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. همچنین طول موج (Wave length) فلزات آرسنیک، کادمیوم، سرب، نیکل، کروم، مس، روی و کبالت به‌ترتیب ۱۹۳/۷، ۲۲۸/۸، ۲۸۳/۳، ۲۳۲، ۳۵۷/۹، ۳۲۴/۷، ۲۱۳/۹ و ۲۴۰/۷ نانومتر بود.

مدل فاکتور ماتریس مثبت

در این پژوهش برای تحلیل منشأ فلزات سنگین از مدل فاکتور ماتریس مثبت (PMF) استفاده شد. فاکتور ماتریس مثبت برای



شکل ۱. مدل شبکه سیستماتیک نمونه‌برداری خاک اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز

تعیین منشأ آلاینده‌ها توسط پژوهشگران مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (۳، ۶ و ۳۱). مدل فاکتور ماتریس مثبت یک ابزار مدل‌سازی پیشرفته است که در دهه ۱۹۹۰ میلادی توسط پاترو و تاپر (۱۹۹۴) برای به‌دست‌آوردن تحلیل‌های واقعی‌تر فیزیکی و محدودیت استفاده از نتایج منفی توسعه داده شد. مدل فاکتور ماتریس مثبت در طیف گسترده‌ای از داده‌ها از جمله آلودگی هوا، خاک، رسوبات و همچنین فلزات سنگین ترکیبات آلی فرار مانند PAHs استفاده شده است (۳۱). به منظور منشأیابی فلزات سنگین با استفاده از مدل PMF، یک ماتریس n×m، ماتریس داده x(تمرکز گونه‌های شیمیایی اندازه‌گیری‌شده در مکان‌های پذیرنده) می‌تواند فاکتور درون یک n×p ماتریس G (توزیع منابع) و یک p×m ماتریس F (نمودارهای منابع) با یک ماتریس باقی‌مانده (n×m)E باشد. برای تعیین سهم انتشار، از معادله ۱ استفاده شده است که در آن G ماتریس سهم منبع، F ماتریس مشخصات منبع و p تعداد منابع است (۳۱).

$$X = GF + E \qquad (۱)$$

عناصر G و F به مقادیر غیرمنفی محدود شده‌اند. تابع هدف (Q) با مقدار باقیمانده متناسب است و عدم قطعیت با استفاده از وزن کمینه توسط PMF به کمترین مقدار می‌رسد که به صورت معادله ۲ تعریف می شود که اگر به‌جای n و m تعداد نمونه‌ها و آلاینده ها را به ترتیب قرار دهیم، i و j، مؤلفه‌های m هستند که در آن e_{ij} تفاوت بین مشاهدات و مدل است و σ_{ij} مقادیر عدم قطعیت در گونه jام برای نمونه i می‌باشد.

$$Q(E) = \sum_{i=1}^{n} (e_{ij} / \sigma_{ij})^2 \qquad (۲)$$

عدم قطعیت‌ها برای هر نمونه به وسیله عدم قطعیت اندازه‌گیری‌شده (MU %) و روش حد تشخیص (MDL) محاسبه شده است. اگر غلظت کوچک‌تر از حد تشخیص باشد، u با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌شود و اگر غلظت فلزات سنگین بزرگ‌تر از حد تشخیص باشد، u با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌شود که در آن Error Fraction برابر ۱/۹۶، Concentration غلظت هر یک از فلزات سنگین و MDL حد تشخیص هستند (۳۱):

$$U = \frac{5}{6} \times MDL \qquad (۳)$$

$$u = \sqrt{(\text{Error Fraction} \times \text{Concentration})^2 + (0.5 \times MDL)^2} \qquad (۴)$$

با توجه به ویژگی‌های مهاجرت و تبدیل فلزات سنگین خاک در منطقه مورد مطالعه و بر اساس مطالعات موجود، انتخاب تعداد پنج فاکتور در این مطالعه بر اساس تحلیل شاخص Q، بررسی رفتار باقیمانده‌ها و تفسیرپذیری فیزیکی ـ شیمیایی فاکتورها انجام شد. مدل PMF برای تعداد فاکتورهای بین ۵ تا ۱۲ اجرا شد. نتایج نشان داد که با انتخاب پنج فاکتور، مقدار Q/Qexpected به مقدار قابل‌قبول نزدیک شد و الگوی باقیمانده‌ها فاقد ساختار سیستماتیک بود. افزایش تعداد فاکتورها بیش از پنج تا باعث ایجاد فاکتورهای ناپایدار، تفکیک غیرواقعی فلزات و کاهش قابلیت تفسیر منابع می‌شود. در واقع ۵ فاکتور بهینه هست. تقسیم‌بندی منابع به کمک نرم‌افزار مدل PMF نسخه ۵ سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا به طور گسترده برای محاسبه سهم منابع آلودگی به کار گرفته شد. تعداد عوامل استخراج‌شده بر اساس PMF، تعداد منابع آلودگی و بار عنصر روی هر عامل، میزان سهم منبع آلودگی در آن عنصر بود. فاکتور سایر منابع (فاکتور ۵) به‌عنوان یک فاکتور باقیمانده در نظر گرفته شد که شامل ترکیبی از منابع کم‌سهم، پراکنده و همپوشان هست. مقدار Error Fractionبرابر ۱/۹۶ بر اساس سطح اطمینان ۹۵ درصد و مطابق با توصیه‌های دستورالعمل USEPA PMF 2008 انتخاب شد. با توجه به کالیبراسیون منظم دستگاه جذب اتمی، انجام آنالیزها در تکرارهای متعدد و ماهیت تقریباً همگن ماتریس خاک منطقه، استفاده از این مقدار خطا برای برآورد عدم قطعیت‌ها قابل‌قبول ارزیابی شد. برای مقادیر کمتر از حد تشخیص (MDL)، مقدار عدم قطعیت بر اساس معادله ۳ و ۴ محاسبه شد و مقادیر غلظت به‌صورت MDL/2 در ماتریس ورودیPMF جایگزین شد (۳ و ۶).

مدل توازن شیمیایی جرم

در این مدل از حل معادلات خطی که غلظت هر گونه موجود در پذیرنده را به عنوان جمع خطی حاصل ضرب‌های ترکیب منبع در سهم منابع در نظر می‌گیرد، استفاده شد. در هر بار استفاده از مدل CMB، این مدل داده‌های به‌دست‌آمده از منابع مختلف را با داده‌های متناظر مربوط به پذیرنده‌ها (نمونه‌ها) منطبق می‌کند. پروفایل‌های منابع مورد استفاده در مدل CMB ترکیبی از داده‌های کتابخانه‌ای معتبر و تطبیق‌یافته با شرایط منطقه‌ای و منابع موجود بودند. پروفایل‌های مربوط به منابعی مانند پوسته زمین، وسایل نقلیه و زیست‌توده از مطالعات مرجع و پایگاه‌های داده معتبر استخراج شده و با توجه به شرایط زمین‌شناسی و صنعتی منطقه مورد مطالعه، تطبیق کیفی داده شده‌اند. برای کاهش عدم قطعیت ناشی از انتخاب پروفایل‌های منبع در مدل CMB، نتایج این مدل با خروجی مدل PMF که مستقل از پروفایل منبع عمل می‌کند، مقایسه شد. همبستگی زیاد بین سهم منابع استخراج‌شده توسط دو مدل (R^2 بین ۰/۸۶ تا ۰/۹۷) نشان داد که اعتبار مناسب پروفایل‌های انتخاب‌شده و پایداری نتایج مطلوب هست. ترکیب منبع (کسر جرمی یک عنصر شیمیایی در انتشار از یک منبع خاص) و غلظت آلاینده‌ها (فلزات سنگین)، اساس این مدل است. خروجی مدل گویای سهم منابع مختلف در کل میزان آلایندگی است. در این مدل اگر غلظت اندازه‌گیری‌شده برابر Mj باشد، مجموع کل غلظت فلزات سنگین با M و مطابق معادله ۵ نشان داده شد، همچنین غلظت فلز سنگین iام بر اساس معادله ۶ محاسبه شد که در آن، Ci غلظت محیطی هر یک از فلزات سنگین است، Fi,j کسر فلز از منبع j بوده و Xi,j نسبت تغییر غلظت فلز سنگین نسبت به i است (۴۳):

$$M = \Sigma M_j \qquad (۵)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^{p} F_{i,j} X_{i,j} M_{i,j} \qquad (۶)$$

ابزار تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

برای انجام تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزارهای آماری SPSS نسخه ۲۵ و GIS استفاده شد و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار آماری Origian Lab استفاده گردید. همچنین محاسبه رابطه‌ها و معادلات به کمک نرم‌افزار اکسل نسخه مایکروسافت آفیس ۲۰۰۷ انجام شد.

نتایج

با توجه به اینکه برخی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک می‌توانند ارتباط معنی‌داری با ترکیبات آلاینده داشته باشند، ازاین‌رو پارامترهایی از قبیل pH، کربن آلی و بافت خاک نیز علاوه بر فلزات سنگین مورد سنجش قرار گرفتند. نتایج حاصل از سنجش پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک در محدوده مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک در تمام نواحی نمونه‌برداری عمدتاً درصد بیشتری از نوع Sand داشت و pH خاک در محدوده ۸-۷ قرار داشت.

مقایسه میانگین مقادیر فلزات سنگین سنجش‌شده درون و خارج از محدوده صنایع فولاد خوزستان در شکل ۲ نشان می‌دهد متوسط مقادیر عناصر سنگین آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس و نیکل در نمونه‌های داخل محدوده بیش از خارج از محدوده بوده است، اما مقادیر عناصر سرب و روی، در نمونه‌های خارج از محدوده بیش از نمونه‌های داخل بوده است.

برای آنالیز منشأیابی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک در این مطالعه، چندین بار تعداد متفاوتی فاکتور از ۵ تا ۱۲ مورد در مدل PMF بهره‌گیری شد. با توجه به ارتباط فلزات سنگین با منابع، درنهایت ۵ منبع شامل پوسته زمین (Factor1)، وسایل نقلیه (Factor2)، صنعت فولاد (Factor3)، بیومس (Factor4) و سایر منابع (Factor5) تعیین شد. نتایج تعیین سهم منابع فلزات سنگین در فاکتورهای تعیین شده به روش‌های PMF و CMB در شکل‌های ۳ تا ۸ ارائه شده است. بیشترین سهم منشأ فلز نیکل در دو مدل PMF (۴۲ درصد) و CMB (۴۰ درصد) در مورد سایر منابع (Factor5) به دست آمد. همچنین پوسته زمین (Factor1) سهم زیادی از منشأ فلز نیکل را در دو مدل PMF (۳۵ درصد) و CMB (۳۹ درصد) داشت (شکل ۳). در مورد فلز آرسنیک پوسته زمین (Factor1) در دو مدل PMF (۴۳ درصد) و CMB (۴۱ درصد) نقش اصلی منابع این فلز در خاک را داشتند. همچنین صنعت فولاد (Factor3) در مورد منابع آرسنیک نقش عمده‌ای را نشان دادند (شکل ۴).

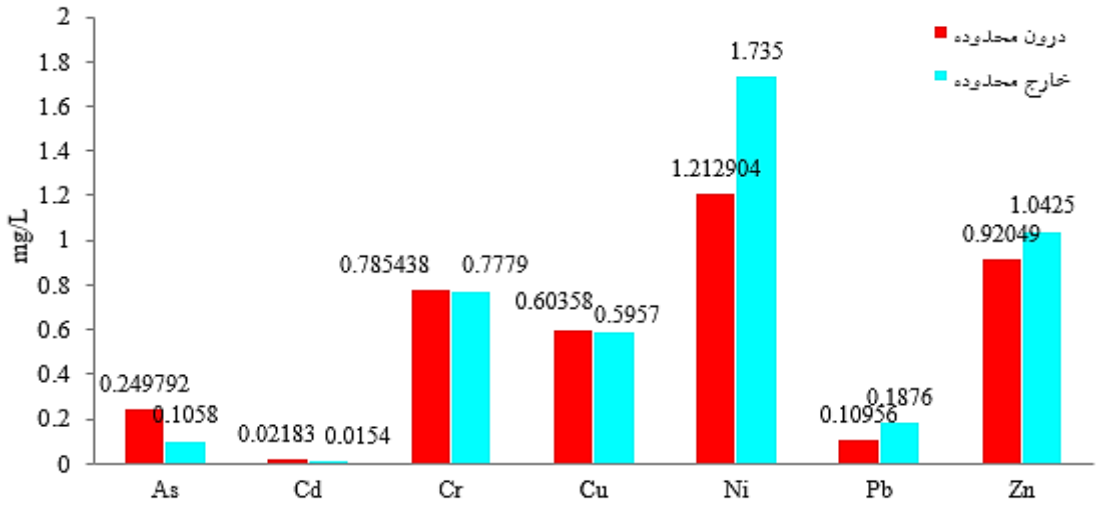
بیشترین سهم منشأ فلز کروم در دو مدل PMF (۳۲ درصد) و CMB (۳۰ درصد) در مورد سایر منابع (Factor5) به دست آمد. همچنین پوسته زمین (Factor1) سهم زیادی از منشأ فلز کروم را در دو مدل PMF (۲۸ درصد) و CMB (۲۵ درصد) داشت (شکل ۵). برای فلز کادمیوم صنعت فولاد (Factor3) در دو مدل PMF (۴۴ درصد) و CMB (۴۱ درصد) بیشترین سهم را داشت (شکل ۶). در مورد فلز مس در دو مدل PMF و CMB سه فاکتور وسایل نقلیه (Factor2)، صنعت فولاد (Factor3)، بیومس (Factor4) نقش عمده‌ای در منشأ این فلز در خاک داشتند (شکل ۷).

فلز سرب در دو مدل PMF و CMB با سهم ۴۸ و ۳۶ درصد بیشترین منشأ را در خصوص وسایل نقلیه (Factor2) نشان داد (شکل ۸). با توجه به مدل‌های PMF و CMB سایر منابع (Factor5) با سهم ۳۱ و ۳۲ درصد بیشترین منشأ فلز روی را داشتند. همچنین منشأ فلز روی در خاک‌های اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز به ترتیب بر اساس الگوی سایر منابع (Factor5)> بیومس (Factor4)> صنعت فولاد (Factor3)> وسایل نقلیه (Factor2)> پوسته زمین (Factor1) بود (شکل ۹).

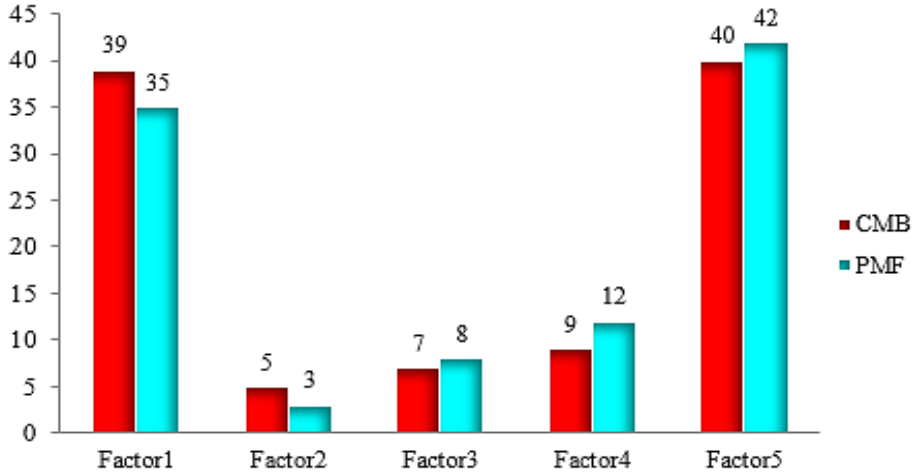
مقایسه سهم منابع فلزات سنگین در فاکتورهای تعیین‌شده به روش PMF در شکل ۱۰ و به روش CMB در شکل ۱۱ ارائه شده است. در فاکتور منبع پوسته زمین (Factor1) سهم عناصر ماکرو شامل نیکل (۳۹٪ در PMF و ۳۵٪ در CMB)، مس (۴۱٪ در PMF و ۴۳٪ در CMB) و کروم (۲۵٪ در PMF و ۲۸٪ در CMB) که به طور گسترده‌ای در پوسته زمین وجود دارند، بیش از سایر عناصر بوده است. در فاکتور منبع وسایل نقلیه (Factor2) عناصر کلیدی در درجه اول سرب (۳۶٪ در PMF و ۴۸٪ در CMB)، مس (۲۷٪ در PMF و ۳۰٪ در CMB) و در درجه دوم، کادمیوم (۲۳٪ در PMF و ۱۶٪ در CMB) و روی (۱۴٪ در PMF و ۱۵٪ در CMB) سهم دارند. منبع صنعت فولاد (Factor3) عناصر اصلی شامل کادمیوم (۴۱٪ در PMF و ۴۴٪ در CMB)، سرب (۲۵٪ در PMF و ۱۷٪ در CMB)، کروم

جدول ۱. نتایج حاصل از سنجش پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک اطراف کارخانه فولاد خوزستان

ایستگاه	pH	کربن آلی (٪)	Clay(٪)	Silt(٪)	Sand(٪)
۱	۷/۵۲	۰/۲۳	۱۳	۸	۷۹
۲	۷/۳۷	۰/۲۶	۱۶	۸	۷۶
۳	۷/۴۵	۰/۳۲	۱۵	۱۰	۷۵
۴	۷/۲۸	۰/۱۹	۱۶	۱۰	۷۴
۵	۷/۸۱	۰/۷۲	۱۹	۱۱	۷۰

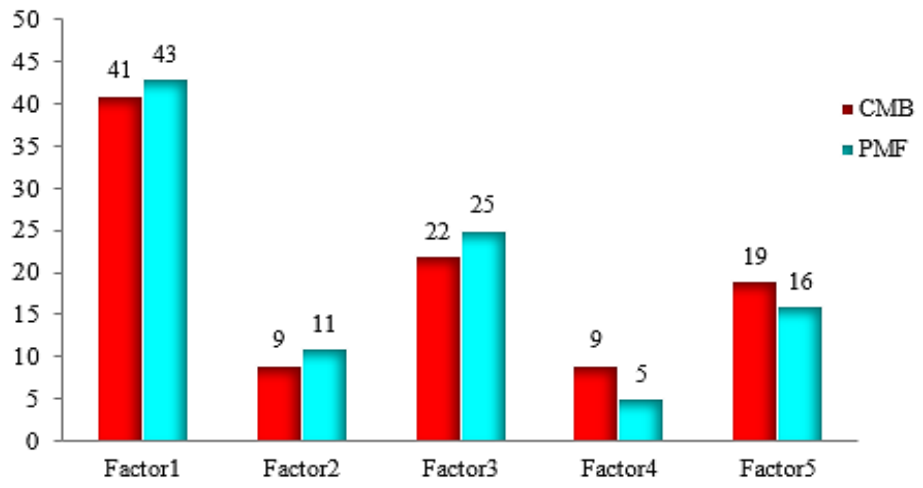


شکل ۲. مقایسه میانگین غلظت فلزات (میلی‌گرم بر کیلوگرم) داخل و خارج از محدوده خاک کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز

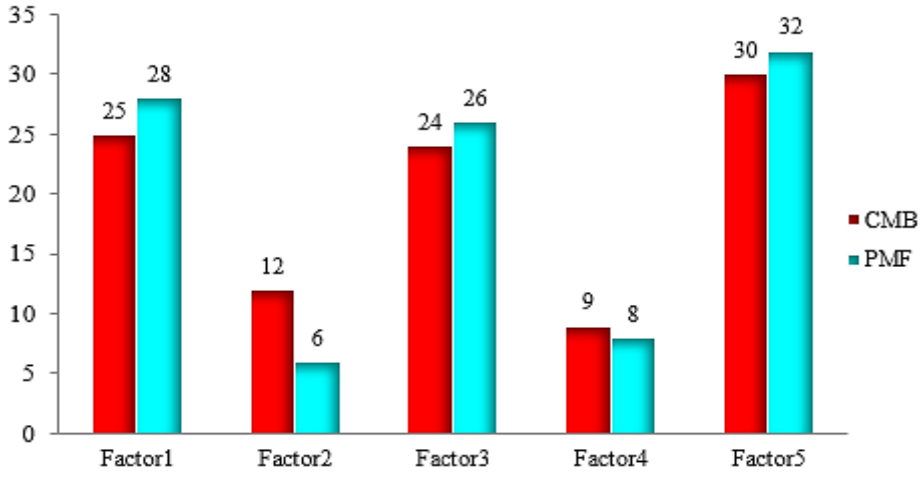


شکل ۳. تعیین سهم منابع فلز نیکل در خاک‌های اطرافکارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز

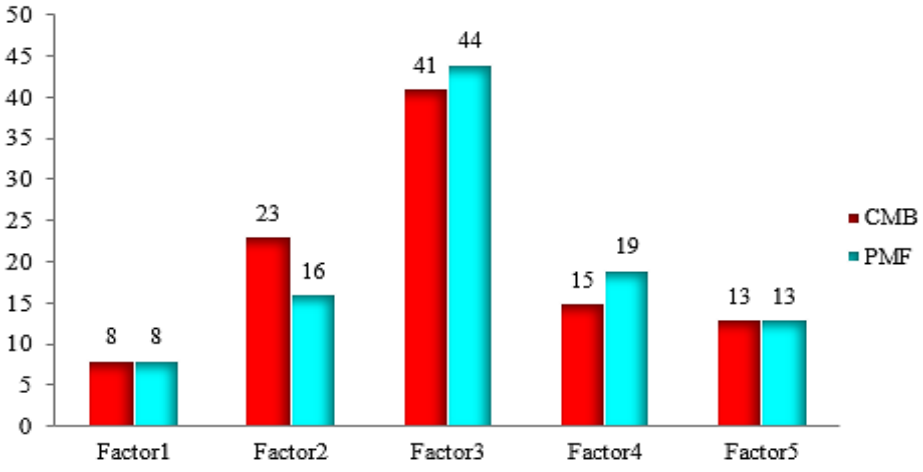
(٪۲۴ در PMF و ٪۲۶ در CMB)، آرسنیک (٪۲۲ در PMF و ٪۲۵ در CMB)، مس (٪۲۲ در PMF و ٪۲۴ در CMB) و روی (٪۲۱ در PMF و ٪۲۲ در CMB) سهم داشتند. عناصر اصلی در منبع بیومس (Factor4) شامل مس (٪۲۹ در PMF و ٪۲۶



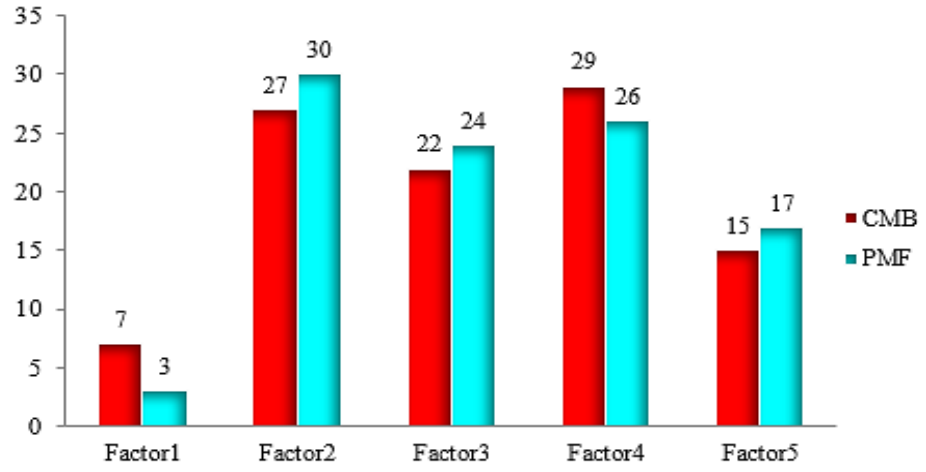
شکل ۴. تعیین سهم منابع فلز آرسنیک در خاک‌های اطرافکارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز



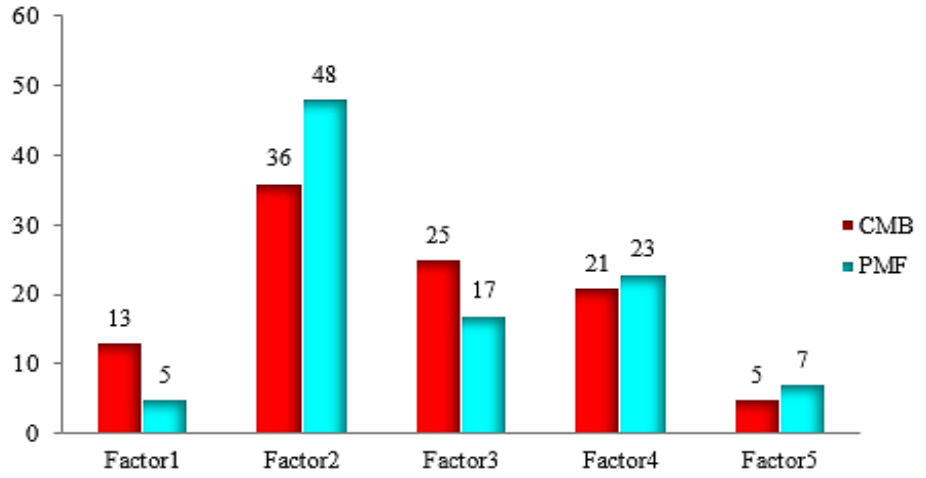
شکل ۵. تعیین سهم منابع فلز کروم در خاک‌های اطرافکارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز



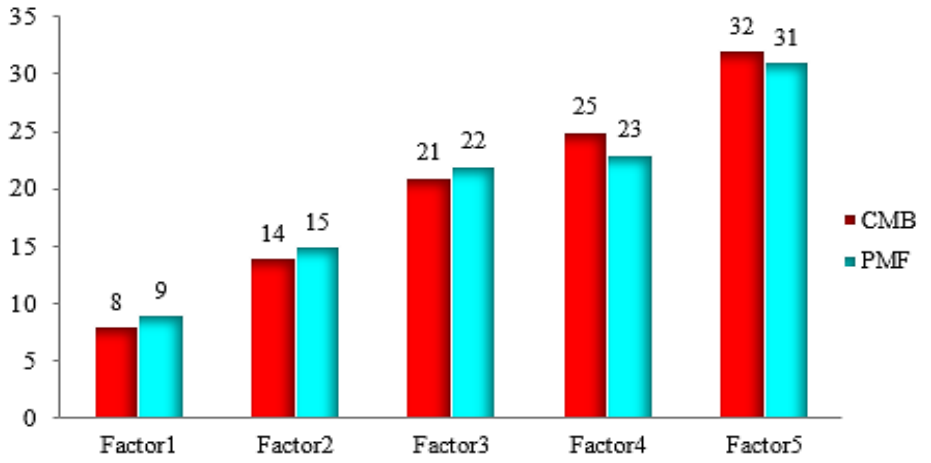
شکل ۶. تعیین سهم منابع فلز کادمیوم در خاک‌های اطرافکارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز



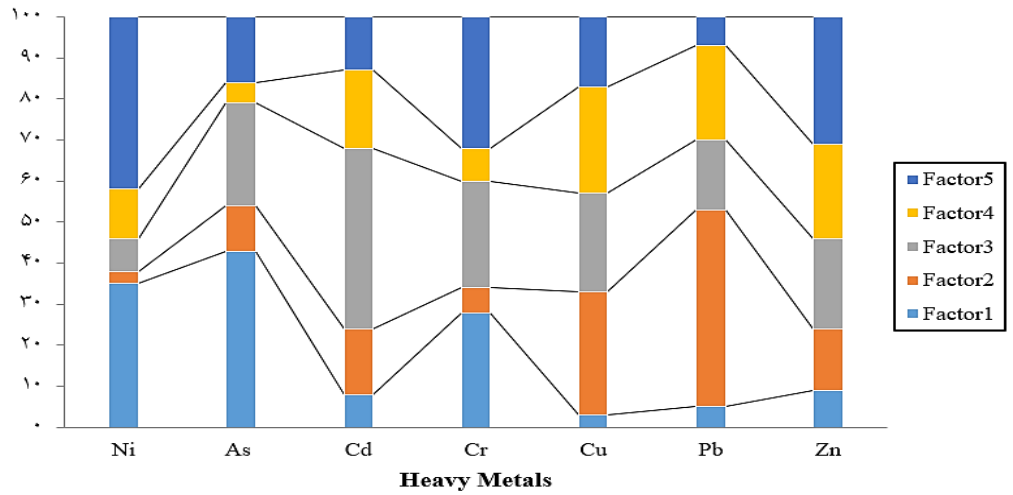
شکل ۷. تعیین سهم منابع فلز مس در خاک‌های اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز



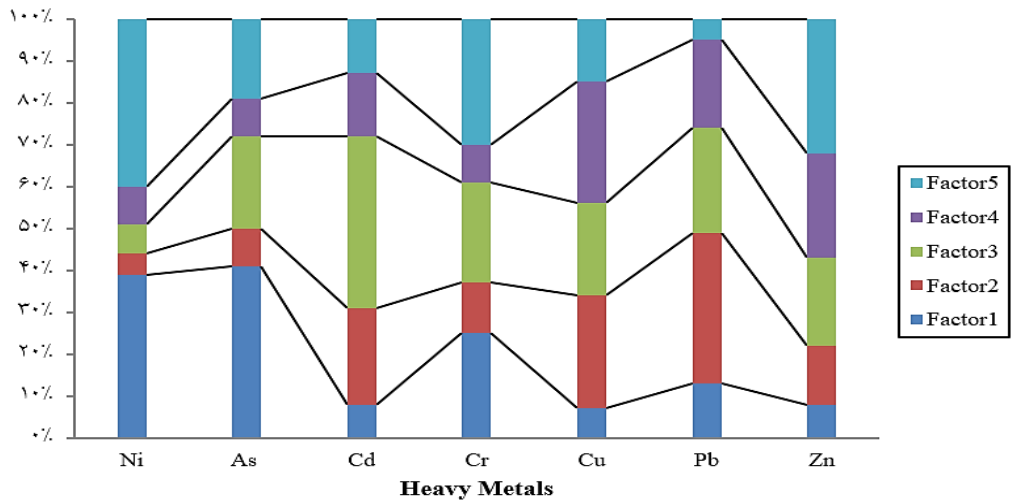
شکل ۸. تعیین سهم منابع فلز سرب در خاک‌های اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز



شکل ۹. تعیین سهم منابع فلز روی در خاک‌های اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز



شکل ۱۰. مقایسه سهم منابع فلزات سنگین در فاکتورهای تعیین‌شده به روش PMF در خاک‌های اطرافکارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز



شکل ۱۱. مقایسه سهم منابع فلزات سنگین در فاکتورهای تعیین شده به روش CMBدر خاک‌های اطرافکارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز

در CMB)، روی (۲۵٪ در PMF و ۲۳٪ در CMB)، سرب (۲۱٪ در PMF و ۲۳٪ در CMB) و کادمیوم (۱۵٪ در PMF و ۱۹٪ در CMB) بوده است. بخش قابل توجهی از عناصر سنجش‌شده در سایر منابع ناشناخته (Factor5) شامل نیکل (۴۰٪ در PMF و ۴۲٪ در CMB)، کروم (۳۰٪ در PMF و ۳۲٪ در CMB)، آرسنیک (۱۹٪ در PMF و ۱۶٪ در CMB) و روی (۳۲٪ در PMF و ۳۱٪ در CMB) در این گروه قرار داشتند. صنعت فولاد (۲۴٪ در PMF و ۲۳٪ در CMB) مهم‌ترین منشأ عناصر سنگین در خاک بوده است. سایر منابع (۲۳٪ در PMF و ۲۲٪ در CMB) دومین منشأ در انتشار فلزات سنگین در نمونه‌های خاک تعیین شد. پوسته زمین (۱۹٪ در PMF و ۲۰٪ در CMB) سومین منشأ، وسایل نقلیه (۱۸٪ در PMF و CMB) چهارمین و بیومس (۱۶٪ در PMF و ۱۷٪ در CMB) پنجمین منشأ فلزات سنگین در نمونه‌های خاک شناسایی شده است.

برای ارزیابی انطباق نتایج منشأیابی با دو مدل CMB و PMF، از رگرسیون خطی و شاخص برازش R^2 استفاده شد که نتایج در شکل ۱۲ نشان‌دهنده انطباق بسیار قوی بین فاکتورهای اول و پنجم (R^2 برابر با ۰/۹۴۲۵ و ۰/۹۷۴۹) و انطباق مطلوب

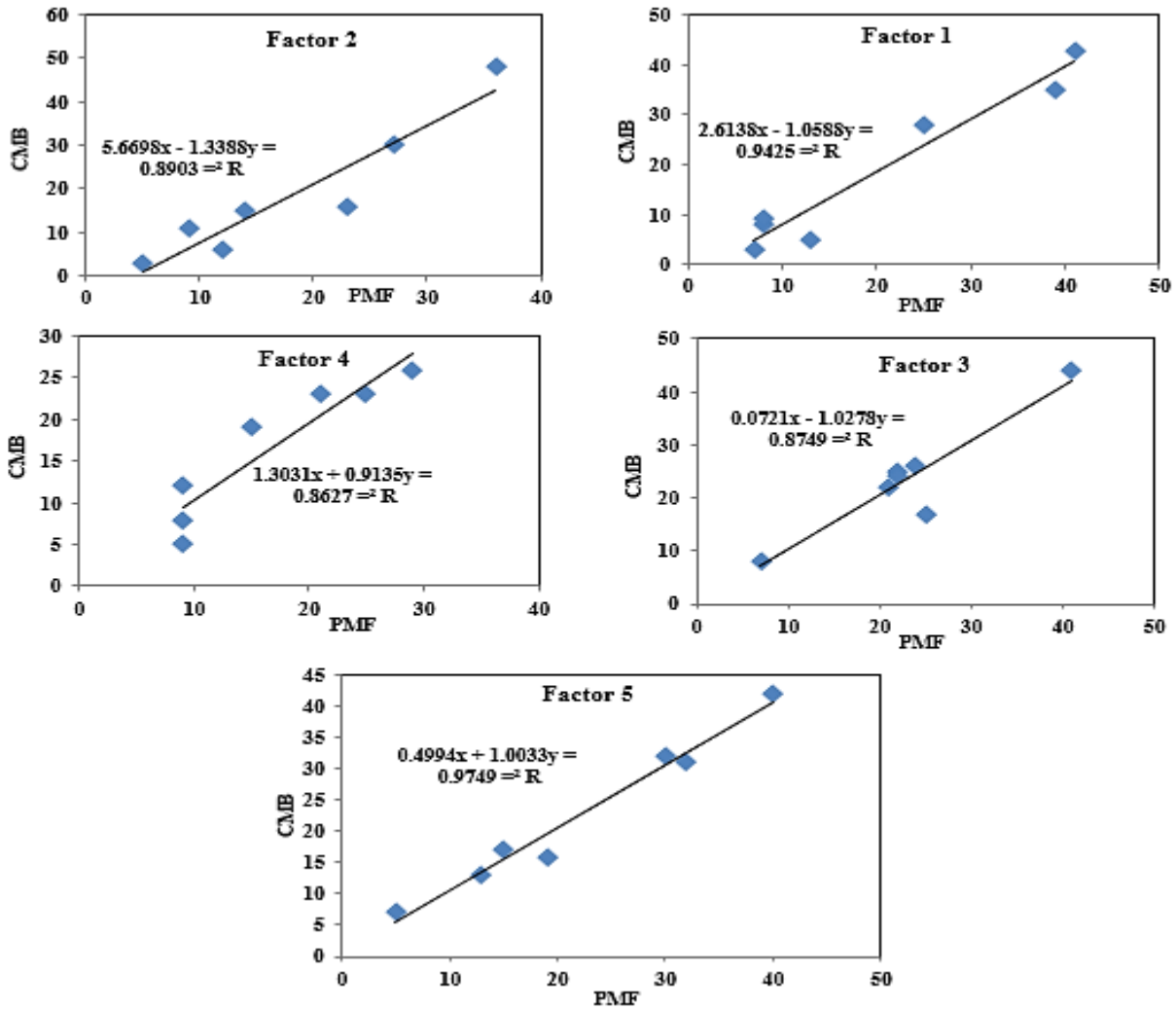
در فاکتورهای دوم، سوم و چهارم (R^2 به ترتیب برابر با ۰/۸۹۰۳، ۰/۸۷۴۹ و ۰/۸۶۲۷) بوده است. این نتایج بیانگر قابلیت اطمینان از روش‌های منشأیابی ارائه‌شده در پژوهش حاضر است.

بحث

فرایندهای صنعتی، مواد اولیه و منابع را بدون تغییر به محصولات تبدیل می‌کنند و ضایعاتی را به شکل انرژی و ماده تولید می‌کنند. اگر این ضایعات به درستی مدیریت نشوند و به محیط‌زیست تخلیه شوند، می‌توانند به طور بالقوه به آلاینده تبدیل شوند. همزمان با تولید فولاد، محصولات جانبی مختلفی مانند سرباره، گردوغبار فلزی، لجن آلوده به فلز و لایه‌های اکسید شده تولید می‌شوند (۴۵). نتایج این مطالعه نشان‌دهنده سطح نسبتاً زیادی از آلودگی خاک با فلزات سنگین است. میانگین غلظت آرسنیک در نمونه‌های منطقه صنعت فولاد ۲۱/۷ میکروگرم بر گرم بود؛ درحالی‌که در نمونه‌های کنترل، ۱۲/۷۶ میکروگرم بر گرم بود. میانگین غلظت آرسنیک در مناطق صنعتی در ایالات متحده آمریکا ۷ میکروگرم بر گرم، در بریتانیا ۱۶ میکروگرم بر گرم، در کانادا ۶ میکروگرم بر گرم و در ژاپن ۱۱ میکروگرم بر گرم گزارش شده است (۲۴ و ۵۰). به طور مشابه، میانگین غلظت کادمیوم در نمونه‌های خاک بیش از ۱ میکروگرم بر گرم بود؛ درحالی‌که در بیشتر مطالعات قبلی، آلودگی خاک با کادمیوم کمتر از ۱ میکروگرم بر گرم گزارش شده است (۲، ۶ و ۲۸). علاوه بر این، نتایج این مطالعه نشان داد که میزان کروم و نیکل در خاک منطقه صنعت فولاد به ترتیب ۱۹۶ میکروگرم بر گرم و ۶۱/۵ میکروگرم بر گرم بود؛ درحالی‌که میانگین غلظت در خارج از منطقه به ترتیب ۱۱۳/۴ میکروگرم بر گرم و ۳۵/۲ میکروگرم بر گرم اندازه‌گیری شد. بر اساس این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که صنعت فولاد نقش قابل توجهی در آلودگی خاک دارد. نیکل عمدتاً به عنوان شاخص آلودگی نفتی در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات قبلی که سطح نیکل را در تأسیسات صنعتی ارزیابی کرده‌اند، غلظت‌های کمتر ۹۵ میکروگرم بر گرم (۳۵) و ۸۰ میکروگرم بر گرم (۸) گزارش شده است. با توجه به فعالیت‌های صنعتی، از جمله صنایع نفت و گاز، در منطقه اهواز، سطح زیاد آلودگی خاک با فلزات سنگین قابل توجیه است. سطوح زیاد آلودگی گردوغبار و خاک‌های سطحی با فلزات سنگین نیز در مطالعات قبلی در مناطق دیگر شهر اهواز گزارش شده است (۱۰، ۱۲، ۲۸ و ۲۹). شناسایی منبع یک راه حل مؤثر برای مدیریت محیط‌زیست است. با شناسایی منابع اصلی انتشار آلاینده‌ها، می‌توان استراتژی‌های مؤثر و کارآمدی را برای کاهش آلودگی اجرا کرد (۹). در موارد مختلف، منشأ آلودگی فلزات سنگین در خاک با پوسته زمین مرتبط است که امکان مدیریت محیط‌زیست را محدود می‌کند (۳۴).

در این مطالعه، از دو روش مبتنی بر تجزیه‌وتحلیل شیمیایی و آماری برای تعیین منابع فلزات سنگین استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو روش PMF و CMB، صنعت فولاد عامل اصلی آلودگی خاک به فلزات سنگین بوده است که در روش PMF با انحراف کم (۱٪) دیده شد. نتایج مطالعه آنامان و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که رواناب سطحی حامل اصلی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک بوده است (۳). یافته‌های مطالعه لیو و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان می‌دهد که کشاورزی منبع اصلی آلودگی خاک با سرب و مس بوده است؛ درحالی‌که حمل‌ونقل منبع اصلی سرب بوده است (۲۳). لئو و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که ذوب آهن عامل اصلی انتشار فلزات سنگین بوده است (۲۶).

در این پژوهش انباشت کادمیوم در خاک‌های سطحی اطراف کارخانه فولاد خوزستان منشأ فعالیت‌های انسانی در زمینه صنعت فولاد را داشته و در مورد سرب و مس غالب منشأ آن از وسایل نقلیه و تردد خودروهای سبک و سنگین بوده است. همچنین فلزاتی مانند نیکل، آرسنیک و کروم منشأ زمین‌شناسی و فرایندهای طبیعی را داشتند و فلز روی از سایر منابع وارد خاک شده است. البته فلزات نیکل و روی از سایر منابع نیز در خاک‌های سطحی منطقه مورد مطالعه انباشته شدند. احتمالاً فلز روی از فعالیت‌های حاصل از کشاورزی اطراف



شکل ۱۲. مقایسه ارتباط بین سهم منابع انتشار فلزات سنگین در روش های PMF و CMB

منطقه مورد مطالعه بوده است (۳۲). همچنین در کشور چین گزارش شده است که کروم و نیکل در خاک عمدتاً تحت تأثیر مواد مادری قرار داشتند (۲۱) و فلزات مس و روی در خاک‌های کشور پاکستان منشأ زمین‌زاد داشتند (۱۳). رسوبات و فرونشست ذرات اتمسفری به دلیل مواد شیمیایی منتشرشده از کارخانه‌های صنعتی و تردد وسایل نقلیه، یکی از مسیرهای اصلی آلودگی کادمیوم و سرب در خاک است (۵ و ۵۲). از طرف دیگر فلزات سرب و مس می‌توانند از احتراق بنزین و گازوئیل، سایش لنت ترمز، قطعات فلزی و لاستیکی وسایل نقلیه و اصطکاک تایرهای آنها نیز در محیط انتشار یافته و وارد خاک‌های حاشیه معابر خیابان‌ها و جاده‌ها شوند (۷). همچنین فعالیت‌های صنعتی مانند استخراج نفت و گاز و توسعه میادین نفتی و تردد وسایل نقلیه سبک و سنگین نیز می‌توانند منشأ فلزات سنگین سرب، کادمیوم، آرسنیک، نیکل و کروم در خاک‌های منطقه مورد مطالعه باشند (۳۹ و ۴۰). پژوهشگران گزارش کردند که معادن و کارخانه‌های ذوب فلزات از عوامل اصلی ایجاد مقادیر زیاد فلزات سنگین در خاک هستند و مقادیر زیاد کادمیوم و سرب مربوط به معادن بزرگ آهن و سرب ـ روی است که طبق تجزیه‌وتحلیل فاکتورگیری ماتریس مثبت سهم ۲۷/۳۷ درصدی را گزارش کردند، اثری که به احتمال زیاد توسط رسوب اتمسفری تقویت می‌شود (۵۲). در پژوهش دیگری گزارش شد که غلظت کروم و آرسنیک رابطه قوی با

مواد مادری خاک داشت و این فلزات عمدتاً از منابع طبیعی سرچشمه می‌گیرد (۴۹). البته باید توجه داشت که فلزات نیکل، کروم و آرسنیک از فرایند سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی فلزی، آبکاری و فولادسازی نیز منشأ می‌شوند (۱۰ و ۴۰). در این پژوهش دیده شد که فلزات سرب و مس یا فلزات نیکل، آرسنیک و کروم منشأ مشترک و یکسان دارند. عوامل محیطی که بر سهم منابع آلودگی تأثیر می‌گذارند، تقریباً دو ویژگی دارند. اول، به دلیل اینکه تحت تأثیر ناهمگونی مکانی خاک قرار می‌گیرد، میزان تأثیر عوامل مختلف محیطی حالت ناپایداری را نشان می‌دهد و تفاوت‌ها بین مناطق قابل توجه است. دوم، عوامل اصلی تأثیرگذار بر یک عنصر در مناطق مختلف متفاوت است که نشان می‌دهد منابع یک عنصر واحد در مناطق مختلف کاملاً یکسان نیستند (۴۶). در یک مطالعه گزارش شده است که شاخص‌های فاکتور آلودگی، شاخص زمین‌انباشتگی، فاکتور غنی‌سازی و شاخص نمرو حاکی از عدم آلودگی فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل، کروم، روی، مس، کبالت آرسنیک در خاک‌های اطراف کارخانهٔ فولاد خوزستان است و فرایندهای زمین‌شناسی و اقلیمی تأثیر بیشتری نسبت به فعالیت‌های انسان‌زاد در آلودگی خاک اطراف کارخانه فولاد خوزستان دارند (۱۴) که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

در این مطالعه، pH خاک در محدوده ۸-۷ بود. تعادل صحیح جایی است که pH خاک بین ۵/۵ تا ۷/۵ باشد. همچنین، بافت غالب خاک شنی است و کربن آلی خاک در محدوده ۷۵-۲۰ درصد قرار داشت. تحرک و سمیت محیطی یک آلاینده نیز به غلظت و گونه‌های شیمیایی خاص آن بستگی دارد. پژوهشگران گزارش دادند که غلظت pH و کربن آلی در خاک ارتباط مستقیمی با افزایش تجمع آلاینده‌ها دارد (۳۶). افزایش pH خاک و کربن آلی بر تحرک فلزات سنگین کاتیونی مانند مس، سرب، کادمیوم، نیکل و کروم تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، رسوب سرب به شکل کربنات‌ها و فسفات‌ها در pH بیشتر از ۶/۵ رخ می‌دهد. عامل بافت خاک نقش مثبتی در تحرک فلزات در پروفیل خاک دارد. خاک از مواد معدنی و ذرات ریز مانند اکسیدها و رس‌ها تشکیل شده است. بافت خاک، توزیع اندازه ذرات را نشان می‌دهد. این ذرات اکسیدها و رس‌ها از اهمیت زیادی برخوردار هستند و به عنوان سطح جذب و ماندگاری برای فلزات سنگین در خاک عمل می‌کنند. خاک رس در مقایسه با خاک شنی، مقدار زیادی از فلزات را در خود نگه می‌دارد (۱۹ و ۴۲).

نتیجه‌گیری

ارزیابی انطباق دو مدل مورد مطالعه CMB و PMF، قابلیت اطمینان آنها را در تعیین منابع فلزات سنگین در خاک نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده سطح زیاد آلودگی خاک اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز به فلزات سنگین است و تردد وسایل نقلیه و حمل‌ونقل (سرب و مس)، صنعت فولادسازی (کادمیوم) و فرایندهای طبیعی زمین‌شناسی (آرسنیک، نیکل، کروم) و سایر منابع انسان‌زاد (روی) نقش مهم در انباشت فلزات در خاک‌های مورد مطالعه را داشتند. مقایسه غلظت فلزات خاک‌های سطحی اطراف کارخانه فولاد خوزستان با مقادیر نمونه‌های شاهد و مقادیر زمینه محلی در این منطقه نشان می‌دهد که فلزات نیکل، آرسنیک و کروم منشأ طبیعی و زمین‌شناسی داشته باشند. البته چنین به نظر می‌رسد که منابع انسانی مانند فعالیت‌های صنعتی و تردد وسایل نقلیه و کارخانه فولاد خوزستان نیز در ورود این فلزات به خاک نقش دارند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج این پژوهش، غلظت فلزات سنگین در اطراف کارخانه فولاد خوزستان در شهر اهواز به وسیله سایر متغیرها مانند منابع آب، گردوغبار حاصل از فولادسازی، برگ درختان بومی و جانوران شاخص منطقه نیز ردیابی شود.

ملاحظات اخلاقی

این مقاله از بخشی از پایان‌نامهٔ دکتری تخصصی گروه مهندسی خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی (کد پایان‌نامه ۱۰۶۴۸۱۷۵۳۷۰۱۷۰۸۱۴۰۰۱۶۲۴۵۸۴۸۱) مربوط به دانشگاه

آزاد اسلامی واحد اهواز استخراج شده است. نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند. نویسندگان مقاله خانم خوشناز پاینده، خانم فاطمه جعفریان، آقای احد نظرپور، آقای علی غلامی و آقای کامران محسنی‌فر در مراحل مختلف انجام پژوهش شامل طراحی و ایده، نمونه‌برداری، عملیات آزمایشگاهی و نگارش مقاله همکاری متقابل داشتند.

منابع مورد استفاده

References

1. Abu Khatita A.M., R. Koch and A.O. Bamousa. 2020. Sources identification and contamination assessment of heavy metals in soil of Middle Nile Delta, Egypt. *Journal of Taibah University for Science* 14(1):750-61. https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1771833
2. Alloway B.J. 2012. Sources of heavy metals and metalloids in soils. PP. 11-50. *In:* B.J. Alloway (Ed). Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
3. Anaman, R., C. Peng, Z. Jiang, X. Liu, Z. Zhou, Z. Guo and X. Xiao. 2022. Identifying sources and transport routes of heavy metals in soil with different land uses around a smelting site by GIS based PCA and PMF. *Science of the Total Environment* 823:153759. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153759
4. Askari M.S., P. Alamdari, S. Chahardoli and A. Afshari. 2020. Quantification of heavy metal pollution for environmental assessment of soil condition. *Environmental Monitoring and Assessment* 192(3):162. https://doi.org/10.1007/s10661-020-8116-6
5. Bouida, L., M. Rafatullah, A. Kerrouche, M. Qutob, A.M. Alosaimi, H.S. Alorfi and M.A. Hussein. 2022. A review on cadmium and lead contamination: Sources, fate, mechanism, health effects and remediation methods. *Water* 14(21): 3432. https://doi.org/10.3390/w14213432
6. Chen, J.F., H.D. Fang, J.J. Wu, J.M. Lin, W.B. Lan and J.S. Chen. 2019. Distribution and source apportionment of heavy metals in farmland soils using PMF and lead isotopic composition. *Journal of Agro-Environment Science* 38(5):1026-1035.
7. Choi, J.Y., H. Jeong, K.Y. Choi, G.H. Hong, D.B. Yang, K. Kim and K. Ra. 2020. Source identification and implications of heavy metals in urban roads for the coastal pollution in a beach town, Busan, Korea. Marine Pollution Bulletin. *Marine Pollution Bulletin* 1(161):111724. 10.1016/j.marpolbul.2020.111724.
8. Dhaliwal S.S., J. Singh, P.K. Taneja and A. Mandal. 2020. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 27(2):1319-33. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1
9. Gautam, K., P. Sharma, S. Dwivedi, A. Singh, V.K. Gaur, S. Varjani, J.K. Srivastava, A. Pandey, J.S. Chang, and H.H. Ngo. 2023. A review on control and abatement of soil pollution by heavy metals: Emphasis on artificial intelligence in recovery of contaminated soil. *Environmental Research* 225:115592. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115592
10. Gholami, Z., M. Mohammadi Rouzbahani, K. Payandeh and S. Sabzalipour. 2025. Health risk assessment of potentially toxic elements of corn fields in southern Iran. *Toxin Reviews* 44(2): 185-95. https://doi.org/10.1080/15569543.2024.2414098.
11. Gupta, V. 2019. Vehicle-generated heavy metal pollution in an urban environment and its distribution into various environmental components. *Environmental Concerns and Sustainable Development: Air, Water and Energy Resources* 1:113-127. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5889-0_5
12. Hojati S. 2021. Assessment of street dust pollution status to some heavy metals and. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)* 44(1): 21-39. DOI: 10.22055/agen.2021.36318.1598
13. Jadoon, W.A. and R.N. Malik. 2019. Geochemical approach for heavy metals in suburban agricultural soils of Sialkot, Pakistan. *SN Applied Sciences* 1(2):161. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0167-3

14. Jafarian, F., K. Payanadeh, A. Nazarpour, A. Gholami and K. Mohsenifar. 2025. Evaluation of Environmental Pollution Indices of Heavy Metals in Soil around Khuzestan Steel Co. *Journal of Research in Environmental Health* 11(1): 111-129 (in Farsi).
15. Jiang, J. and R.K. Xu. 2013. Application of crop straw derived biochars to Cu (II) contaminated Ultisol: evaluating role of alkali and organic functional groups in Cu (II) immobilization. *Bioresource Technology* 133: 537-45. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.161.
16. Jiang, H.H., L.M. Cai, H.H. Wen and J. Luo. 2020. Characterizing pollution and source identification of heavy metals in soils using geochemical baseline and PMF approach. *Scientific Reports* 10(1): 6460. https://doi.org/10.1038/s41598-020-63604-5
17. Jyothi, N.R. 2020. Heavy metal sources and their effects on human health. PP. 1-12. *In:* N. Mazen and Z. Hongbo (eds.). Heavy metals-their environmental impacts and mitigation, IntechOpen.
18. Ke, W., J. Zeng, F. Zhu, X. Luo, J. Feng, J. He and S. Xue. 2022. Geochemical partitioning and spatial distribution of heavy metals in soils contaminated by lead smelting. *Environmental Pollution* 307: 119486. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119486
19. Kicinska, A., R. Pomykała and M. Izquierdo-Diaz. 2022. Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science* 73(1): e13203. https://doi.org/10.1111/ejss.13203
20. Latif, A., D. Sheng, K. Sun, Y. Si, M. Azeem, A. Abbas and M. Bilal. 2020. Remediation of heavy metals polluted environment using Fe-based nanoparticles: Mechanisms, influencing factors, and environmental implications. *Environmental Pollution* 264: 114728. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114728
21. Li, Y., Z. Xu, H. Ren, D. Wang, J. Wang, Z. Wu and P. Cai. 2022. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in the topsoil of Weifang City, East China. *Frontiers in Environmental Science* 10: 893938. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.893938
22. Liu, W., T. Hu, Y. Mao, M. Shi, C. Cheng, J. Zhang, S. Qi, W. Chen and X. Xing. 2022. The mechanistic investigation of geochemical fractionation, bioavailability and release kinetic of heavy metals in contaminated soil of a typical copper-smelter. *Environmental Pollution* 306: 119391. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119391.
23. Liu, H., S. Anwar, L. Fang, L. Chen, W. Xu, L. Xiao, B. Zhong and D. Liu. 2024. Source apportionment of agricultural soil heavy metals based on PMF model and multivariate statistical analysis. *Environmental Forensics* 25(1-2): 40-8. https://doi.org/10.1080/15275922.2022.2047838
24. Long, Z., Y. Huang, W. Zhang, Z. Shi, D. Yu, Y. Chen, C. Liu and R. Wang. 2021. Effect of different industrial activities on soil heavy metal pollution, ecological risk, and health risk. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(1): 20. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08807-z
25. Luo, X.S., Y. Xue, Y.L. Wang, L. Cang, B. Xu and J. Ding. 2015. Source identification and apportionment of heavy metals in urban soil profiles. *Chemosphere* 127:152-7. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.01.048
26. Luo, X., C. Wu, Y. Lin, W. Li, M. Deng, J. Tan and S. Xue. 2023. Soil heavy metal pollution from Pb/Zn smelting regions in China and the remediation potential of bio mineralization. *Journal of Environmental Sciences* 125: 662-77. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.01.029
27. Lv, J. 2019. Multivariate receptor models and robust geostatistics to estimate source apportionment of heavy metals in soils. *Environmental pollution* 244:72-83. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.147
28. Mansouri Moghadam, S., K. Payandeh, A. Koushafar, M. Goosheh and M. Mohammadi Rouzbahani. 2024. Level of heavy metals and environmental pollution index in Ahvaz, Southwest Iran. *Scientific Reports* 14(1):14754. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64192-4
29. Moghadam, S.M., K. Payandeh, A. Koushafar, M. Goosheh and M.M. Rouzbahani. 2024. Human health risk assessment and carcinogenicity due to exposure to potentially toxic elements on soil pollution in Southwest Iran. *Clinical Epidemiology and Global Health* 25:101492. https://doi.org/10.1016/j.cegh.2023.101492.
30. Moradi, A., N. Honarjoo, P. Najafi and J. Fallahzade. 2016. A human health risk assessment of soil and crops contaminated by heavy metals in industrial regions, central Iran. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 22(1):153-67. https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1056293
31. Paatero, P. and U. Tapper. 1994. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environ Metrics* 5(2): 111-26. https://doi.org/10.1002/env.3170050203
32. Payandeh, K., M. Forouzanfar, A. Pinnarelli, A. Nazarpour, M. Velayatzadeh and V. Mirahi. 2025. Assessment of Potentially Toxic Elements Contamination of Soils in Agricultural Farms Northeast of Ahvaz in the Veys Region. *Journal of Environmental Health Engineering* 13(2): 215-232 (in Farsi).
33. Payanadeh, K., M. Forouzanfar and M. Velayatzadeh. 2025. Evaluation and prediction of health and hygiene indices of heavy metals in agricultural fields in Hamidieh city: a Machine Learning Approach. *Journal of Research in Environmental Health* 11(4): 57-74 (in Farsi).

34. Peng, J.Y., S. Zhang, Y. Han, B. Bate, H. Ke and Y. Chen. 2022. Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment. *Science of the Total Environment* 816: 151632. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151632
35. Pichtel, J. 2016. Oil and gas production wastewater: Soil contamination and pollution prevention. *Applied and Environmental Soil Science* 2016(1): 2707989. https://doi.org/10.1155/2016/2707989
36. Pikuła, D. and W. Stępień. 2021. Effect of the degree of soil contamination with heavy metals on their mobility in the soil profile in a microplot experiment. *Agronomy* 11(5):878. https://doi.org/10.3390/agronomy11050878
37. Radomirovic, M., Z. Cirovic, D. Maksin, T. Bakic, J. Lukic, S. Stankovic and A. Onjia. 2020. Ecological risk assessment of heavy metals in the soil at a former painting industry facility. *Frontiers in Environmental Science* 8: 560415. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.560415
38. Velayatzadeh, M. and K. Payandeh. 2020. Effect of household water treatment on the concentration of heavy metals of drinking water in Ahvaz city. *Iranian South Medical Journal* 22(6):402-414 (in Farsi).
39. Velayatzadeh, M. 2022. Contamination Status and Risk Assessment of Lead Metal in Fish of Persian Gulf, Oman Sea and Caspian Sea-Narrative review. *Journal of Marine Medicine* 4(3):141-152 (in Farsi).
40. Velayatzadeh, M., M.R. Moudi and M. Mirnia. 2024. Health and ecological risk indicators of potentially toxic elements in the surface soils of the Mansouri oil field in the southeast of Ahvaz. *Journal of Environmental Health Engineering* 11(2):146-162 (in Farsi).
41. Ungureanu, E.L. and G. Mustatea. 2022. Toxicity of heavy metals. *In:* M.S. Hosam and I.H. Amal (eds.). Environmental impact and remediation of heavy metals. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.102441
42. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1996. Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils (Revision 2). Washington.
43. Wang, G., a. Yinglan, H. Jiang, Q. Fu and B. Zheng. 2015. Modeling the source contribution of heavy metals in surficial sediment and analysis of their historical changes in the vertical sediments of a drinking water reservoir. *Journal of Hydrology* 520: 37-51. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.034
44. Wang, G., S. Zhang, L. Xiao, Q. Zhong, L. Li, G. Xu, O. Deng and Y. Pu. 2017. Heavy metals in soils from a typical industrial area in Sichuan, China: spatial distribution, source identification, and ecological risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 24(20): 16618-30. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9288-7
45. Wang, Y., X. Duan and L. Wang. 2020. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: Case study in Jiangsu Province. *Science of the Total Environment* 710:134953. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134953
46. Wang, J., J. Song, R. Xie, Y. Li, M. Xu, J. Lu, X. Xia and G. Li. 2020. Source identification of heavy metals in surface sediments from a river in Anhui, China. *Environmental Forensics* 21(2): 167-75. 10.1080/15275922.2020.1728439
47. Wen, Y., W. Li, Z. Yang, Q. Zhang and J. Ji. 2020. Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China. *Chemosphere* 245:125620. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125620
48. Wu, Y., X. Li, L. Yu, T. Wang, J. Wang and T. Liu. 2022. Review of soil heavy metal pollution in China: Spatial distribution, primary sources, and remediation alternatives. *Resources, Conservation and Recycling* 181:106261. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106261
49. Xu, Y., H. Shi, Y. Fei, C. Wang, L. Mo and M. Shu. 2021. Identification of soil heavy metal sources in a large-scale area affected by industry. *Sustainability* 13(2):511. https://doi.org/10.3390/su13020511.
50. Yang, Q., Z. Li, X. Lu, Q. Duan, L. Huang and J. Bi. 2018. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the Total Environment* 642:690-700. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068
51. Zhang, H., A. Yin, X. Yang, M. Fan, S. Shao, J. Wu, P. Wu, M. Zhang and C. Gao. 2021. Use of machine-learning and receptor models for prediction and source apportionment of heavy metals in coastal reclaimed soils. *Ecological Indicators* 122: 107233. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107233
52. Zhang, F., C. Wang, X. Cheng, H. Ma and L. He. 2022. Ecological assessment, spatial analysis, and potential sources of Heavy Metals (HMs) in soils with high background values in the lead-zinc mine, Hezhang County, Southwestern China. *Water* 14(5): 783. https://doi.org/10.3390/w14050783