J. Soil Plant Interact. 2025; 16(4): 57–71. https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.20981

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Effect of Mining Practices on Chromium, Nickel and Cobalt in Margin Soils and Feather Grass (*Stipa barbata*) of Chromite Mine in Sabzever

Zahra SeyedAbadi[1], Hojat Emami[1*], Amir Fotovat[1] and Ali Gharae[2]

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Department of Environment of Sabzevar, Iran
* Corresponding author, Email: hemami@um.ac.ir

(Received: 4 October 2025; Revised: 28 October 2025; Accepted: 2 November 2025)

Abstract

Background and Objective: Human activity, especially mining practices, has led to an increase in the concentration of heavy metals in soils. This research aimed to determine the concentration of total Cr, Ni, and Co and Cr(VI) and to evaluate pollution risk in margin soils and feather grass (*Stipa barbata*) and distribution of Cr(VI) at different sizes of aggregates of chromite mine of Sabzevar.

Methods: Thirty soil samples (0–15 cm depth) were taken from 350 m intervals around the chromite mine up to 10 km in the prevailing wind direction (east-west), and the concentrations of the studied elements in soils and plants were measured. In addition, the amount of chromium (VI) was determined in six aggregate size classes (2–4, 1–2, 0.5–1, 0.25–0.5, 0.05-0.25, and smaller than 0.05 mm).

Results: Concentration of chromium, nickel, and cobalt was higher than the global standard limit, and chromium (VI) in some places was beyond the standard limit of Iran's environmental organization. Comparison of chromium concentration in aggregate fractions showed that its concentration was higher in the fine particles, and the highest and lowest concentrations were found in particles with diameters < 0.05 and 2–4 mm, respectively. According to the geo-accumulation index, chromium was in the medium pollution class, and the enrichment index was obtained as Cr > Ni > Cr(VI) > Co. Besides, the pollution load factor indicated the polluted class. In addition, the bioaccumulation factor of the studied elements in the feather grass was less than one for cobalt, chromium, and nickel.

Conclusion: The capability of feather grass to transfer and accumulate heavy metals from the soil into its organs was low. Therefore, it is recommended to introduce this species as a plant resistant to pollution of heavy metals, and to monitor the concentration of heavy metals in soils at different time intervals.

Keywords: Geo-accumulation index, Enrichment factor, Pollution load index, Bioaccumalation factor.

How to Cite: SeyedAbadi, Z., Emami, H., Fotovat, A., Gharaei, A., 2025. Effect of mining practices on chromium, nickel and cobalt in margin soils and feather grass (*Stipa barbata*) of chromite mine in Sabzever. J. Soil Plant Interact. 16(4), 57–71 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.20981

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. 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.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۴؛ (۴)۱۶: ۷۱-۵۷، https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.20981

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

تاثیر فعالیت‌های معدنی بر کروم، نیکل و کبالت در خاک‌ها و گیاه شالدم (*Stipa barbata*) اطراف معدن کرومیت سبزوار

زهرا سیدآبادی[۱]، حجت امامی[۱*]، امیر فتوت[۱] و علی قرایی[۲]

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- اداره محیط زیست سبزوار، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hemami@um.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۱)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: فعالیت‌های انسانی به ویژه معدن‌کاوی موجب افزایش غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک می‌شوند. هدف این پژوهش تعیین میزان کروم کل، نیکل، کبالت و کروم (VI) و ارزیابی میزان آلودگی خاک و گیاه شالدم (*Stipa barbata*) و آلودگی خاک و توزیع کروم (VI) در بین خاکدانه‌های با اندازه‌های متفاوت اطراف معدن کرومیت سبزوار در شمال شرق ایران بود.

روش‌ها: تعداد ۳۰ نمونه خاک (عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) در فواصل ۳۵۰ متری اطراف معدن کرومیت تا فاصله ۱۰ کیلومتر در جهت باد غالب (شرقی-غربی) جمع‌آوری شده و غلظت عناصر مورد بررسی در خاک و گیاه اندازه‌گیری شد. همچنین، مقدار کروم (VI) در شش کلاس اندازه خاکدانه‌ها (۴ تا ۲، ۲ تا ۱، ۱ تا ۰/۵، ۰/۵ تا ۰/۲۵، ۰/۲۵ تا ۰/۰۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر) تعیین شد.

نتایج: میانگین غلظت کروم، نیکل و کبالت در خاک‌های اطراف معدن بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی بود، همچنین میانگین غلظت کروم (VI) ۰/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که در برخی نقاط بیشتر از حد مجاز سازمان محیط زیست ایران بود. مقایسه غلظت کروم در خاکدانه‌های مختلف نشان داد که غلظت آن در خاکدانه‌های ریز بیشتر بود و بیشترین و کمترین غلظت کروم در خاکدانه‌های با قطر کمتر از ۰/۰۵ و ۴ تا ۲ میلی‌متر مشاهده شد. بر اساس شاخص زمین‌انباشتگی کروم در کلاس آلودگی متوسط بود و شاخص غنی‌شدگی به صورت Cr > Ni > Cr(VI) > Co به‌دست آمد. همچنین شاخص بار آلودگی، بیان‌گر کلاس آلوده (۱/۸۸) بود. علاوه بر این، بررسی فاکتور تجمع زیستی عناصر مورد بررسی در گیاه شالدم برای کبالت (۰/۰۲)، کروم (۰/۰۷) و نیکل (۰/۱۲) کمتر از یک بود.

نتیجه‌گیری کلی: توانایی گیاه شالدم در انتقال و تجمع عناصر با پتانسیل سمّیت از خاک به اندام‌های خود کم بود. بنابراین معرفی این گونه به عنوان گیاه مقاوم به آلودگی عناصر با پتانسیل سمّیت و پایش غلظت عناصر در خاک در دوره‌های زمانی مختلف پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شاخص بار آلودگی، شاخص زمین‌انباشتگی، شاخص غنی‌شدگی، فاکتور تجمع زیستی.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

روند فزاینده شهرنشینی و صنعتی‌شدن در دهه‌های اخیر، به افزایش چشم‌گیر تولید زباله‌های جامد، به‌ویژه باطله‌های معدنی ناشی از فعالیت‌های انسانی، انجامیده است. این پدیده به یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم جهانی تبدیل شده و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در میان آلاینده‌های مختلف، عناصر با پتانسیل سمّیت (PTEs) یا فلزات سنگین، به دلیل پایداری در محیط، تجمع زیستی و آثار سمّی بر جانداران، از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی قرن حاضر محسوب می‌شوند. ورود عناصر با پتانسیل سمّیت به محیط زیست می‌تواند هم ناشی از فرآیندهای طبیعی و هم فعالیت‌های انسانی باشد. منابع انسانی این آلودگی شامل استخراج و فرآوری معادن، صنایع فلزی و الکترونیکی، دفع زباله‌های صنعتی، حمل‌ونقل شهری و مصرف کودهای شیمیایی است که همگی سهم قابل‌توجهی در افزایش غلظت این عناصر در خاک دارند. در این میان، فعالیت‌های معدن‌کاوی با وجود نقش کلیدی در اقتصاد کشورها، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آلودگی عناصر با پتانسیل سمّیت شناخته شده و در بسیاری از مناطق موجب افزایش چندبرابری آلودگی خاک می‌شوند (Salmasi and Pyrowan, 2021). علاوه بر منابع انسانی، منابع طبیعی نیز در غنی‌سازی خاک از عناصر با پتانسیل سمّیت نقش دارند. نوع سنگ مادری و فرآیندهای خاک‌زایی می‌توانند غلظت‌های متفاوتی از این عناصر را ایجاد کنند. به‌ویژه مجموعه‌های افیولیتی که عمدتاً از سنگ‌های فوق‌بازی تشکیل شده‌اند، غنی از عناصری مانند نیکل، کروم، کبالت و منگنز هستند. خاک‌های منشأ گرفته از این سنگ‌ها معمولاً دارای غلظت زیادتری از عناصر با پتانسیل سمّیت بوده و از منظر زیست‌محیطی اهمیت جهانی دارند (Abbaszadeh et al., 2018).

کرومیت ($FeCr_2O_4$) به‌عنوان مهم‌ترین منبع تجاری کروم، در سنگ‌های اولترامافیک و دگرگونی یافت می‌شود و کاربرد اصلی آن در تولید فروکروم برای ساخت فولاد ضدزنگ است (Farkaš et al., 2013). کروم به‌طور طبیعی در محیط وجود دارد و عمدتاً از هوازدگی سنگ‌های کرومیت آزاد می‌شود (Dietz et al., 2004). با توجه به افزایش سالانه حدود ۲۰۰ هزار تن تقاضای جهانی کروم، پسماندهای صنعتی این فلز به یکی از آلاینده‌های مهم محیطی تبدیل شده‌اند (Kong et al., 2019). کروم در دو حالت اکسیداسیون اصلی، یعنی کروم (III) و کروم (VI)، وجود دارد که از نظر سمّیت و ویژگی‌های فیزیکی تفاوت چشم‌گیری دارند. کروم (VI) به‌مراتب سمّی‌تر بوده و در فرآیندهای اکسیداسیون طبیعی خاک و آب‌های اطراف معادن تولید می‌شود (Dhal et al., 2013). علاوه بر کروم، عناصر دیگری همچون نیکل و کبالت نیز در سنگ‌های مافیک و اولترامافیک حضور دارند. نیکل به‌طور طبیعی در خاک در محدوده ۲۰ تا ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم یافت می‌شود (Banerjee et al., 2023). کبالت نیز به‌صورت آزاد در طبیعت وجود ندارد و معمولاً همراه با مس و نیکل استخراج می‌شود. این عنصر اغلب به شکل اکسید یا کربنات در آب‌های طبیعی حضور دارد و می‌تواند به‌صورت سولفات کبالت رسوب کرده و در خاک تجمع یابد (Hamilton et al., 2020).

پژوهش‌های متعددی به بررسی آلودگی عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک، آب، گیاه و رسوبات اطراف معادن پرداخته‌اند. برای مثال، پژوهشی در مناطق معدن مس شمال غرب ایران نشان داد که خاک‌های اطراف معدن با شاخص‌های زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی، دارای سطوح بالای آلودگی بودند (Alizadeh et al., 2024). Poorakbar and Ebrahimnezhad (2011) گزارش کرد که گیاهان بومی منطقه معدن مس سرچشمه توانایی تجمع مس و نیکل را در شاخساره خود دارند و این گونه‌ها می‌توانند شاخص‌های زیستی مناسبی برای پایش آلودگی باشند. افزون بر این، Mirzabayati and Hamidian (2025) با بررسی گیاهان دارویی ایران عنوان کردند که انباشت عناصر با پتانسیل سمّیت در گیاهان به‌ویژه در مناطق معدنی و نیمه‌خشک کشور، نگرانی جدی برای سلامت محیط‌زیست ایجاد می‌کند. این نتایج اهمیت بررسی روابط بین خاک و گیاهان بومی را در مناطق معدنی کشور، برجسته می‌کند. با این حال، پژوهش‌های مرتبط با استخراج

کرومیت و پیامدهای زیست‌محیطی آن محدود است (Das et al., 2013). در این راستا، با توجه به انباشت مستمر عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک و اهمیت آلودگی خاک به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی، بررسی توزیع غلظت این عناصر به‌منظور پایش آلودگی و حفظ کیفیت محیط‌زیست امری ضروری است. از سوی دیگر، بر اساس پژوهش‌های پیشین و شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه سبزوار، سنگ‌های موجود عمدتاً از نوع افیولیت گزارش شده‌اند (Afshar-Harb, 1994). این مجموعه‌های سنگی به‌طور بالقوه می‌توانند دارای غلظت‌های بیشتری از عناصر نیکل، کبالت و کروم باشند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی میزان آلودگی عناصر کروم، نیکل، کبالت و کروم (VI) در خاک‌های رویین و بررسی انتقال و تجمع آن‌ها در گیاه شال‌دم (*Stipa barbata*) و شناسایی منابع احتمالی این عناصر در زمین‌های اطراف معدن کروم شهرستان سبزوار انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

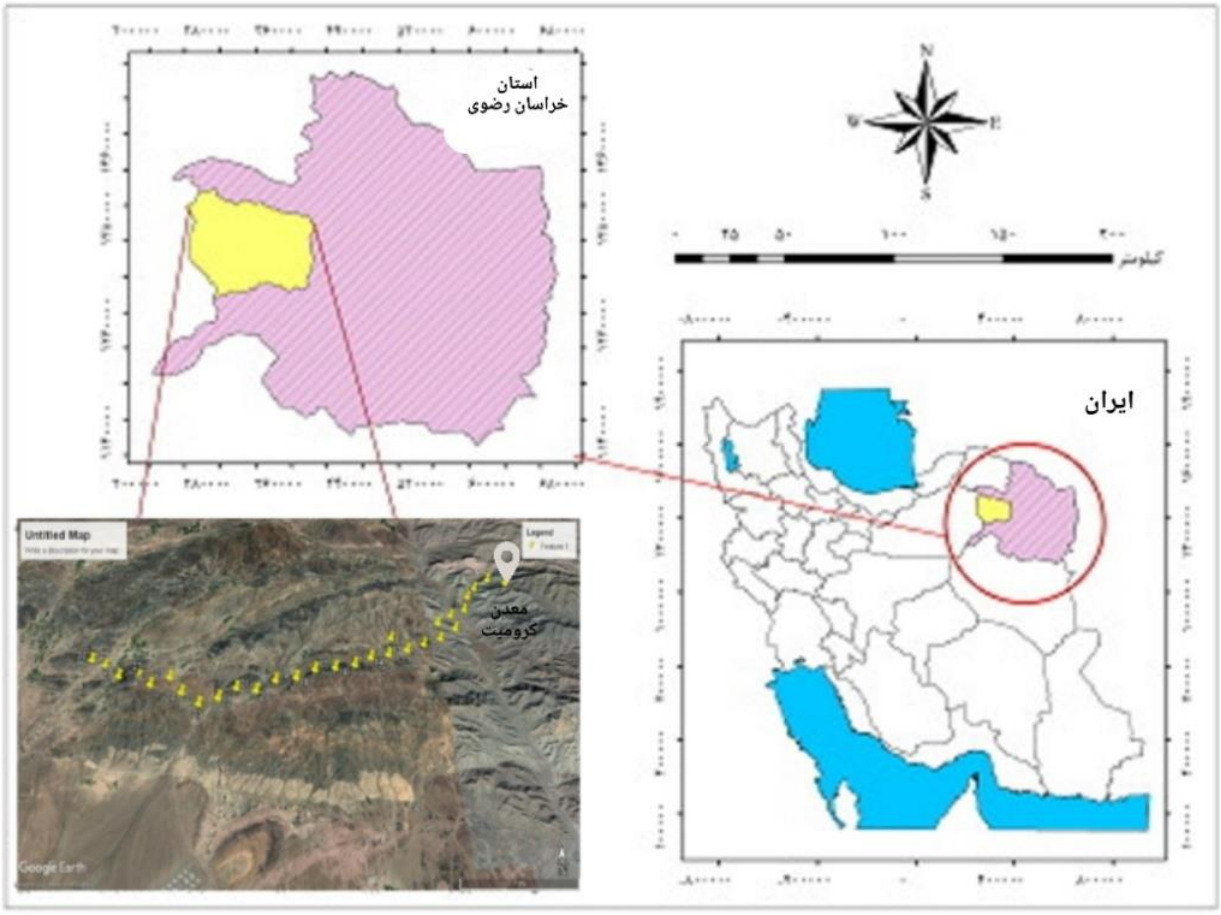
موقعیت جغرافیایی منطقه

معدن کروم در استان خراسان رضوی و در شمال شرق شهرستان سبزوار و غرب استان خراسان رضوی و در فاصله ۱۰ کیلومتری از سبزوار واقع شده است و از نظر جغرافیایی در موقعیت ″36°52′19 عرض شمالی و ″57°40′47 طول شرقی قرار دارد. استخراج این معدن در سال ۱۳۷۴ شروع شده است. در محدوده معدن کروم، جهت باد غالب شرقی–غربی است.

نمونه‌برداری خاک و گیاه

نمونه‌برداری از حوالی معدن کروم سبزوار (شکل ۱) به صورت مرکب از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری با فواصل ۳۵۰ متر و تا فاصله ۱۰ کیلومتر در جهت باد غالب از معدن انجام گرفت. نمونه‌های خاک (۳۰ نمونه) برای بررسی غلظت عناصر کروم، نیکل، کبالت و کروم (VI) پس از انتقال به آزمایشگاه در مجاورت هوا خشک شدند. نمونه‌های هوا–خشک برای اندازه‌گیری‌های بعدی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری غلظت کروم (VI) در خاکدانه‌ها، نمونه‌های هوا–خشک از الک ۴ میلی‌لیتری عبور داده شد. سپس خاکدانه‌های خاک به ۶ بخش ۴ تا ۲، ۲ تا ۱، ۱ تا ۰/۵، ۰/۵ تا ۰/۲۵ و ۰/۲۵ تا ۰/۰۵ و ۰/۰۵> میلی‌متر تفکیک شد. علاوه بر این، ۲۱ نمونه از گیاه مرتعی شال‌دم (*Stipa barbata*) که از گونه‌های غالب منطقه محسوب می‌شود، نیز برداشت شد. این گیاه در منابع فارسی با نام گیس‌پیرزن نیز شناخته می‌شود (Kord et al., 2018). تمامی نمونه‌های خاک و گیاه، پس از خشک‌سازی اولیه، برای انجام آنالیزهای بعدی به آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شدند.

برای تعیین مقدار کربن آلی خاک از روش والکلی و بلک (Walkley and Black, 1934) استفاده شد. برای عصاره‌گیری و تعیین غلظت عناصر کروم، نیکل و کبالت از روش تیزاب سلطانی استفاده شد (Dakiky et al., 2002). در این روش مقدار یک گرم خاک درون بشر ریخته، سپس به نسبت ۱ به ۳ یعنی ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک (HNO_3) و ۷/۵ میلی‌لیتر اسید کلردریک (HCl) به آن افزوده شد و روی هیتر در زیر هود قرار داده شد. این سوسپانسیون به مدت ۴۵ دقیقه در دمای بین ۷۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس گرما داده شد تا محلول شفافی به‌دست آید، سپس نمونه‌ها را کنار گذاشته تا سرد شود و در ادامه محلول مورد نظر از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده و پس از این مرحله نمونه‌ها را درون بالن ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و با آب مقطر به حجم رسانده تا آماده قرائت شود. سپس غلظت این عناصر با دستگاه طیف‌سنج پلاسمای جفت‌شده القایی با نشر نوری (ICP–OES، مدل SPECTRO ARCOS، ساخت شرکت Spectro Analytical Instruments GmbH، آلمان) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد اندازه‌گیری شد. همچنین غلظت کروم (VI) که به عنوان خطرناک‌ترین شکل کروم در محیط‌زیست است، اندازه‌گیری شد. کروم (VI) نه تنها به آسانی توسط گیاهان جذب می‌شود و بر عملکرد و کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد، بلکه به دلیل سرطان‌زایی، جهش‌زایی و سمّیت ژنتیکی، آثار مضری بر انسان و جانوران دارد. بنابراین اندازه‌گیری این عنصر ضروری



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد بررسی و نقاط نمونه‌برداری شده

Fig. 1. Location of the studied area and sampling points.

است، که با استفاده از روش هضم قلیایی غلظت آن اندازه‌گیری شد (James and Bartlett, 1996). در این روش ۲/۵ گرم از نمونه خاک را وزن نموده و به آن ۵۰ میلی‌لیتر از محلول کربنات سدیم ۰/۲۸ مولار و سود ۰/۵ مولار افزوده شد. نمونه‌ها به مدت دو ساعت در دور ۲۵۰ دور در دقیقه شیک شده و سپس به مدت یک ساعت بر روی حمام بخار در دمای ۸۵–۷۵ درجه سلسیوس گرما داده شدند و پس از سرد شدن با سرعت ۹۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردیدند. در نهایت مقدار کروم (VI) در نمونه‌ها با استفاده از معرف دی‌فنیل کربازید (DPC) (۲۰ دقیقه پس از مخلوط‌نمودن ۸ میلی‌لیتر عصاره و ۱ میلی‌لیتر معرف) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV–1800) و در طول موج ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

برای تعیین غلظت عناصر در نمونه‌های گیاهی، ابتدا محلول اسید کلریدریک ۲ نرمال با رقیق‌کردن ۱۶۵/۸ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ تا حجم یک لیتر تهیه شد. سپس ۰/۵ گرم از نمونه گیاهی در کوره، با افزایش تدریجی دما ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس در دو ساعت، به مدت حداقل پنج ساعت خاکستر شد. پس از سرد شدن، کروزه‌ها از کوره خارج شدند و به خاکستر حاصله، ۱۰ میلی‌لیتر محلول اسید کلریدریک ۲ نرمال افزوده شد. سپس کروزه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه روی هیتر با دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا حجم محلول به نصف کاهش یابد. پس از سرد شدن، محتویات کروزه با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شده و در نهایت از کاغذ صافی عبور داده شد (Miyazawa et al., 1984). در نهایت غلظت این عناصر با دستگاه ICP-OES، مدل SPECTRO ARCOS اندازه‌گیری شد.

برای تعیین شدت آلودگی خاک از شاخص‌های زمین‌انباشتگی، فاکتور آلودگی، شاخص غنی‌شدگی و شاخص بار آلودگی و فاکتور تجمع زیستی به شرح زیر استفاده شد.

شاخص زمین‌انباشتگی[1] (I_{geo})

شاخص زمین‌انباشتگی اولین‌بار توسط مولر معرفی شد و روشی متداول برای تخمین شدت آلایندگی خاک نسبت به عناصر با پتانسیل سمّیت است (Muller, 1979). با محاسبه این شاخص به مقایسه غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت در نمونه خاک و غلظت زمینه آن فلز پرداخته می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n) \quad (۱)$$

که در آن I_{geo} شاخص زمین‌انباشتگی، C_n غلظت اندازه‌گیری‌شده فلز و B_n غلظت زمینه یا شاهد فلز است. همچنین برای بررسی میزان تأثیر نوسانات طبیعی، مواد مادری و تغییراتی که در اثر فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود از ضریب ۱/۵ استفاده شده است که بر اساس آن، مقدار شاخص در خاک‌های غیرآلوده برابر با صفر، در خاک‌های غیرآلوده تا کمی‌آلوده بین صفر تا یک، در خاک‌های کمی‌آلوده بین یک تا دو، در خاک‌های کمی‌آلوده تا خیلی‌آلوده بین دو تا سه، در خاک‌های خیلی‌آلوده بین سه تا چهار، در خاک‌های خیلی‌آلوده تا شدیداً آلوده بین چهار تا پنج و در خاک‌های شدیداً آلوده بیشتر از پنج است (Muller, 1979).

شاخص غنی‌شدگی[2] (EF)

از این شاخص به‌منظور ارزیابی غلظت فلز مورد بررسی در نمونه‌ها نسبت به غلظت همان فلز در منطقه غیرآلوده استفاده می‌شود. برای محاسبه‌ی EF می‌بایست مقدار فلز اندازه‌گیری‌شده با فلز مرجع نمونه مانند آهن، تیتانیم، سیلیسیم، آلومینیوم، پتاسیم و استرانسیم که کمتر تحت تأثیر آلودگی انسان قرار می‌گیرد، استفاده شوند (Wei and Yang, 2010)؛ که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EF = (C_n/C_{ref\ sample})/(B_n/C_{ref})_{Background} \quad (۲)$$

که در این معادله EF شاخص غنی‌شدگی، C_n غلظت فلز اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک، C_{ref} غلظت فلز مرجع، B_n غلظت زمینه و C_{ref} غلظت فلز مرجع است. شاخص غنی‌شدگی کمتر از دو در کلاس تهی یا کمی غنی‌شده، بین دو تا پنج در کلاس غنی‌شدگی متوسط، بین پنج تا ۲۰ در کلاس غنی‌شدگی زیاد، بین ۲۰ تا ۴۰ در کلاس غنی‌شدگی شدید و بیشتر از ۴۰ در کلاس غنی‌شدگی بسیار شدید قرار می‌گیرد. در این پژوهش آهن به عنوان فلز مرجع در نظر گرفته شد، زیرا منشأ آن عمدتاً زمین‌زاد بوده و غلظت آن در خاک‌های منطقه نسبتاً یکنواخت است. چون فعالیت‌های معدنی منطقه بیشتر بر استخراج کروم متمرکز است و منابع انسان‌زاد ورود آهن در مقیاس قابل‌توجه وجود ندارد، استفاده از آهن به‌عنوان عنصر مرجع منطقی و هم‌راستا با پژوهش‌های پیشین (Wei and Yang, 2010) است.

شاخص بار آلودگی[3] (PLI)

از این شاخص برای بررسی شدت آلودگی خاک به غلظت همه عناصر در خاک استفاده می‌شود که نشان‌دهندهٔ کیفیت خاک نیز است. این شاخص با تقسیم غلظت هر عنصر در خاک به غلظت آن در نمونه‌ی مرجع (CF) محاسبه می‌شود (رابطه ۳). این شاخص برای مجموعه‌ای از فلزات آلاینده به صورت میانگین هندسی غلظت تمامی فلزات به کمک رابطه زیر به‌دست می‌آید (Bhuiyan et al., 2010):

$$PLI = \sqrt[n]{CF1 \times CF2 \times CF3 \times \dots \dots \dots .CFn} \quad (۳)$$

که در این رابطه، CF1 تا CFn ضرایب آلودگی برای هر فلز، و n تعداد فلزات مورد ارزیابی است.

با توجه به مقادیر استاندارد که توسط Tomlinson et al. (1980) ارائه شده است، چنانچه مقدار PLI به عدد یک نزدیک باشد نمایانگر نزدیک‌بودن غلظت به مقدار زمینه است و چنانچه PLI بیشتر از یک باشد نشان‌دهنده آلودگی منطقه است.

1- Geo-accumulation index
2- Enrichment factor
3- Pollution load index

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک و گیاه منطقه مورد بررسی (n=30)

Table 1. Physical and chemical properties and concentration of heavy metals in soil and plant samples (n=30)

ضریب تغییرات Coefficient of variation	انحراف معیار Standard deviation	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	میانگین Mean	ویژگی‌های خاک Soil properties
35.1	2.54	4.29	13.6	7.2	رس (%) Clay
13.4	9.67	57.2	89. 5	72.4	شن (%) Sand
39.2	8.01	6.26	34.6	20.4	سیلت (%) Silt
2.11	0.161	7.22	7.99	7.50	واکنش pH
18.6	0.134	0.514	1.07	0.722	رسانایی الکتریکی EC ($dS\ m^{-1}$)
77.7	0.729	0.173	3.52	0.941	کربن آلی Organic carbon (%)
135	1.35	148	2464	848	کروم خاک Cr_{Soil} ($mg\ kg^{-1}$)
145	1.45	38.7	609	243	نیکل خاک Ni_{Soil} ($mg\ kg^{-1}$)
213	2.13	10.7	65.7	29.4	کبالت خاک Co_{Soil} ($mg\ kg^{-1}$)
46.0	0.122	0.101	0.500	0.263	کروم (VI) خاک Cr_{Soil} (VI) ($mg\ kg^{-1}$)
281	2.81	3.00	8.50	4.25	کروم گیاه Cr_{Plant} ($mg\ kg^{-1}$)
435	4.35	5.80	12.2	8.00	نیکل گیاه Ni_{Plant} ($mg\ kg^{-1}$)
202	2.02	0.102	0.904	0.432	کبالت گیاه Co_{Plant} ($mg\ kg^{-1}$)

فاکتور تجمع زیستی[۴] (BCF)

کاربرد این شاخص (رابطه ۴) برای ارزیابی انتقال عناصر با پتانسیل سمّیت از خاک به انواع گیاهان زراعی است که C_c و C_s به‌ترتیب غلظت کل فلزات در گیاه و خاک است (Saraswat and Rai, 2009):

$$BCF = \frac{C_C}{C_S} \qquad (۴)$$

تجزیه آماری

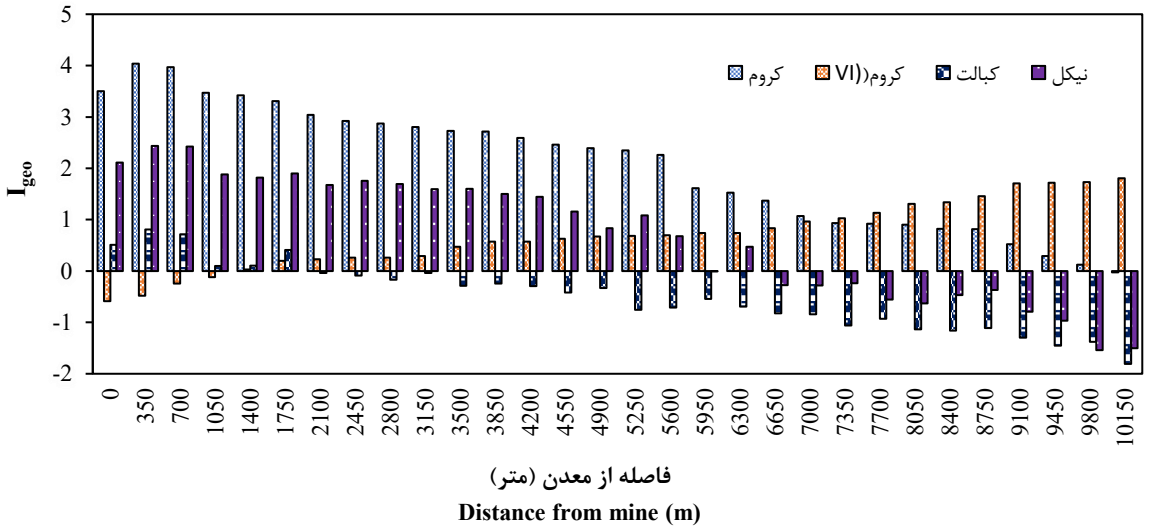
برای افزایش دقت و صحت اندازه‌گیری‌ها، هر نمونه خاک از سه نقطه جمع‌آوری شد. علاوه بر این، برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS استفاده شد. برای بررسی تفاوت میانگین غلظت عناصر در فواصل مختلف از معدن و نیز بین اندازه‌های مختلف خاکدانه‌ها، از تجزیه واریانس (ANOVA) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. کلیه داده‌ها پیش از تحلیل از نظر نرمال‌بودن و همگنی واریانس‌ها بررسی شدند.

نتایج و بحث

با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی میزان عناصر کروم، نیکل، کبالت و کروم (VI) و همچنین آثار زیست‌محیطی آن‌ها بود و از آنجایی که شدت آلودگی به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نیز بستگی دارد، بنابراین در جدول ۱ میانگین و سایر پارامترهای آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک و گیاه ارائه شده است.

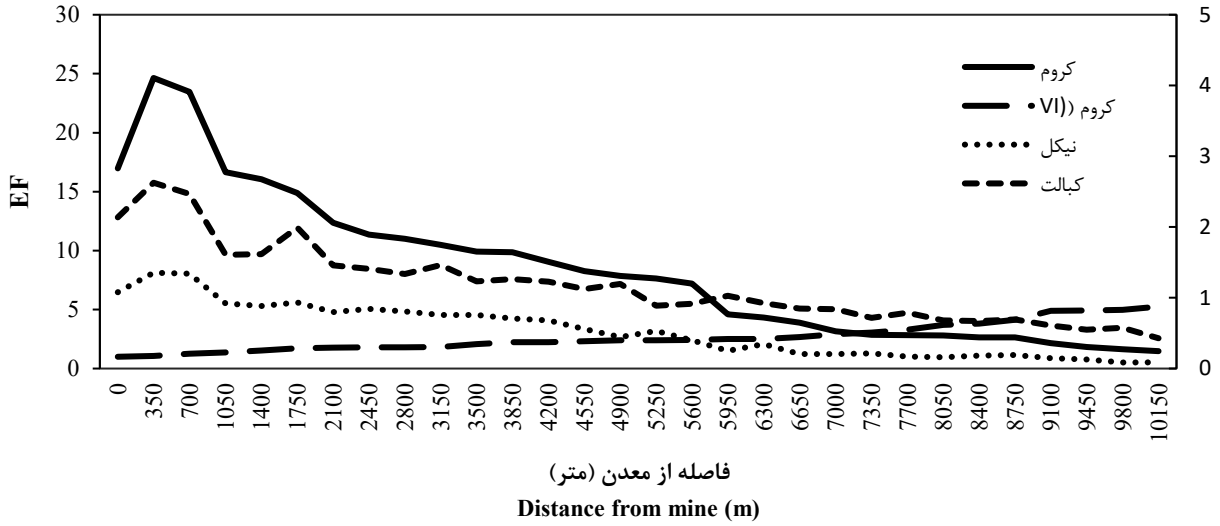
با توجه به نتایج بدست‌آمده (شکل‌های ۲ و ۳) مشاهده می‌شود بیشترین غلظت کروم، نیکل و کبالت تقریباً نزدیک به معدن بوده و کمترین مقدار آن‌ها مربوط به دورترین نقاط از معدن است. بنابراین هر سه عنصر تقریباً روند مشابهی داشته و با فاصله

4- Bioaccumulation factor



شکل ۲. شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) برای سطوح آلودگی در نمونه‌های خاک

Fig. 2. Geo-accumulation index (I_{geo}) for contamination levels in soil samples



شکل ۳. فاکتور غنی‌شدگی (EF) برای سطوح آلودگی در نمونه‌های خاک

Fig. 3. Enrichment factor (EF) for contamination levels in soil samples

از معدن روند کاهشی دیده می‌شود. علاوه بر عنصر کروم، نیکل و کبالت نیز به‌صورت ناخالصی در معدن وجود دارند که فعالیت‌های معدنی سبب انتشار آن‌ها به خاک‌های اطراف معدن شده است. این روند مشابه با نتایج Alizadeh et al. (2024) در معدن مس سونگون است، که در آن غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت در نزدیکی منابع معدنی بیشتر بوده و با افزایش فاصله کاهش یافته است. همچنین با مقایسه میانگین غلظت کل عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک اطراف معدن کرومیت با مقادیر میانگین جهانی (USEPA, 1998) و میانگین پوسته زمین (Bowen, 1979) مشاهده شد غلظت کل کروم (۸۴۸/۳ میلی‌گرم

بر کیلوگرم) بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی و میانگین پوسته زمین (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. برای نیکل نیز میانگین غلظت آن (۲۴۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بسیار بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی و میانگین پوسته زمین (به ترتیب ۴۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده و در مقایسه با استانداردهای ایران در بخش کشاورزی و محیط‌زیست (به‌ترتیب ۱۱۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) دارای آلودگی است. در ادامه با مقایسه میانگین غلظت کل کبالت (۲۹/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نیز مشاهده شد غلظت این عنصر بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی و میانگین پوسته زمین (به‌ترتیب ۸ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده و در مقایسه با استانداردهای ایران کبالت در بخش محیط‌زیست (که ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است) دارای آلودگی است. این نتایج نشان می‌دهد که منطقه مورد بررسی دارای مقادیر زیادی از کروم، نیکل و کبالت است که می‌تواند تهدیدی جدی بر سلامت گیاهان، انسان و همین‌طور محیط‌زیست ایجاد کند.

با توجه به اینکه میانگین pH خاک مورد بررسی ۷/۵ (دامنه ۷/۴ ۷/۸) در طبقه کم قلیایی قرار می‌گیرد، بنابراین تأثیر مثبتی بر تثبیت و انباشت کروم (VI) می‌تواند داشته باشد و در صورت افزایش فعالیت‌های مخرب معدن کروم مورد بررسی می‌تواند باعث آلودگی خاک در لایه ریزوسفر و سلامت انسان و محیط‌زیست گردد. کروم (VI) در حالت خنثی تا قلیایی (pH در دامنه ۶/۵ تا ۱۲)، به شکل شیمیایی CrO_4^{-2} غالب است (Shadreck and Mugadza, 2013).

از بین ویژگی‌های فیزیکی، بافت خاک بر اساس بررسی‌های صورت گرفته تأثیر مستقیمی بر میزان انباشت عناصر با پتانسیل سمّیت نشان می‌دهد. بافت خاک مورد بررسی در این پژوهش لوم شنی است که از ویژگی‌های بارز این خاک‌ها نفوذ و جریان بیشتر آب است، که احتمال دارد باعث تحرک بیشتر عناصر با پتانسیل سمّیت از جمله کروم در این منطقه شود. از سوی دیگر با توجه به بافت درشت خاک منطقه مورد بررسی که از نفوذپذیری مناسبی برخوردار است می‌توان انتقال آلودگی ناشی از کروم به عمق‌های پایین‌تر و آب‌های زیرزمینی را دور از انتظار نداشت. پژوهش‌های مختلفی همبستگی مثبت بین غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت و بافت خاک را نشان داده‌اند. برای نمونه پژوهش‌های مختلفی نشان داده‌اند که خاک‌های درشت‌بافت به‌دلیل نفوذپذیری و شدت جریان بیشتر آب و در نتیجه تحرک و امکان انتقال بیشتر آلودگی خاک ناشی از عناصر سنگین موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی شده‌اند (Rajendran et al., 2022). Salmasi and Pyrowan (2021) آلودگی خاک به عناصر با پتانسیل سمّیت و رابطه این فلزات با ویژگی‌های خاک‌های منطقه‌ی سراسکند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد هر چه بافت خاک درشت‌تر باشد عناصر با پتانسیل سمّیت دارای تحرک بیشتر و غلظت کمتر نسبت به خاک‌های رسی است، زیرا خاک‌های رسی موجب تثبیت بیشتر عناصر سنگین نسبت به خاک‌های شنی می‌شوند.

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که میانگین مقدار کربن آلی در خاک‌های مورد بررسی برابر ۰/۹۴ درصد است و در زمره خاک‌های بسیار فقیر از نظر مواد آلی قرار می‌گیرند. سمّیت کروم می‌تواند با احیاءشدن کروم (VI) به کروم (III) و در نتیجه افزایش مقدار جذب آن در خاک کاهش یابد (Ao et al., 2022). در این ارتباط مواد آلی بـه عنوان ترکیبات الکترون‌دهنده می‌توانند نقش مؤثری در احیاء کروم (VI) ظرفیتی داشته باشند. به عنوان نمونه Yang et al. (2021) نشان دادند که روند تبـدیل کروم (VI) به کروم (III) با افزایش مواد آلی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه کروم (VI) دارای سمّیت بسیار زیادی است (در مقایسه با کروم (III) که خطرناک نیست) و همچنین میزان بسیار کم مواد آلی در خاک‌های مورد بررسی احتمال زیادبودن درجه سمّیت در این منطقه وجود دارد.

نتایج پژوهش Joghatayi et al. (2021) نشان داد عناصر کروم، نیکل و کبالت نسبت به میانگین پوسته زمین و مقیاس جهانی غلظت زیادی دارند. همچنین میزان این عناصر با دورشدن از سنگ‌های افیولیتی در منطقه رو به کاهش است، به طوری‌که میزان غلظت کل عنصر کروم در نزدیکی سنگ‌های اولترامافیک و معدن کرومیت بیش از ۱ درصد بود که با یافته‌های این پژوهش

نیز همخوانی دارد. نتایج این پژوهش با یافته‌های (Alizadeh et al. 2024) همخوانی دارد. آن‌ها در مناطق معدنی مرکزی و شمال‌غرب ایران نیز تجمع زیاد عناصر فلزی را در خاک‌های اطراف معادن گزارش کرده‌اند.

میانگین، بیشینه و کمینه غلظت کروم (VI) در ۳۰ نمونه خاک مورد بررسی به‌ترتیب برابر ۰/۲۶، ۰/۵۰ و ۰/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۱). بر اساس استاندارد کشور ایران حد مجاز سازمان محیط زیست ۰/۴ است. با توجه به این استاندارد، غلظت کروم (VI) در برخی از نقاط (۳۵ درصد نقاط که عمدتاً در فاصله بین ۲ تا ۸ کیلومتری از معدن) بیشتر از این حد مجاز است. با وجود غلظت زیادتر کروم کل در نزدیکی معدن، میزان کروم (VI) کمتر است که احتمالاً ممکن است ناشی از شرایط احیاء در این نواحی باشد. در مقابل، در فاصله ۲ تا ۸ کیلومتری، احتمالاً به‌دلیل شرایط قلیایی‌تر و اکسایش، بخشی از کروم سه‌ظرفیتی به کروم شش‌ظرفیتی تبدیل شده و غلظت کروم (VI) افزایش یافته است. بر این اساس در نقاطی که آلودگی از حد مجاز فراتر شد، میزان آلودگی در خاکدانه‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

رابطه بین غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک و گیاه منطقه

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۱ و با در نظر گرفتن الگوی مکانی نمونه‌برداری (از نزدیکی معدن تا دورترین ایستگاه‌ها)، مشاهده شد که مقادیر میانگین کروم، نیکل و کبالت در گیاهان مشابه مقادیر خاک، بیشترین غلظت را در نزدیکی معدن نشان دادند و کمترین مقدار آن‌ها در دورترین نقاط از معدن مشاهده شد. این موضوع بیان‌گر آن است که هر سه عنصر روندی مشابه داشته و با افزایش فاصله از معدن، غلظت این عناصر در خاک و گیاه به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. بنابراین، تغییرات غلظت کل این عناصر در خاک و گیاه از یک الگوی یکسان تبعیت می‌کند؛ به عبارت دیگر، افزایش غلظت عناصر در خاک منجر به افزایش غلظت آن‌ها در گیاه نیز شده است. این همبستگی نشان‌دهنده تأثیر مستقیم آلودگی خاک بر میزان جذب و تجمع عناصر با پتانسیل سمّیت در گیاهان منطقه است. نتایج مشابهی در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است؛ به‌عنوان نمونه، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که گیاهان مرتعی در مناطق معدنی به‌طور قابل‌توجهی عناصر با پتانسیل سمّیت را از خاک آلوده جذب کرده و غلظت آن‌ها در اندام‌های گیاهی با افزایش غلظت خاک همبستگی مستقیم دارد (Akbar et al., 2024).

شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo})

مقادیر محاسبه‌شده شاخص زمین‌انباشتگی عناصر با پتانسیل سمّیت برای ۳۰ نمونه در شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج، شاخص زمین‌انباشتگی برای کروم بین ۰/۰۲ تا ۴/۰۴ متغیر بود. میانگین شاخص زمین‌انباشتگی برای کروم ۲/۰۶ به‌دست آمد، که نشان داد خاک نسبتاً آلوده بود، به‌طوری که میزان آلودگی آن با دورشدن از نواحی افیولیتی و معدن کرومیت کاهش یافت. زیادبودن شاخص زمین‌انباشتگی عنصر کروم نشان‌دهنده تاثیر به‌سزای سنگ‌های اولترامافیک در منطقه است. این مقادیر برای نیکل بین ۲/۴۴ و ۱/۵۴- با میانگین ۰/۶۸ متغیر بود که نشان داد در کلاس یک (غیرآلوده تا آلودگی کم) قرار می‌گیرد. مقادیر این شاخص برای کبالت نیز از ۱/۸۱- تا ۰/۸۱ با میانگین ۰/۵۰- متغیر بود که نشان‌دهنده‌ی بدون آلودگی است. اما روند این سه فلز مشابه هم بوده و در نزدیکی معدن بیشترین مقدار را داشتند و هرچه از معدن فاصله گرفته شد روند کاهشی مشاهده شد. بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت محتمل‌ترین منبع افزودن این فلزات به خاک طبیعی فعالیت‌های معدنی است. با توجه به شکل ۲ نیز می‌توان گفت که تجمع کروم زیاد است؛ که نشان‌دهنده وجود سهم قابل‌توجهی از منابع انسانی است. اما عناصر نیکل و کبالت آلودگی چندانی نداشته‌اند و دارای غلظت پس زمینه هستند که ناشی از ناخالصی در معدن کرومیت سبزوار است.

همچنین بر اساس این شاخص برای کروم (VI)، ۴ نمونه در کلاس غیرآلوده، ۱۶ نمونه در کلاس غیرآلوده تا کمی آلوده و ۱۰ نمونه در کلاس کمی‌آلوده قرار گرفته‌اند (شکل ۲) و همین طور روند آن عکس روند کروم، نیکل و کبالت است. این تفاوت رفتاری را می‌توان به اختلاف در شکل و رفتار ژئوشیمیایی کروم

(VI) نسبت داد. کروم (VI) معمولاً به‌صورت گونه‌های آنیونی (CrO_4^{-2} و $Cr_2O_7^{-2}$) در خاک وجود دارد و در شرایط احیاء یا در حضور مواد آلی به کروم سه‌ظرفیتی (III) کاهش می‌یابد، در حالی‌که کروم، نیکل و کبالت به‌شکل کاتیونی در خاک حضور دارند و تمایل بیشتری به جذب سطحی نشان می‌دهند. در نتیجه، تغییرات غلظت و شاخص زمین‌انباشتگی کروم (VI) در مقایسه با کروم، نیکل و کبالت روندی معکوس دارد (Zulfiqar et al., 2022). میانگین، کمینه و بیشینه شاخص زمین‌انباشتگی در منطقه مورد بررسی به‌ترتیب برابر ۰/۶۹، ۰/۵۸- و ۱/۸۱ میلی‌گرم در کیلوگرم هستند؛ که نشان می‌دهد، در کلاس یک (غیرآلوده تا کمی‌آلوده) قرار دارد. Mazhari (2017) به بررسی خاک‌های رویین منطقه شمال سبزوار پرداخت که یافته‌های آن منجر به شناسایی با درصد آلودگی‌های کم زیست‌محیطی عناصر کروم، نیکل، و کبالت با منشاء زمین‌زاد گردید. مشابه با پژوهش حاضر نتایج آن‌ها حاکی از زمین‌زادبودن آلودگی کروم است.

شاخص غنی‌شدگی (EF)

نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی شاخص غنی‌شدگی (شکل ۳) نشان داد که هر چه میزان شاخص غنی‌شدگی بیشتر باشد بدین مفهوم است که سهم عامل انسانی در افزایش آلودگی خاک منطقه بیشتر است. مقدار این شاخص برای کروم، نیکل و کبالت با نزدیک‌شدن به معدن، روند افزایشی دارد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار شاخص غنی‌شدگی مربوط به عنصر کروم برابر ۸/۴۸ به‌دست آمد. بنابراین بر اساس طبقه‌بندی جهانی (Tomlinson et al., 1980) در همه ایستگاه‌ها، درجه آلودگی کروم قابل‌توجه است، پس از آن نیکل با شاخص غنی‌شدگی ۳/۲۳ و درجه آلودگی متوسط، کروم (VI) با شاخص غنی‌شدگی ۲/۷۴ و درجه آلودگی متوسط و در نهایت کبالت با EF برابر ۱/۱۸ و درجه آلودگی کم قرار دارند. به عبارت دیگر ترتیب میزان غنی‌شدگی به‌صورت Cr > Ni > Cr(VI) > Co است. بر اساس نظر Hernandez et al. (2023)، مقادیر شاخص غنی‌شدگی بین ۰/۵ تا ۲، بیان‌گر آلودگی زمین‌زاد و مقادیر بیش از ۲، نشان‌دهنده آلودگی ناشی از فعالیت انسان‌زاد است. نتایج پژوهش حاضر تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلودگی خاک‌های اطراف معدن کروم سبزوار را نشان می‌دهد. استخراج منابع و فعالیت‌های معدنی ممکن است منجر به جابجایی، انتشار و تجمع عناصر با پتانسیل سمّیت در اطراف معدن شود و توزیع ژئوشیمیایی عناصر با پتانسیل سمّیت را بیش از منابع سنگ‌زایی تغییر دهد. بنابراین معدن‌کاوی زمینه را برای تخریب و کاهش کیفیت خاک که در نهایت باعث پدیده بیابان‌زایی می‌شود، فراهم می‌آورد.

شاخص بار آلودگی (PLI)

نتایج نشان داد مقدار شاخص بار آلودگی در خاک‌های اطراف معدن کروم سبزوار برابر ۱/۸۸ میلی‌گرم در کیلوگرم است؛ که نشان‌دهنده شاخص بار آلودگی در حد آلوده و دلیل وجود عناصر با پتانسیل سمّیت به مقدار زیاد در این منطقه به علت وجود معدن است. آلودگی خاک‌های اطراف معدن کروم سبزوار می‌تواند به دلیل قرار گرفتن این خاک‌ها در مسیر معدن و در راستای شیب در جهت باد غالب باشد. Khosravi et al. (2018) نشان دادند که آب، خاک و هوا در مجاور فعالیت‌های صنعتی و معدنی بسیار آلوده هستند؛ بنابراین فعالیت‌های صنعتی و معدنی بر سلامت ساکنان مناطق پیرامون از راه هوا، آب و خاک تأثیر منفی می‌گذارد و محیط‌زیست و سلامت انسان، گیاه و جانداران را به خطر می‌اندازد.

فاکتور تجمع زیستی (BCF)

نتایج فاکتور تجمع زیستی برای عناصر کبالت، کروم و نیکل در گیاه مرتعی شالدم به‌ترتیب برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۷ و ۰/۱۲ بود. از آنجا که تمامی این مقادیر کمتر از یک هستند، می‌توان نتیجه گرفت که گیاه شالدم توانایی بسیار کمی در انتقال و تجمع این عناصر با پتانسیل سمّیت از خاک به اندام‌های خود دارد. در واقع، این گیاه بیشتر نقش یک گونه مقاوم را ایفا می‌کند که با وجود حضور عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک، از تجمع بیش از حد

جدول ۲. برخی از پارامترهای آماری غلظت کروم (VI) در کلاس‌های مختلف اندازه خاکدانه‌ها و ذرات خاک

Table 2. Some statistical parameters of Cr (VI) in different size classes of soil particles and aggregates

اندازه Size (mm)	میانگین Mean ($mg\ kg^{-1}$)	بیشینه Maximum ($mg\ kg^{-1}$)	کمینه Minimum ($mg\ kg^{-1}$)	انحراف معیار Standard deviation, SD ($mg\ kg^{-1}$)	ضریب تغییرات Coefficient of variation, CV (%)
2–4	0.23	0.41	0.19	0.07	29.8
1–2	0.29	0.68	0.17	0.15	51.0
0.5–1	0.30	0.54	0.23	0.11	37.7
0.25–0.5	0.29	0.43	0.22	0.06	21.8
0.05–0.25	0.36	0.64	0.26	0.13	35.3
< 0.05	0.42	0.98	0.20	0.23	56.2

آن‌ها در بافت‌های خود جلوگیری می‌نماید. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، بیشترین میزان جذب نسبی مربوط به نیکل (۰/۱۲) و کمترین مقدار آن مربوط به کبالت (۰/۰۲) است. این موضوع نشان می‌دهد که گیاه شال‌دم نسبت به نیکل حساسیت بیشتری در جذب دارد، در حالی که جذب کبالت در آن بسیار محدود است. با این حال، باید توجه داشت که این تفاوت تنها ناشی از ویژگی‌های گیاه نبوده و غلظت اولیه و فراهمی بیشتر نیکل در خاک نیز بر میزان جذب آن موثر است. به‌طور کلی، مقادیر کم فاکتور تجمع زیستی در این پژوهش بیان‌گر آن است که شال‌دم نمی‌تواند به‌عنوان یک گیاه انباشتگر[5] برای این عناصر در نظر گرفته شود، بلکه بیشتر به‌عنوان یک گونه شاخص زیستی برای پایش سطح آلودگی خاک‌های اطراف معدن کاربرد دارد. این موضوع با نتایج همبستگی بین غلظت عناصر در خاک و گیاه نیز هم‌خوانی دارد؛ زیرا بین مقادیر خاک و گیاه برای کروم، نیکل و کبالت رابطهٔ مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد مشاهده شد. این یافته نشان می‌دهد که گیاه تا حدودی رفتار شاخص زیستی دارد (Saraswat and Rai, 2009).

همچنین غلظت کروم (VI) در خاکدانه‌ها و بخش‌های مختلف اندازه خاکدانه با اندازه (۴ تا ۲، ۲ تا ۱، ۱ تا ۰/۵، ۰/۵ تا ۰/۲۵ و ۰/۲۵ تا ۰/۰۵ و ۰/۰۵> میلی‌متر) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. مقایسه غلظت کروم (VI) در بخش‌های مختلف اندازه خاکدانه نشان داد که بیشترین و کمترین غلظت کروم (VI) در خاکدانه‌های با قطر ۰/۰۵> و ۴ تا ۲ میلی‌متر به میزان به‌ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۲۳ مشاهده شد. با کاهش اندازه خاکدانه‌ها، غلظت کروم (VI) نیز روند تقریباً افزایشی داشت، به طوری که غلظت کروم (VI) در خاکدانه‌های با قطر ۴ تا ۲ میلی‌متر نسبت به ذرات با قطر ۰/۰۵> میلی‌متر (رس و سیلت) ۴۵ درصد کاهش یافت. همچنین خاکدانه‌های با قطر ۲ تا ۱، ۱ تا ۰/۵، ۰/۵ تا ۰/۲۵ و ۰/۲۵ تا ۰/۰۵ میلی‌متر به‌ترتیب به میزان ۳۱، ۲۸/۵، ۳۱ و ۱۴ درصد نسبت به خاکدانه‌های با قطر ۰/۰۵> میلی‌متر کاهش پیدا کرد.

نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش قطر خاکدانه‌ها، غلظت کروم (VI) افزایش پیدا کرد. این افزایش می‌تواند ناشی از ویژگی‌های سطحی و فیزیکی خاکدانه‌های ریز باشد؛ به‌گونه‌ای که لبه‌های شکسته‌شده ذرات رس در سطح خاک‌های ریز، ظرفیت بالاتری برای جذب سطحی آنیون‌ها (مانند CrO_4^{-2}) دارند. با توجه به اینکه کروم (VI) عمدتاً به‌صورت آنیونی است، افزایش گنجایش تبادل آنیونی در خاکدانه‌های ریزتر، عامل مؤثر در جذب بیشتر آن است (John, 2022). Saha and Coumar (2022) نشان دادند که با کاهش قطر خاکدانه‌ها (در خاک رسی)

5- Hyperaccumulator

غلظت عناصر سنگین افزایش می‌یابد. Duan et al. (2015) به بررسی توزیع غلظت عناصر سنگین در خاک‌های ۶۲ نقطه مختلف و از سطح تا عمق ۲۰ سانتی‌متری در منطقه جنوب غربی چین پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد غلظت عناصر سنگین در خاک‌های ریزبافت بیشتر از خاک‌های درشت‌بافت بود. Angelaki et al. (2022) با بررسی خاک‌های شنی، سیلتی و رسی در شهر آگرا (هند) نشان دادند که آلودگی آب‌های زیرزمینی در خاک‌های شنی به‌دلیل نفوذپذیری زیاد شدت بیشتری دارد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از عناصر سنگین در ذرات ریز و خاکدانه‌های کوچک‌تر تجمع می‌یابند، می‌توان نتیجه گرفت که این ذرات در اثر فرسایش بادی و انتقال ذرات معلق، می‌توانند به‌عنوان حامل‌های اصلی آلودگی عمل کرده و فلزات سنگین را به مناطق اطراف معدن منتقل نمایند. بنابراین بررسی توزیع غلظت فلزات در اندازه‌های مختلف ذرات نه‌تنها از نظر درک رفتار عناصر در خاک مهم است، بلکه از دیدگاه انتشار و گسترش آلودگی در محیط نیز اهمیت ویژه‌ای دارد.

نتیجه‌گیری

خاک یک منبع اصلی برای آلاینده‌ها است زیرا توانایی پیوند با مواد شیمیایی و انواع محیط‌ها برای انتقال اشکال مختلف آلاینده‌ها در اتمسفر، هیدروسفر و زیست‌توده گیاهان را دارد. بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش بیان‌گر آن است که در منطقه مورد بررسی، به‌دلیل فعالیت‌های معدنی چندین ساله، مقادیر شاخص‌های زمین‌انباشتگی، غنی‌شدگی و بار آلودگی از مقادیر زمینه‌ای فراتر رفته‌اند. این شاخص‌ها بیان‌گر آن است که فعالیت‌های انسانی مرتبط با استخراج کرومیت، موجب افزایش غلظت عناصر با پتانسیل سمّیت در خاک شده و منطقه در وضعیت آلودگی متوسط قرار دارد. بنابراین، با تداوم فعالیت‌های معدنی، احتمال افزایش آلودگی در سال‌های آینده وجود دارد. یافته‌ها همچنین حاکی از آن است که در این منطقه، غلظت کل کروم، نیکل و کبالت بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی و میانگین پوسته زمین است؛ همچنین در برخی نقاط غلظت کروم (VI) بیشتر از حد مجاز سازمان محیط‌زیست ایران است. در ادامه بر اساس شاخص زمین‌انباشتگی کروم، در کلاس آلودگی متوسط قرار گرفت و بر اساس شاخص غنی‌شدگی به صورت $Cr > Ni > Cr(VI) > Co$ است. با ارزیابی فاکتور بار آلودگی، خاک‌های این منطقه در کلاس آلوده قرار گرفت که نشان می‌دهد فعالیت‌های انسانی بیشترین تأثیر را در آلودگی این منطقه داشته است. با تداوم فعالیت‌های معدنی ممکن است در آینده، غلظت کروم و شدت آلایندگی آن بیشتر شود. همچنین ورود عناصر مورد بررسی به زنجیره غذایی از راه خاک ممکن است بر سلامت انسان تأثیر بگذارد. از سوی دیگر، بررسی فاکتور تجمع زیستی در گیاه شال‌دم نشان داد که مقادیر آن برای کبالت (۰/۰۲)، کروم (۰/۰۷) و نیکل (۰/۱۲) کمتر از یک است. این نتایج بیان‌گر جذب اندک عناصر با پتانسیل سمّیت از خاک توسط این گونه است. بنابراین، گیاه شال‌دم (*Stipa barbata*) می‌تواند به‌عنوان گیاهی با تحمل نسبی زیاد نسبت به آلودگی عناصر با پتانسیل سمّیت در نظر گرفته شود، نه به‌عنوان گونه‌ای انباشت‌کننده و قابلیت آن در پایش زیستی سطح آلودگی خاک‌های اطراف معدن در پژوهش‌های آینده و گسترده‌تر قابل بررسی خواهد بود. بنابراین اگر چه خاک‌های اطراف معدن از آلودگی متوسطی برخوردارند اما به‌دلیل معدن‌کاوی‌های پیوسته ممکن است در سال‌های آینده به یک نگرانی بزرگ تبدیل شود. از این رو پایش غلظت عناصر در این منطقه، به همراه در نظر گرفتن نقش گیاهان به عنوان شاخص‌های زیستی، می‌تواند در مدیریت و کنترل آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنی مؤثر باشد. علاوه بر این، نتایج حاصل از بررسی غلظت عناصر در بخش‌های مختلف اندازه خاکدانه‌ها نشان داد که خاکدانه‌های ریزتر دارای مقادیر بیشتری از عناصر با پتانسیل سمّیت هستند. با توجه به قابلیت جابجایی بیشتر این خاکدانه‌ها توسط باد، احتمال انتقال آلودگی به مناطق دورتر از معدن وجود دارد. این موضوع با نتایج نمونه‌برداری در فواصل مختلف (۳۵۰ متر تا ۱۰ کیلومتر) از معدن کرومیت نیز همخوانی دارد و نشان می‌دهد که خاکدانه‌های ریزتر می‌توانند در گسترش مکانی آلودگی نقش مؤثری ایفا کنند. به‌منظور جلوگیری

از افزایش غلظت آن، لازم است راهکارهایی برای جلوگیری یا کاهش ورودی عناصر با پتانسیل سمّیت توسط فعالیت‌های معدنی طراحی شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های گسترده‌تری در جهت‌های مختلف موقعیت معدن مذکور در منطقه انجام شود.

تشکر و سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد از محل طرح پژوهشی با کد 3/56526 انجام شده است. بدینوسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل همکاری و حمایت مادی و معنوی تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اصالت محتوای مقاله را اعلام می‌نماید و همچنین اعلام می‌دارند که این اثر با هیچ شخص یا موسسه‌ای تعارض منافع ندارد.

منابع مورداستفاده

References

1. Abbaszadeh, F., Jalali, V.R., Jafari, A., 2018. Investigating the source of some heavy metals using cluster and factor analysis techniques in soils of Hormoz Island. Appl. Soil Res. 6(1), 13–24. (In Persian with English abstract)
2. Afshar-Harb, A., 1994. Geology of Kopet Dagh (Report No. 72). Geological Survey of Iran, Tehran. (In Persian)
3. Alizadeh, A., Ghorbani, J., Motamedi, J., Vahabzadeh, G., van der Ent, A., Edraki, M., 2024. Soil contamination around porphyry copper mines: an example from a semi-arid climate. Environ. Monit. Assess. 196(2), 204.
4. Angelaki, A., Dionysidis, A., Sihag, P., Golia, E.E., 2022. Assessment of contamination management caused by copper and zinc cations leaching and their impact on the hydraulic properties of a sandy and a loamy clay soil. Land. 11(2), 290. https://doi.org/10.3390/land11020290.
5. Akbar, W.A., Rahim, H.U., Irfan, M., Sehrish, A.K., Mudassir, M., 2024. Assessment of heavy metal distribution and bioaccumulation in soil and plants near coal mining areas: Implications for environmental pollution and health risks. Environ. Monit. Assess. 196(1), 97.
6. Banerjee, S., Ghosh, S., Jha, S., Kumar, S., Mondal, G., Sarkar, D., Bhattacharyya, P., 2023. Assessing pollution and health risks from chromite mine tailings contaminated soils in India by employing synergistic statistical approaches. Sci. Total Environ. 880, 163228.
7. Bhuiyan, M.A., Parvez, L., Islam, M.A., Dampare, S.B., Suzuki, S., 2010. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. J. Hazard. Mater. 173(1-3), 384–392.
8. Bowen, H.J.M., 1979. Environmental Chemistry of the Elements: Academic Press.
9. Ao, M., Chen, X., Deng, T., Sun, S., Tang, Y., Morel, J.L., Wang, S., 2022. Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: A critical review. J. Hazard. Mater. 424, 127233.
10. Dakiky, M., Khamis, M., Manassra, A., Mer'Eb, M., 2002. Selective adsorption of chromium (VI) in industrial wastewater using low-cost abundantly available adsorbents. Advan. Environ. Res. 6(4), 533–540.
11. Das, S., Patnaik, S.C., Sahu, H.K., Chakraborty, A., Sudarshan, M., Thatoi, H.N., 2013. Heavy metal contamination, physico-chemical and microbial evaluation of water samples collected from chromite mine environment of Sukinda, India. Trans. Nonfe. Met. Soc. China. 23(2), 484–493. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62489-9.
12. Dhal, B., Das, N.N., Thatoi, H.N., Pandey, B.D., 2013. Characterizing toxic Cr(VI) contamination in chromite mine overburden dump and its bacterial remediation. J. Hazard. Mater. 260, 141–149. https://doi.rg/10.1016/j.jhazmat.2013.04.050.
13. Dietz, A., Todo, T., Ramroth, H., Urban, T., Ahrens, W., Becher, H., 2004. Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: results of a population based case-control study. Intern. J. Canc. 108, 907–911. https://doi.org/10.1002/ijc.11658.
14. Duan, X., Zhang, G., Rong, L., Fang, H., He, D., Feng, D., 2015. Spatial distribution and environmental factors of catchment-scale soil heavy metal contamination in the dry-hot vally of Upper Red in southwestern China. Catena. 135, 59–69. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.006.
15. Farkaš, J., Chrastný, V., Novák, M., Čadkova, E., Pašava, J., Chakrabarti, R., ... & Bullen, T. D. (2013). Chromium isotope variations (δ53/52Cr) in mantle-derived sources and their weathering products: Implications for environmental studies and the evolution of δ53/52Cr in the Earth's mantle over geologic time. Geochimica et Cosmochimica Acta, 123, 74–92. https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.08.016.
16. Hamilton, E.M., Lark, R.M., Young, S.D., Bailey, E.H., Sakala, G.M., Maseka, K.K., Watts, M.J., 2020.

Reconnaissance sampling and determination of hexavalent chromium in potentially-contaminated agricultural soils in Copperbelt Province, Zambia. Chemos. 247, 125984. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125984.
17. Hernandez, L., A. Probst, J.L., Probst, Ulrich E., 2003. Heavy metal distribution in some French forest soil: evidence for atmospheric contamination, Sci. Total Environ. 312, 195–219. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00223-7.
18. James. B.R., Bartlet R.J., 1996. Handbook of soil analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 25, 685–701.
19. Joghatayi, H., Dabiri, R., Moslempour, M.E., 2021. Spatial distribution and pollution assessment of Cr, Ni and Co in Joghatay ophiolitic region soils (NW Sabzevar), by statistical analysis and sequential extraction. J. Environ. Sci. Tech. 23(8), 19–35. https://doi.org/10.30495/JEST.2021.9133. (In Persian with English abstract)
20. John, R.V., 2022. Study of interaction of loamy soil with salts of heavy metals in assessment of groundwater contamination. Intern. J. Res. Appl. Sci. Biotech. 9(2), 316–321. https://doi.org/10.31033/ijrasb.9.2.28.
21. Khosravi, Y., Ali, A., Abadol Hossein, P., 2018. Assessment of spatial distribution pattern of heavy metals surrounding a lead and zinc production plant in Zanjan Province, Iran, Geoder. Reg. 12, 10–17. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.12.002.
22. Kong, Z., Wu, Z., Glick, B.R., He, S., Huang, C., Wu, L., 2019. Co-occurrence patterns of microbial communities affected by inoculants of plant growth-promoting bacteria during phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. Ecotox. Environ. Saf. 183, 109504. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109504.
23. Kord, B., Safikhani, F., Khademi, A., Pourabbasi, S., 2018. Investigating the role of rangeland plants in remediation of contaminated soils to lead and zinc from around Ahangaran lead and zinc mine in Malayer. J. Range Des. Res. 25(1), 78–88. https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.116228. (In Persian with English abstract)
24. Mazhari A. (2017). The investigation of surface soil geochemistry and mineralogical role in the heavy metal bioavailability of Sabzevar area. Iran. J. Crystallog. Mineral. 25(2), 279–294. (In Persian with English abstract).
25. Mirzabayati, F., Hamidian, A.H., 2025. Heavy metal pollution in Iranian medicinal plants, a review of sources, distribution, and health implications. J. Appl. Res. Med. Arom.c Plants, 100637. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2025.100637.
26. Miyazawa, M., Pavan, M.A., Block, M.F.M., 1984. Determination of Ca, Mg, K, Mn, Cu, Zn, Fe, and P in coffee, soybean, corn, sunflower, and pasture grass leaf tissues by a HCl extraction method. Comm. Soil Sci. Plant Analy. 15(2), 141–147.
27. Muller, G.M., 1979. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. Geo. J. 2, 108–118.
28. Poorakbar, L., Ebrahimnezhad, N., 2011. Growth and physiological responses of Zea mays L. to Cu and Ni stress. Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi).103, 147–159
29. Rajendran, S., Priya, T.A.K., Khoo, K.S., Hoang, T.K., Ng, H.S., Munawaroh, H.S.H., Show, P.L., 2022. A critical review on various remediation approaches for heavy metal contaminants removal from contaminated soils. Chemosphere 287, 132369. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132369.
30. Saha, J.K., Coumar, M.V., 2022. Alteration of contamination threat due to dilution effect on metal concentration in maize–wheat biomass on sludge amended clayey soil. Environ. Monit. Assess. 194(4), 1–17.
31. Salmasi, R., Pyrowan, H., 2021. Soil pollution to some heavy metals and their relation with soil properties in Sareskand, East Azarbayjan. J. Environ. Sci. Tech. 23(4), 97–106. https://doi.org/10.30495/JEST.2021.18387.
32. Saraswat, S., Rai, J.P.N., 2009. Phytoextraction potential of six plant species grown in multimetal contaminated soil. Chem. Ecol. 25(1), 1–11. https://doi.org/10.1080/02757540802657185.
33. Shadreck, M., Mugadza, T., 2013. Chromium, an essential nutrient and pollutant: A review. Afr. J. Pure Appl. Chem. 7(9), 310–317. https://doi.org/10.5897/AJPAC2013. 0517.
34. Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffrey, D.W., 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. Helgolan. Meer. 33, 566–575. https://doi.org/10.1007/BF02414780.
35. United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1998. Toxicological Review of Hexavalent Chromium. CASNR, 18540-29-9, Washington, DC, USA.
36. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37(1), 29–38.
37. Wei, B., Yang, L., 2010. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. Microchem. J., 94(2), 99–107. https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014.
38. Yang, Z., Zhang, X., Jiang, Z., Li, Q., Huang, P., Zheng, C., Liao, Q., Yang, W., 2021. Reductive materials for remediation of hexavalent chromium contaminated soil- A review. Sci. Total Environ. 773, 145654. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145654.
39. Zulfiqar, U., Haider, F.U., Ahmad, M., Hussain, S., Maqsood, M.F., Ishfaq, M., Eldin, S.M., 2023. Chromium toxicity, speciation, and remediation strategies in soil-plant interface: A critical review. Front. Plant Sci. 13, 1081624. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1081624.