Effect of mining practices on chromium, nickel and cobalt in margins soils and plant (Stipa barbata) of chromite mine in Sabzever

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

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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

Abstract

Introduction: Human activity especially mining practices have led to increase the concentration of heavy metals in soils. The aim of this research was to determine the concentration of total Cr, Ni and Co and Cr (VI) and to evaluate pollution risk in margin soils and *Stipa barbata* plant and distribution of Cr (VI) at different size of aggregates of chromite mine of Sabzevar.

Materials and methods: 30 soil samples (0-15cm 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. Also, the amount of chromium (VI) was determined in six aggregate size classes (2-4, 1-2, 0.5-1, 0.5-25, 0.05-25 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 fine particles, and the highest and lowest concentrations were found in particles with diameters >0.05 and 2-4 mm. 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. Also, the pollution load factor indicated the polluted class. In addition, the bioaccumulation factor of the studied elements in the plant (*Stipa barbata*) was less than one for cobalt, chromium and nickel.

Conclusion: The capability of *Stipa barbata* 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.

How to Cite: Shirmardi, M., Hayatzadeh, M., Ghaneei-Bafghi, M.J., Hemmat, N., Fooladi Doghzloo, M., 2025. Soil fertility assessment in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivated fields (case study: Bahabad city, Yazd province). J. Soil Plant Interact. 16(4), 1–17 (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.20981

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

تاثیر فعالیت‌های معدنی بر کروم، نیکل و کبالت در خاکها و گیاه مقاوم 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

نسخه پیش از انتشار اصلاح شده

چکیده

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

مواد و روشها: 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 و غلظت عناصر موردبررسی 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 خاکدانه‌ها مختلف نشان داد که غلظت آن در خاکدانه‌های ریز بیشتر بود و بیشترین و کمترین غلظت کروم در خاکدانه‌های با قطر ۰/۰۵> و ۴ تا ۲ میلی‌متر مشاهده گردید. بر اساس شاخص زمین انباشتگی کروم در کلاس آلودگی متوسط بود و شاخص غنی‌شدگی به صورت Cr>Ni>Cr(VI)>Co به‌دست آمد. همچنین فاکتور بار آلودگی، بیانگر کلاس آلوده (۱/۸۸) بود. علاوه بر این، بررسی فاکتور تجمع‌زیستی عناصر مورد مطالعه در گیاه شال‌دم برای کبالت (۰/۰۲)، کروم (۰/۰۷) و نیکل (۰/۱۲) کمتر از یک بود.

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

واژه‌های کلیدی: شاخص بار آلودگی، شاخص زمین انباشتگی، شاخص غنی‌شدگی، فاکتور تجمع‌زیستی.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

۱- مقدمه

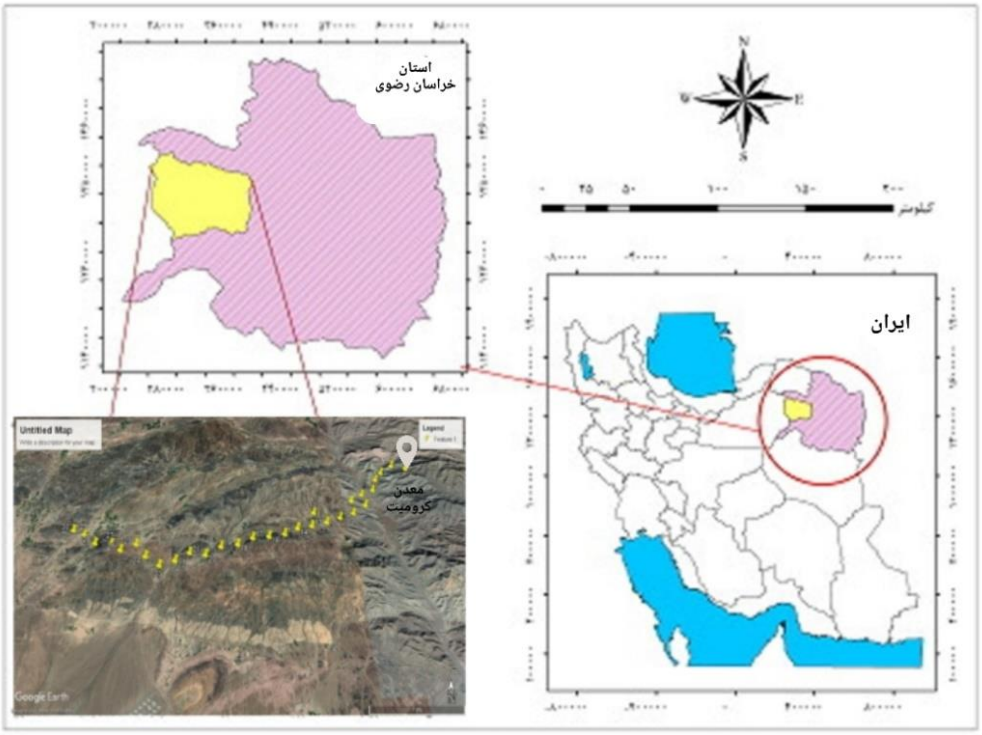
روند فزاینده شهرنشینی و صنعتی‌شدن در دهه‌های اخیر، به افزایش چشمگیر تولید زباله‌های جامد، به‌ویژه باطله‌های معدنی ناشی از فعالیت‌های انسانی، انجامیده است. این پدیده به یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم جهانی تبدیل شده و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در میان آلاینده‌های مختلف، عناصر با پتانسیل سمیت (PTEs) یا فلزات سنگین، به دلیل پایداری در محیط، تجمع زیستی و اثرات سمی بر موجودات زنده، از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی قرن حاضر محسوب می‌شوند. ورود عناصر با پتانسیل سمیت 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 قابل توجهی 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 سمیت 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 سمیت 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 سمیت 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 (Fraks *et al.*, 2013). کروم به‌طور طبیعی در محیط وجود دارد و عمدتاً از طریق 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 سمیت و ویژگی‌های فیزیکی تفاوت چشمگیری دارند. کروم (VI) به‌مراتب سمی‌تر بوده و در فرآیندهای اکسیداسیون طبیعی خاک و آب‌های اطراف معادن تولید می‌شود (Dhal *et al.*, 2010). 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).

مطالعات متعددی به بررسی آلودگی عناصر با پتانسیل سمیت در خاک، آب، گیاه و رسوبات اطراف معادن پرداخته‌اند. برای مثال، پژوهشی در مناطق معدن مس شمال‌غرب ایران نشان داد که خاک‌های اطراف معدن با شاخص زمین انباشتگی و غنی‌شدگی، دارای سطوح بالای آلودگی بودند (Alizadeh *et al.*, 2024). جلیلی و معیاری (Jalili and Meyari, 2022) در غرب ایران نشان دادند که میزان جذب فلزات توسط گیاهان به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و نوع گونه گیاهی بستگی دارد. همچنین ابراهیم‌نژاد (Ebrahimnezhad, 2014) گزارش کردند که گیاهان بومی منطقه معدن مس سرچشمه توانایی تجمع مس و نیکل را در اندام‌های هوایی خود دارند و این گونه‌ها می‌توانند شاخص‌های زیستی مناسبی برای پایش آلودگی باشند. افزون بر این، میرزابیاتی و حمیدیان (Mirzabayati and Hamidian, 2025) با بررسی گیاهان دارویی ایران عنوان کردند که انباشت عناصر با پتانسیل سمیت در گیاهان به‌ویژه در مناطق

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]



شکل ۱. موقعیت منطقه موردمطالعه و نقاط نمونه‌برداری شده

Figure 1. Location of studied area and sampling points.

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 محدودتر است (Das *et al*., 2013). در این راستا، با توجه به انباشت مستمر عناصر با پتانسیل سمیت 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 مطالعات 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 سطحی و بررسی انتقال و تجمع آن‌ها در گیاه شال‌دم (*Stipa barbata*) و شناسایی منابع احتمالی این عناصر در اراضی 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

نمونه‌برداری از حوالی معدن کروم سبزوار (شکل ۱) به صورت مرکب از عمق ۰ تا ۱۵ به فواصل ۳۵۰ متر و تا فاصله ۱۰ کیلومتر

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

در جهت باد غالب از معدن صورت گرفت. نمونه‌های خاک (۳۰ نمونه) جهت بررسی غلظت عناصر کروم، نیکل، کبالت و کروم (VI) بعد از انتقال به آزمایشگاه در مجاورت هوا خشک شدند. نمونه‌های هوا خشک جهت آنالیز از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. همچنین به‌منظور بررسی 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 نمونه‌برداری 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، جهت 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. جهت عصاره‌گیری و تعیین غلظت عناصر کروم، نیکل و کبالت از روش تیزاب سلطانی استفاده شد (Dakiky *et al*., 2002)، که در این روش مقدار یک گرم خاک وزن و داخل 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 اضافه گردید و روی هیتر در زیر هود قرار داده و به مدت ۴۵ دقیقه در دمای بین ۷۵ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده 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 بعد 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 جهت تعیین کروم (VI) که به عنوان خطرناک‌ترین شکل کروم در محیط‌زیست می‌باشد، کروم (VI) نه تنها به راحتی توسط گیاهان جذب می‌شود و بر عملکرد و کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد، بلکه به دلیل سرطان زایی، جهش زایی و سمیت ژنتیکی، اثرات مضری بر انسان و نیز حیوانات دارد، بنابراین اندازه‌گیری این عنصر ضروری می‌باشد، 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 اضافه و 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 درجهٔ‌سانتی‌گراد حرارت داده شدند و بعد 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 دی فنیل کربازید (DPC) (۲۰ دقیقه بعد از مخلوط نمودن ۸ میلی‌لیتر عصاره و ۱ میلی‌لیتر معرف) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدلUV–1800) و در طول موج ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

برای تعیین غلظت عناصر در نمونه‌های گیاهی، ابتدا محلول اسید کلریدریک ۲ نرمال با رقیق کردن 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 سانتی‌گراد طی دو ساعت، به مدت حداقل پنج ساعت خاکستر گردید. پس از سرد شدن، کروزه‌ها از کوره خارج شدند. و به خاکستر حاصله، ۱۰ میلی‌لیتر از محلول اسید کلریدریک ۲ نرمال افزوده شد. سپس کروزه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه روی هیتر با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد 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). و در نهایت غلظت این عناصر با دستگاه ICP-OES، مدل SPECTRO ARCOS اندازه‌گیری شد.

جهت تعیین شدت آلودگی خاک از شاخص‌های زمین انباشتگی، فاکتور آلودگی، شاخص غنی‌شدگی و شاخص بار آلودگی و فاکتور تجمع زیستی به شرح زیر استفاده گردید:

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

شاخص زمین انباشتگی(I_{geo})

شاخص زمین انباشتگی اولین بار توسط مولر معرفی شد. و روشی متداول برای تخمین شدت آلایندگی خاک نسبت به عناصر با پتانسیل سمیت است (Muller, 1969). در این شاخص به مقایسه غلظت عناصر با پتانسیل سمیت در نمونه خاک و غلظت زمینه آن فلز پرداخته می‌شود.

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

I_{geo}: شاخص زمین انباشتگی، C_n: غلظت اندازه‌گیری شده فلز و B_n: غلظت زمینه یا شاهد فلز. 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، غیرآوده تا کمی آلوده بین صفر تا یک، کمی آلوده بین یک تا دو، کمی آلوده تا خیلی آلوده بین دو تا سه، خیلی آلوده بین سه تا چهار، خیلی آلوده تا بی نهایت آلوده بین چهار تا پنج و بی‌نهایت آلوده بیشتر از پنج است (Muller, 1979).

شاخص غنی شدگی(EF)

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

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

در این معادله EF: عامل 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. طبق این شاخص، شاخص غنی شدگی کمتر از دو در کلاس تهی یا کمی غنی شده، بین دو تا پنج در کلاس غنی شدگی متوسط، بین پنج تا ۲۰ در کلاس غنی شدگی زیاد، بین ۲۰ تا ۴۰ در کلاس غنی شدگی شدید و بیشتر از ۴۰ در مکلاس غنی شدگی بسیار شدید قرار می‌گیرد. در این مطالعه آهن به عنوان فلز مرجع در نظر گرفته شد، زیرا منشأ آن عمدتاً زمین‌زاد بوده و غلظت آن در خاک‌های منطقه نسبتاً یکنواخت است. از آن‌جا که 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 مطابق با مطالعات پیشین (Wei and Yang, 2010) است.

شاخص بار آلودگی (PLI[1])

از این شاخص جهت بررسی شدت آلودگی خاک به ضریب غلظت هر عنصر در خاک استفاده می‌شود که نشان دهنده‌ی کیفیت خاک نیز است. 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 طبق رابطه زیر به‌دست می‌آید (Bhuiyan *et al*., 2010).

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

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

با توجه به مقادیر استاندارد که توسط تاملینسون و همکاران (Tomlinson *et al*., 1980) ارائه شده است، چنانچه غلظت P.L.I به عدد یک نزدیک باشد نمایانگر نزدیک بودن غلظت به مقدار زمینه می‌باشد، و چنانچه P.L.I بیشتر از یک باشد نشان دهنده آلودگی منطقه است.

فاکتور تجمع زیستی (BCF)

کاربرد این شاخص (رابطه ۴) جهت ارزیابی انتقال عناصر با

1- Pollution Load Index

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاه منطقه مورد مطالعه (n=30)

Table 1. Physicochemicalattributes and concentration of heavy metal in soil and plant samples (n=30)

CV	SD	Min	Max	Mean	Soil properties
35.11	2.54	4.29	13.64	7.24	Clay (%)
13.37	9.67	57.20	89.45	72.36	Sand (%)
39.24	8.01	6.26	34.60	20.41	Silt (%)
2.11	0.16	7.22	7.99	7.50	pH
18.61	0.13	0.51	1.07	0.72	EC ($dS\ m^{-1}$)
77.73	0.73	0.17	3.52	0.94	OC (%)
134.74	1.35	147.50	2463.75	848.34	Cr_{Soil} ($mg\ kg^{-1}$)
145.28	1.45	38.65	609.25	242.54	Ni_{Soil} ($mg\ kg^{-1}$)
212.77	2.13	10.70	65.65	29.42	Co_{Soil} ($mg\ kg^{-1}$)
46.04	0.12	0.10	0.50	0.26	Cr_{Soil} (VI) ($mg\ kg^{-1}$)
281.09	2.81	3.00	8.50	4.25	Cr_{Plant} ($mg\ kg^{-1}$)
435.20	4.35	5.80	12.20	8.00	Ni_{Plant} ($mg\ kg^{-1}$)
201.54	2.02	0.10	0.90	0.43	Co_{Plant} ($mg\ kg^{-1}$)

پتانسیل سمیت از خاک به انواع گیاهان زراعی می‌باشد. که C_c و C_s غلظت کل فلزات در گیاه و خاک است (Saraswet and Rai, 2009).

$$BCF=\frac{C_C}{C_S} \quad (۴)$$

آنالیز آماری

برای افزایش دقت و صحت اندازه‌گیری‌ها، هر نمونه خاک از سه نقطه جمع‌آوری شد. علاوه بر این، برای تحلیل داده‌ها با استفاده 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 گردید. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. کلیه داده‌ها قبل از تحلیل از نظر نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها بررسی شدند.

نتایج و بحث

با توجه به اینکه هدف این مطالعه بررسی میزان عناصر کروم، نیکل، کبالت و کروم (VI) و همچنین اثرات زیست‌محیطی آنهاست و از آنجایی که شدت آلودگی به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نیز بستگی دارد و نیز به انباشت فلزات، تحریک پذیری فلزات در خاک تاثیرگذار است، بنابراین در جدول ۱ میانگین و همچنین سایر پارامترهای آماری شامل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین غلظت عناصر سنگین مورد مطالعه در خاک و گیاه ارائه شده است.

با توجه به نتایج (شکل‌های ۲ و ۳) مشاهده می‌شود بیشترین غلظت کروم، نیکل و کبالت تقریبا نزدیک به معدن بوده است و کمترین مقدار آنها مربوط به دورترین نقاط از معدن است، لذا هر سه عنصر تقریبا روند مشابهی را دارند و هر چه از معدن فاصله می‌گیریم روند کاهشی دیده می‌شود، بنابراین 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 سمیت در نزدیکی منابع معدنی بیشتر بوده و با افزایش فاصله کاهش یافته است همچنین با مقایسه میانگین غلظت کل عناصر با پتانسیل سمیت خاک اطراف معدن کرومیت با مقادیر میانگین جهانی (USEPA, 1998) و میانگین پوسته زمین (Bowen, 1979) مشاهده شد. غلظت کل کروم (۸۴۸/۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی و میانگین پوسته

نسخه پیش از انتشار اصلاح شده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

زمین (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. برای نیکل (۲۴۲/۵۴ میلی‌گرم بر کیلو گرم) نیز میانگین غلظت آن بسیار بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی و میانگین پوسته زمین (به ترتیب ۴۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌باشد و در مقایسه با استانداردهای ایران در بخش کشاورزی و محیط‌زیست (به ترتیب ۱۱۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم دارای آلودگی است. در ادامه با مقایسه میانگین غلظت کل کبالت (۲۹/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نیز مشاهده شد غلظت این عنصر بیشتر از حد مجاز استاندارد جهانی و میانگین پوسته زمین (به ترتیب ۸ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است و در مقایسه با استانداردهای ایران کبالت در بخش محیط‌زیست (که ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است) دارای آلودگی می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه 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 مطالعه ۷/۵، (۷/۸ تا ۷/۴) در طبقه کم قلیایی قرار می‌گیرد. بنابراین تاثیر مثبتی در تثبیت و انباشت کروم (VI) می‌تواند داشته باشد و در صورت افزایش فعالیت‌های مخرب معدن کروم مورد مطالعه می‌تواند باعث آلودگی خاک در لایه ریزوسفر و سلامت انسان و محیط‌زیست گردد. کروم (VI) درحالت خنثی تا قلیایی شرایط (۱۲ تا ۶/۵ pH)، به شکل شیمیایی CrO_4^{-2} غالب است (Shadreck and Mugadza, 2013).

از بین پارامترهای فیزیکی، بافت خاک بر اساس آنالیزهای صورت گرفته تأثیر مستقیمی بر میزان انباشت عناصر با پتانسیل سمیت نشان می‌دهد. بافت خاک مورد مطالعه در این پژوهش لوم شنی می‌باشد که از خصوصیات بارز این خاک‌ها نفوذ و حرکت بیشتر آب است، که ممکن است باعث تحرک بیشتر عناصر با پتانسیل سمیت از جمله کروم در منطقه مورد مطالعه شود و از سوی دیگر با توجه به بافت سبک خاک منطقه مورد مطالعه که از نفوذپذیری کمی برخوردار نیست می‌توان انتقال آلودگی ناشی از کروم به عمق‌های پایین‌تر و آبهای زیرزمینی را دور از انتظار نداشت. پژوهش‌های مختلفی همبستگی مثبت بین عناصر با پتانسیل سمیت و بافت خاک را نشان داده‌اند. مثلا پژوهش‌های مختلفی نشان داده‌اند که خاک‌های با خصوصیات بافت سبک به دلیل نفوذ و تحرک 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). سلماسی و پیروان (Salmasi and Pyrowan, 2021) طی یک پژوهش آلودگی خاک به عناصر با پتانسیل سمیت و رابطه این فلزات با ویژگی‌های خاک‌های منطقه‌ی سراسکند را مورد بررسی قرار داد که نتایج این پژوهش نشان داد هر چه بافت خاک سبک‌تر باشد تحرک بیشتر و دارای غلظت کمتری از عناصر نسبت به خاک‌های رسی می‌باشد. زیرا خاک‌های رسی موجب تثبیت بیشتر عناصر سنگین نسبت به خاک شنی می‌شوند.

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که میانگین کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه ۰/۹۴ درصد می‌باشد و لذا در زمره خاک‌های بسیار فقیر از نظر مواد آلی قرار می‌گیرند. سمیت کروم می‌تواند با احیاء شدن کروم (VI) به کروم (III) و در نتیجه افزایش مقدار جذب آن درخاک کاهش یابد (Ao *et al*., 2022). در این ارتباط مواد آلی بـه عنوان ترکیبات الکترون دهنده می‌توانند نقش مؤثری در احیاء کروم (VI) ظرفیتی داشته باشند. به عنوان مثال یانگ و همکاران (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 سمیت بسیار بالایی است (در مقایسه به کروم (III) که خطرناک نمی‌باشد) و همچنین میزان بسیار کم مواد آلی در خاک‌های مورد مطالعه می‌توان احتمال بالا بودن درجه سمیت در این منطقه وجود دارد.

نتایج مطالعه جغتایی و همکاران (Joghataiyi *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 دور شدن 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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

با نتایج این پژوهش نیز هم‌خوانی دارد. نتایج این پژوهش با یافته‌های منصوری و همکاران (Mansouri Moghadam *et al.*, 2024) و علیزاده (Alizadeh, 2024) همخوانی دارد. آنها در مناطق معدنی مرکزی و شمال‌غرب ایران نیز تجمع بالای عناصر فلزی را در خاک‌های اطراف معادن گزارش کرده‌اند.

میانگین، بیشینه و کمینه غلظت کروم (VI) در ۳۰ نمونه خاک مورد بررسی به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۵۰ و ۰/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۱)، که بر اساس استاندارد کشور ایران حد مجاز سازمان محیط زیست ۰/۴ می‌باشد. با توجه به این استاندارد غلظت کروم (VI) در برخی از نقاط (۳۵ درصد نقاط که عمدتا 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، احتمالا 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 قرار گرفت، میزان آلودگی در خاکدانه‌ها نیز مورد ارزیابی صورت پذیرفت.

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

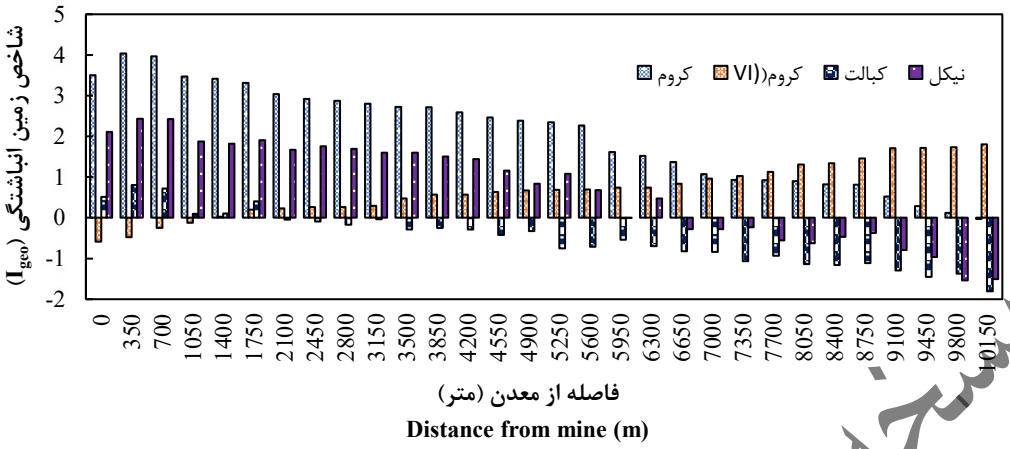
بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۱ و با در نظر گرفتن الگوی مکانی نمونه‌برداری (از نزدیکی معدن تا دورترین ایستگاه‌ها)، مشاهده شد که مقادیر میانگین کروم، نیکل و کبالت در گیاهان همانند مقادیر خاک بیشترین غلظت را در نزدیکی معدن نشان دادند و کمترین مقدار آن‌ها در دورترین نقاط از معدن مشاهده شد. این موضوع بیانگر 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 سمیت در گیاهان منطقه است. نتایج مشابهی در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است؛ به‌عنوان نمونه، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که گیاهان مرتعی در مناطق معدنی به‌طور قابل توجهی عناصر با پتانسیل سمیت را از خاک آلوده جذب کرده و غلظت آن‌ها در اندام‌های گیاهی با افزایش غلظت خاک همبستگی مستقیم دارد (Akbar *et al.*, 2024).

شاخص زمین انباشتگی (I_{geo})

مقادیر محاسبه شده شاخص زمین انباشتگی عناصر با پتانسیل سمیت برای ۳۰ نمونه در شکل ۲ ارائه شده است. طبق نتایج شاخص زمین انباشتگی برای کروم بین ۰/۰۲ تا ۴/۰۴ متغیر بود. میانگین شاخص زمین انباشتگی برای کروم ۲/۰۶ به‌دست آمد، که نشان داد خاک نسبتاً آلوده بود، به‌طوری که میزان آلودگی آن با دور شدن از نواحی افیولیتی و معدن کرومیت کاهش یافت. زیاد بودن شاخص زمین انباشتگی عنصر کروم نشان دهنده تاثیر به سزای سنگ های 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 قرار دارد که در طبقه بندی غیر آلوده تا آلودگی کم قرار می‌گیرد. مقادیر این شاخص برای کبالت نیز از ۱/۸۱- تا ۰/۸۱ با میانگین ۰/۵۰- بود که نشان دهنده‌ی عدم 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، که براساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت محتمل‌ترین منبع افزودن این فلزات به خاک طبیعی فعالیت های معدنی است. با توجه به شکل ۲ نیز می‌توان گفت که تجمع کروم زیاد است، که نشان‌دهنده وجود سهم قابل توجهی از منابع انسانی است. اما عناصر نیکل و کبالت آلودگی چندانی نداشته‌اند و دارای غلظت پس زمینه می‌باشند که ناشی از ناخالصی در معدن کرومیت سبزوار می‌باشد.

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]



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

Figure 2. Geoaccumulation index (I_{geo}) for contamination levels in soil samples

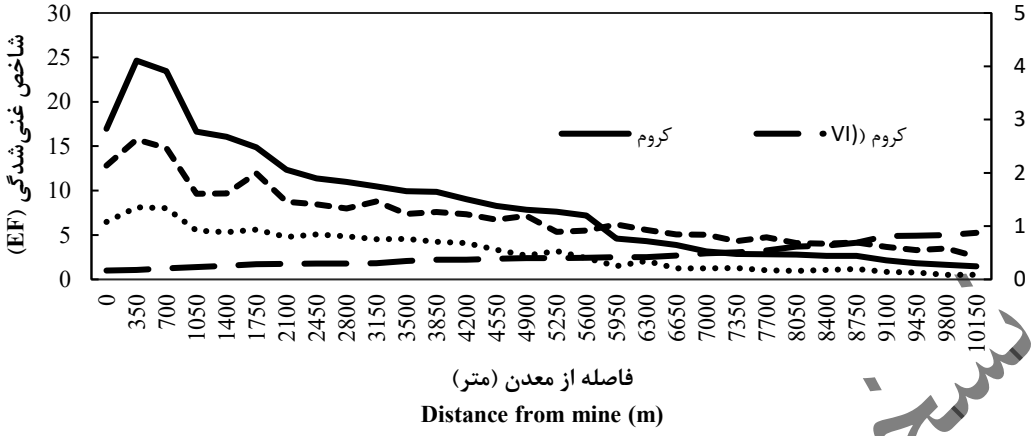
همچنین بر اساس این شاخص، کروم (VI)، ۴ نمونه در کلاس غیر آلوده، ۱۶ نمونه در کلاس غیرآلوده تا کمی آلوده و ۱۰ نمونه در کلاس کمی آلوده قرار گرفته‌اند (شکل ۲) و همین طور روند آن عکس روند کروم، نیکل و کبالت می‌باشد. این تفاوت رفتاری را می‌توان به اختلاف در شکل و رفتار ژئوشیمیایی کروم (VI) نسبت داد. کروم (VI) 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 زمین انباشتگی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۵۸- و ۱/۸۱ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد که طبق نشان می‌دهد در کلاس یک یعنی غیر آلوده تا کمی آلوده می‌باشد. مظهری (Mazhari, 2017) طی یک پژوهشی به بررسی خاک‌های سطحی منطقه شمال سبزوار پرداخت که یافته‌های آن منجر به شناسایی با درصد آلودگی‌های پایین زیست‌محیطی عناصر کروم، نیکل، و کبالت با منشا زمین‌زاد گردید. مشابه با پژوهش حاضر نتایج آنها حاکی از زمین‌زاد بودن آلودگی کروم می‌باشد.

شاخص غنی‌شدگی (EF)

نتایج به‌دست آمده از ارزیابی شاخص غنی‌شدگی شکل ۳ نشان داد که هر چه میزان فاکتور غنی‌شدگی بیشتر باشد بدین معناست که سهم عامل انسانی در افزایش آلودگی خاک منطقه بیشتر است و مقدار این فاکتور برای کروم، نیکل و کبالت هر چه به معدن نزدیک‌تر می‌شویم روند افزایشی دارد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار فاکتور غنی‌شدگی مربوط به عنصر کروم ۸/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد که بر اساس طبقه بندی جهانی ((Tomlinson *et al*., 1980)) در همه ایستگاه‌ها، درجه آلودگی قابل توجه قرار می‌گیرد، بعد از آن نیکل با فاکتور آلودگی ۳/۲۳ و درجه آلودگی متوسط، کروم (VI) با فاکتور آلودگی ۲/۷۴ و درجه آلودگی متوسط و در نهایت کبالت با فاکتور غنی‌شدگی ۱/۱۸ و درجه آلودگی کم قرار دارند، که ترتیب میزان غنی‌شدگی به صورت Cr>Ni>Cr(VI)>Co می‌باشد. بر اساس نظر هرناندز و همکاران (Hernandez *et al*., 2023) مقادیر فاکتور غنی‌شدگی بین ۰/۵ تا ۲، زمین‌زاد و مقادیر بیش از ۲، ناشی از فعالیت انسان‌زاد می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر تاثیر 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 سمیت در اطراف معدن شود و توزیع ژئوشیمیایی عناصر با

نسخه پیش از انتشار اصلاح شده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]



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

Figure 3. Enrichment Factor (EF) for contamination levels in soil samples

پتانسیل سمیت را بیش از منابع سنگ‌زایی تغییر دهد، لذا زمینه را برای تخریب و کاهش کیفیت خاک که در نهایت باعث پدیده بیابان‌زایی شود، را فراهم آورد.

شاخص بار آلودگی (PLI)

نتایج نشان داد مقدار شاخص بار آلودگی در خاک‌های اطراف معدن کروم سبزوار ۱/۸۸ میلی‌گرم در کیلوگرم است، که نشان می‌دهد شاخص بار آلودگی در حد آلوده می‌باشد که دلیل وجود عناصر با پتانسیل سمیت به مقدار زیاد در این منطقه به علت وجود معدن می‌باشد. 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. خسروی و همکاران (Khosravi *et al*., 2018) طی پژوهش‌های مختلف نشان دادند که آب، خاک و هوا در مجاور فعالیت‌های صنعتی و معدنی بسیار آلوده می‌باشند، بنابراین فعالیت‌های صنعتی و معدنی بر سلامت ساکنان مناطق پیرامون از راه هوا، آب و خاک تاثیر منفی می‌گذارد و محیط‌زیست و سلامت انسان، گیاه و جانداران را به خطر می‌اندازد.

فاکتور تجمع زیستی (BCF)

نتایج فاکتور تجمع‌زیستی برای عناصر کبالت، کروم و نیکل در گیاه مرتعی شال‌دم به ترتیب برابر با ۰/۰۲، ۰/۰۷ و ۰/۱۲ بود. مقادیر به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فاکتور تجمع‌زیستی برای کبالت برابر با ۰/۰۲ ، برای کروم ۰/۰۷ و برای نیکل ۰/۱۲ است. از آنجا که تمامی این مقادیر کمتر از عدد یک هستند، می‌توان نتیجه گرفت که گیاه شال‌دم توانایی بسیار کمی در انتقال و تجمع این عناصر با پتانسیل سمیت 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 سمیت در خاک، از تجمع بیش از حد آن‌ها در بافت‌های خود جلوگیری می‌نماید. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، بیشترین میزان جذب نسبی مربوط به نیکل (۰/۱۲) و کمترین مقدار 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 قابلیت دسترسی بیشتر نیکل در خاک نیز در میزان جذب آن نقش داشته است. به‌طور کلی، مقادیر پایین فاکتور تجمع‌زیستی در این مطالعه بیانگر آن است که شال‌دم نمی‌تواند به‌عنوان یک گیاه انباشتگر (hyperaccumulator) 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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

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

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

CV (%)	SD (mg kg^{-1})	Min (mg kg^{-1})	Max (mg kg^{-1})	Mean (mg kg^{-1})	اندازه Size (mm)
29.76	0.07	0.19	0.41	0.23	4-2
51.04	0.15	0.17	0.68	0.29	2-1
37.69	0.11	0.23	0.54	0.30	1-0.5
21.81	0.06	0.22	0.43	0.29	0.5-0.25
35.31	0.13	0.26	0.64	0.36	0.25-0.05
56.17	0.23	0.20	0.98	0.42	<0.05

همبستگی بین غلظت عناصر در خاک و گیاه نیز هم‌خوانی دارد، زیرا بین مقادیر خاک و گیاه برای کروم، نیکل و کبالت رابطه‌ی 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>) 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 خاکدانه‌ها با قطر ۰/۰۵> و ۴ تا ۲ میلی‌متر به میزان (به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۲۳) مشاهده گردید و با کاهش اندازه خاکدانه‌ها، غلظت کروم (VI) نیز روند تقریبا افزایشی داشت، به طوری که غلظت کروم (VI) در خاکدانه‌های با قطر ۴ تا ۲ میلی‌متر نسبت به خاکدانه‌های با قطر ۰/۰۵> میلی‌متر (رس و سیلت) ۴۵ درصد کاهش یافت. همچنین خاکدانه‌های به قطر ۲ تا ۱، ۱ تا ۰/۵، ۰/۵ تا ۰/۲۵ و ۰/۲۵ تا ۰/۰۵ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۳۱، ۲۸/۵، ۳۱ و ۱۴ درصد نسبت به خاکدانه‌های به 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 شکسته شده ذرات رس در سطح خاک‌های ریز، ظرفیت بالاتر برای جذب سطحی آنیون‌ها (نظیر CrO_4^{-2}) دارند. با توجه به اینکه کروم (VI) عمدتاً به‌صورت آنیونی است افزایش ظرفیت تبادل آنیونی در خاکدانه‌های ریزتر، عامل مؤثر در جذب بیشتر آن است (John *et al*., 2022). همچنین آب‌شویی خاک رسی به دلیل منافذ کوچکتر نسبت به خاک شنی می‌تواند یکی دیگر از عوامل مهم انتقال کروم (VI) باشد. Saha *et al.* (2022) نشان دادند که با کاهش قطر خاک‌دانه‌ها (خاک رسی) غلظت عناصر سنگین افزایش می‌یابد. دوان و همکاران (Duan *et al*., 2015) طی یک پژوهش به بررسی توزیع غلظت عناصر سنگین در خاک‌های ۶۲ نقطه مختلف و از سطح ۲۰ سانتی‌متری منطقه جنوب غربی چین پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد غلظت عناصر سنگین در خاک‌های سنگین بیشتر از خاک‌های سبک بود. آنجلکی و همکاران (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

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

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 بوده زیرا توانایی پیوند با مواد شیمیایی و انواع محیط‌ها برای انتقال اشکال مختلف آلاینده‌ها در اتمسفر، هیدروسفر و زیست توده گیاهان را دارد. بررسی‌های انجام‌شده در این تحقیق بیانگر آن است که منطقه مورد مطالعه، به‌دلیل فعالیت‌های معدنی چندین ساله، مقادیر شاخص‌های زمین‌انباشتگی، غنی‌شدگی و بار آلودگی از مقادیر زمینه‌ای فراتر رفته‌اند. این شاخص‌ها بیانگر آن هستند که فعالیت‌های انسانی مرتبط با استخراج کرومیت، موجب افزایش غلظت عناصر با پتانسیل سمیت 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 زمین انباشتگی کروم در کلاس آلودگی متوسط قرار گرفت و طبق شاخص غنی‌شدگی به صورت Cr>Ni>Cr(VI)>Co است و با ارزیابی فاکتور بار آلودگی خاک‌های این منطقه در کلاس آلوده قرار گرفت که نشان می‌دهد فعالیت‌های انسانی بیشترین تاثیر را در آلودگی این منطقه داشته است. که 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 طریق خاک ممکن است بر سلامت انسان تاثیر بگذارد. از سوی دیگر، بررسی فاکتور تجمع‌زیستی 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 سمیت از خاک توسط این گونه است. بنابراین، گیاه شال‌دم (*Stipa barbata*) می‌تواند به‌عنوان گیاهی با تحمل نسبی بالا نسبت به آلودگی عناصر با پتانسیل سمیت در نظر گرفته شود، نه به‌عنوان گونه‌ای انباشت‌کننده، و قابلیت آن در پایش زیستی سطح آلودگی خاک‌های اطراف معدن در مطالعات آتی و گسترده‌تر قابل بررسی خواهد بود. بنابراین اگر چه خاک‌های اطراف معدن از آلودگی متوسطی برخوردارند اما به‌دلیل معدن‌کاوی‌های متداوم ممکن است در سال‌های آتی به یک نگرانی بزرگ تبدیل شود، لذا 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 بالاتری از عناصر با پتانسیل سمیت 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 سمیت توسط فعالیت‌های معدنی طراحی شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد که مطالعات گسترده‌تری در جهت‌های مختلف موقعیت معدن مذکور در منطقه صورت گیرد.

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.

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

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 مورد استفاده

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. Ap. Soil Res. 6(1), 13-24 (In Persian).
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. Environmental Monitoring and Assessment, 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. Asses. 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.org/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. Ebrahimnezhad, N., 2014. Evaluation of Cu in soil and number of plant species around a Sarcheshmeh copper deposit in Kerman province.
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. Hndbook of soil analysis. Soil sci. Soc. Am. 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. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.30495/JEST.2021.9133
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.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]

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. (In Persian) doi: 10.22092/ijrdr.2018.116228
24. 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
25. 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.
26. Muller, G M., 1979. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. Geo. J. 2, 108-118.
27. 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. Chemos. 287, 132369. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132369
28. 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. Mon. Asses. 194(4), 1-17.
29. 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
30. 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
31. 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
32. Sultana, Z., Rehman, M.Y.A., Khan, H.K., Malik, R.N., 2022. Health risk assessment associated with heavy metals through fractioned dust from coal and chromite mines in Pakistan. Environ. Geochem. Heal. 1-17.
33. Tomlinson, D.L, Wilson, J.G. Harris, C.R. and 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 (1980). https://doi.org/10.1007/BF02414780
34. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1998. Toxicological Review of Hexavalent Chromium, CASNR, 18540-29-9, Washington, DC, USA.
35. 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.
36. 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
37. 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
38. 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

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-06]