Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 2, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.2.38974

Investigating the Heavy Metal Contamination in Earthworm (*Eisenia fetida*) and Soil around the Abik Cement Factory, Alborz Province

Eisa Solgi* **and Mahdiyeh Dorjdar[1]**

(Received: July 24-2025; Revised: April 11-2026; Accepted: May 16-2026)

1. Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran.
*Corresponding Author, Email: e.solgi@yahoo.com; e.solgi@malayeru.ac.ir

Abstract
Soil contamination by metals is a major problem in terrestrial ecosystems, particularly in and around industrial areas, and can pose a threat to human health in various ways. Therefore, in the present study, the bioaccumulation of heavy metals in the earthworm (Eisenia fetida) in soil around the Abik Cement Factory in Alborz Province was evaluated. Sixty soil samples were collected at depths of 0-20 cm at distances of 500, 1000, and 2000, in the directions of north, south, east, and west. Earthworm samples were also randomly collected from these distances and directions. The wet digestion method was employed to determine heavy metal concentrations in soil and earthworms, and Zn, Cu, Pb, Cr, and Ni were measured using an atomic absorption spectrometer. One- way ANOVA and Kruskal- Wallis statistical methods were used to examine the effects of distance and direction. The bioaccumulation factor (BAF) was used to evaluate the ability of earthworms as a biological indicator. According to the results, the average concentrations of heavy metals in the soil around the lands of the Abik Cement Factory for Cr, Pb, Cu, Zn, and Ni were 22. 20, 10. 19, 6. 34, 7. 63, and 135. 75 (mg/kg), respectively. The average concentrations of heavy metals in earthworms in this region for Cr, Pb, Cu, Zn, and Ni were 51.57. 57, 9. 66, 5. 18, 5. 45, and 106. 17 (mg/kg), respectively. The results indicated that the distance effect was significant only for Ni ($p< 0. 05$), and the direction effect was significant for all heavy metals except Zn ($p> 0. 05$). A decreasing trend in the concentrations of Cu, Zn, and Pb was observed with increasing distance from the cement factory, indicating the impact of the Abik Cement Factory on heavy metal pollution in the agricultural soil of the surrounding lands. The highest bioaccumulation factor (BAF) was calculated for zinc and was greater than 1, indicating bioaccumulation of Zn in earthworms. It can be concluded that earthworms can be used as a suitable biological indicator species for monitoring soil contamination with heavy metals, especially for Zn.

Keywords: Bioaccumulation, Earthworm, Ecological index, Heavy metals, Abik cement plant

How to cite this article: Solgi, E. and Dorjdar, M. 2026. Investigating the Heavy Metal Contamination in Earthworm (*Eisenia fetida*) and Soil around the Abik Cement Factory, Alborz Province. *J. Water and Soil Sci.* 30(2): 143-164. DOI: 10.47176/jwss.30.2.38974

Copyright © 2026 Solgi and Dorjdar. Published by Isfahan University of Technology.

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

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۴۳ تا ۱۶۴ 10.47176/jwss.30.2.38974

بررسی آلودگی فلزات سنگین در کرم خاکی (*Eisenia* fetida) و خاک اطراف کارخانه سیمان آبیک استان البرز

عیسی سلگی* و مهدیه دُرج دَر[1]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۵ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۱/۲۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۶)

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: e.solgi@yahoo.com ; e.solgi@malayeru.ac.ir

چکیده

آلودگی خاک به فلزات یکی از مشکلات مهم و اساسی در اکوسیستم های خشکی به خصوص در داخل و نواحی اطراف صنعتی است که به طریق مختلف می‌تواند سلامت انسان را تهدید کند. بر این اساس در مطالعه حاضر به بررسی تجمع زیستی آلودگی فلزات سنگین در کرم‌خاکی *Eisenia fetida* در خاکهای اطراف کارخانه سیمان آبیک استان البرز پرداخته شد. به این منظور تعداد ۶۰ نمونه خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری در فواصل ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ و در جهت‌های شمال، جنوب، شرق و غرب برداشت شد. همچنین نمونه‌های کرم‌خاکی به‌صورت تصادفی در جهت‌های مختلف از این فواصل برداشت شد. به‌منظور سنجش فلزات سنگین در خاک و کرم‌خاکی روش هضم‌تر به‌کار گرفته شد و به کمک دستگاه جذب اتمی غلظت فلزات سنگین Zn، Cu، Pb، Cr، Ni سنجش شدند. برای بررسی اثر فاصله و جهت از روش‌های آماری One-way ANOVA و کروسکال والیس استفاده شد. همچنین برای ارزیابی توانایی کرم‌خاکی به‌عنوان شاخص زیستی از شاخص فاکتور تجمع زیستی (BAF) استفاده شد. بر اساس این پژوهش میانگین غلظت فلزات سنگین خاک در اطراف زمین‌های کارخانه سیمان آبیک برای Zn ، Cu، Pb، Cr، Ni به‌ترتیب ۲۲/۲۰، ۱۰/۱۹، ۶/۳۴، ۷/۶۳ و۱۳۵/۷۵ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و همچنین میانگین غلظت فلزات سنگین کرم‌خاکی در این منطقه برای فلزات Cr, Pb, Cu, Zn و Ni به ترتیب ۵۷/۵۱، ۹/۶۶، ۵/۱۸، ۵/۴۵ و ۱۰۶/۱۷ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) به دست آمد و نتایج نشان داد که اثر فاصله تنها در مورد فلز نیکل معنی‌دار است (p< ۰/۰۵) و اثر جهت برای همه فلزات سنگین به جز روی (p>۰/۰۵) معنی‌دار بود (p< ۰/۰۵) . همچنین روند کاهشی غلظت فلزات سنگین Zn، Cu و Pb با افزایش فاصله از کارخانه سیمان دیده شد که نشان‌دهنده تاثیر کارخانه سیمان آبیک بر آلودگی فلزات سنگین در خاک کشاورزی اراضی اطراف آن است. بیشترین میزان شاخص تجمع زیستی (BAF) برای عنصر روی و بیشتر از ۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده تجمع زیستی روی در کرم‌خاکی است و می‌توان نتیجه گرفت که کرم‌خاکی گونه شاخص زیستی مناسبی برای پایش آلودگی خاک به فلزات سنگین به ویژه روی است.

واژه‌های کلیدی: تجمع زیستی، کرم خاکی، شاخص‌های اکولوژیکی، فلزات سنگین، کارخانه سیمان آبیک

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 به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

امروزه رشد روزافزون جمعیت، توسعه شهرنشینی، گسترش شدید صنایع مختلف منجر به تولید انواع آلودگی‌های محیط زیستی به ویژه فلزات سنگین شده است. در این راستا آلودگی خاک به فلزات سنگین یک مشکل رایج در اکوسیستم‌های خشکی است که از فعالیت های صنعتی آلوده، رسوب اتمسفری، رهاسازی فاضلاب، آبیاری با آبهای آلوده ناشی می‌شود (۳۵). در این میان یکی از صنایع مهم که نقش اساسی در آلودگی خاک به فلزات سنیگین ایفا می‌کند، صنعت سیمان است (۵). فرآیند تولید سیمان هر ساله باعث تولید میلیون‌ها تن محصول جانبی از جمله گردوغبار، گازهای سمی و فلزات سنگین شده که خطرات آلودگی محیط‌زیستی به خصوص آلودگی خاک و تهدید سلامت موجودات زنده آن را به دنبال خواهد داشت (۲).

خاک یکی از مهم‌ترین و باارزش‌ترین منابع طبیعی است که انسان علاوه بر تولید غذا، برای سکونت و زندگی خود به آن وابستگی شدیدی دارد (۱۳). آلودگی خاک به فلزات سنگین علاوه بر اینکه منجر به تهدید جدی سلامت زیست‌مندان خاکی می‌شود، از طرق مختلف به خصوص زنجیره غذایی می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت جوامع انسانی به شمار آید. از سوی دیگر فقدان ابزار کارآمد در کنار داده های پایشی ناقص، موانع اصلی مدیریت و پیشگیری از آلودگی خاک در جهان هستند (۲۰). ازاین‌رو ارزیابی غلظت، توان جذب فلزات سنگین توسط گیاهان مختلف به خصوص گیاهان زراعی و درک بهتر پتانسیل انتقال آنها در زنجیره غذایی با استفاده از شاخص‌های مختلف مانند شاخص‌های زیستی از اهمیت بسیار زیادی برخودار است (۱۳). در این راستا اگر چه مطالعات متعددی مانند نفور و همکاران (۲۰) و لی‌یو و همکاران (۱۴) غلظت و خطرات بالقوه فلزات سنگین و متالوئیدها را در محیط‌های خاکی مورد بررسی قرار دادند یا مطالعات مختلفی همچون ویو و همکاران (۳۶)، آذهار و همکاران (۵)، آتوچین و همکاران (۴)، به ارزیابی روش‌های اصلاح خاک‌های آلوده برای اطمینان از ایمنی مواد غذایی پرداختند. با این حال، مطالعات نسبتاً محدودی برای بررسی روابط بین سطوح فلزات سنگین در خاک‌های آلوده و شاخص‌های زیستی مانند گونه‌های مختلف کرم خاکی در گروه‌های اکولوژیکی مختلف که زیستگاه‌ها و استراتژی‌های تغذیه متفاوتی دارند، انجام شده است. از سوی دیگر اگرچه نقش کرم‌های خاکی در تشکیل خاک و حفظ حاصلخیزی طبیعی خاک برای دانشمندان و اکولوژیست ها شناخته شده و جالب توجه است، اما دانش به‌دست‌آمده در خصوص نقش پایش زیستی و توسعه برنامه‌های احیای اکوسیستم‌های خاکی نیز نیاز به بررسی و ارزیابی دقیق‌تری دارد.

کرم‌های خاکی از جمله موجودات خاکزی هستند که از شاخص‌های زیستی حساس به آلودگی خاک به حساب می‌آیند (۳۳). در بیشتر خاک‌های جهانی، کرم‌های خاکی بخش مهمی از جانوران خاک بوده و بخش قابل توجهی از زیست‌توده خاک را تشکیل می‌دهند و به‌عنوان شاخصی مفید برای سلامت و کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شوند (۹). این نقش مهم آنها در تجزیه مواد آلی و چرخه متعاقب مواد مغذی است که منجر به استفاده از کرم‌های خاکی به‌عنوان یک موجود شاخص برای تأثیر بیولوژیکی آلاینده‌های خاک شده است (۶ و ۳۷). گسترش روز افزون ورود فلزات سنگین به محیط و تاثیر آنها روی ساختار اجتماع جانداران خاکزی موجب برهم‌زدن اکوسیستم خاک می‌شود (۲۶). کرم‌های خاکی از جمله موجوداتی هستند که به طور معمول در مطالعات محیط‌زیستی و سنجش سمیت زیستی فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند. کرم خاکی به دلیل زندگی در خاک، بلع و شکستن مواد آلی به‌طور مستقیم، در معرض آلودگی خاک قرار می‌گیرد. به دلیل پوست نفوذپذیر و تماس مداوم با خاک از طریق دستگاه گوارش، آنها به شدت به آلودگی خاک حساس هستند. فلزات سنگین در بدن آنها تجمع می‌یابند و مشکلات عمده‌ای برای سلامتی ایجاد می‌کنند (۷ و ۳۷). از سوی دیگر کرم‌خاکی به دلیل دارا بودن ویژگی‌های گوناگونی مانند نمونه‌برداری ساده، دامنه پراکنش

گسترده و توانایی انباشت آلودگی‌ها، می‌توان به عنوان یک شاخص زیستی مناسب استفاده کرد. افزون بر این محدودیت این گونه در تحرک و جابه‌جایی، گونه را به یک نماینده مناسب برای پایش تاثیرات آلودگی‌ها در یک مکان معین تبدیل کرده است (۳۳ و ۳۷). این موجودات زنده خاک اطلاعات مهمی برای ارزیابی خطرات محیط‌زیستی فراهم می‌آورند و به دلیل همبستگی بین غلظت برخی از آلوده‌کننده‌ها در کرم‌خاکی و در خاک شاخص مفید بیولوژیکی برای ارزیابی آلودگی به حساب می‌آیند. این موجودات زنده می‌توانند غلظت زیادی از فلزات سنگین را در بدن خود تجمع دهند. از آنجایی که کرم‌های خاکی اجزای اصلی زیست‌توده هستند، از مهم‌ترین منبع غذایی برای سایر موجودات بالاتر در هرم غذایی هستند (۲۰). تجمع مواد سمی مانند فلزات در بدن آنها باعث می‌شود حیواناتی که از آنها تغذیه می‌کنند، به طور مستقیم تحت تاثیر قرار گیرند (۳۳). بنابراین باتوجه به نقش و اهمیت پایش آلودگی خاک و نقش مهم کرم خاکی در پایش فلزات سنگین آن و همچنین ویژگی‌های اکولوژیکی این موجود زنده، این مطالعه با هدف ارزیابی غلظت فلزات سنگین خاک و استفاده از کرم خاکی به عنوان پایشگر زیستی فلزات سنگین خاک در اطراف نواحی کارخانه سیمان آبیک استان البرز طراحی شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه و گونه مورد مطالعه

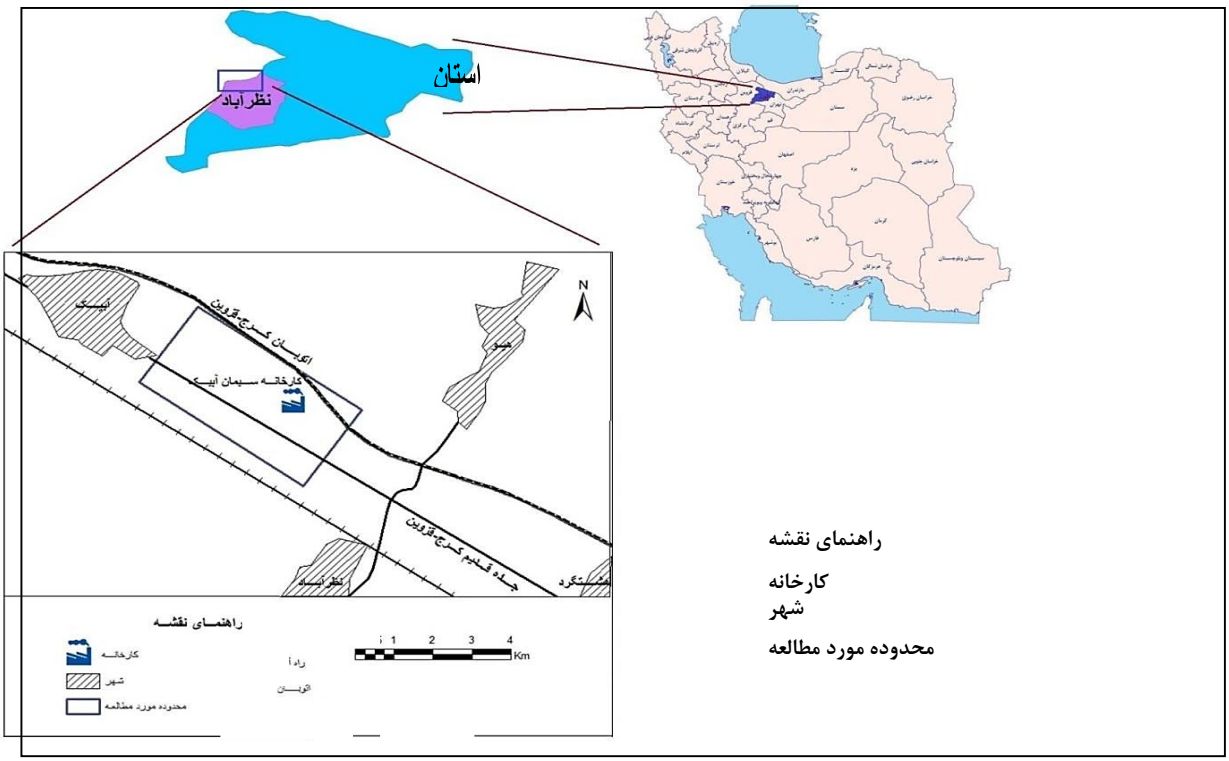
منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر نواحی اطراف کارخانه سیمان آبیک استان البرز (در طول جغرافیایی "۳۲ °۵۰ تا "۳۶ °۵۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۰۰ °۳۶ تا " ۰۲ °۳۶) بود. کارخانه سیمان آبیک (شکل ۱) با تولید روزانه بیش از ۱۳۰۰۰ تن سیمان از جمله بزرگ‌ترین کارخانه های سیمان در حاشیه غربی استان البرز و جنوب شرقی شهرستان آبیک است. همچنین گونه پایشگر مورد مطالعه در پژوهش حاضر کرم‌خاکی *Eisenia fetida* بود که از شاخه کرم‌های حلقوی، خانوادهٔ Lumbricidae، جنس ایزینیا وگونهٔ فتیدا است.

نمونه برداری خاک از اطراف کارخانه سیمان

به منظور سنجش غلظت فلزات سنگین خاک محدوده اطراف کارخانه سیمان آبیک، نمونه‌برداری خاک در راستای چهار جهت جغرافیایی مختلف کارخانه تا شعاع دو کیلومتری محل کارخانه و در فواصل مختلف (۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ متری) برداشت شد. توضیح اینکه در هر فاصله ۵ نمونه و در مجموع ۵×۳×۴=۶۰ نمونه جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری صورت گرفت و نمونه‌ها پس از برداشت در کیسه‌های پلی‌اتیلنی ذخیره و برای آنالیزهای بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند.

آماده‌سازی و هضم نمونه های خاک

نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه به مدت یک هفته در دمای اتاق هوا خشک شدند. برای سنجش خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، نخست نمونه‌های خاک از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند و برای سنجش فلزات سنگین نیز از الک ۰/۱۴۹ میلی‌متر استفاده شد (۲۹). به‌منظور هضم نمونه‌ها برای سنجش فلزات سنگین دو گرم خاک الک‌شده به دقت وزن شد و به نمونه‌ها ترکیبی از سه اسید شامل ۴ میلی‌لیتر HNO_3، ۱۲میلی لیتر HCl و ۴ میلی‌لیتر $HCLO_4$ اضافه شد و سپس به مدت ۶ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گرما داده شد. پس از اتمام عملیات هضم نمونه‌ها توسط کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شده و توسط آب دو بار تقطیر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسیدند (۳۱). درنهایت غلظت فلزات (Cr, Zn, Ni، Cu و Pb) در نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی (ContrAA 700) تعیین شد. برای کنترل کیفیت آنالیزها سه نمونه شاهد بلنک نیز در کنار سایر نمونه‌ها هضم شد. به‌منظور اندازه‌گیری pH و EC نسبت ۱به ۵ خاک (۵ گرم) به آب (۲۵ سی‌سی) به مدت ۲ ساعت روی شیکر قرار داده شد و پس از آن مقادیر pH عصاره‌ها با استفاده از دستگاه pH متر (AZ 86552) و EC با استفاده از EC متر(AZ 86505) سنجش شد. همچنین برای اندازه‌گیری بافت خاک از روش هیدرومتری جوکاب و کلارک (۱۲) استفاده شد.



شکل ۱. موقعیت مکانی محل نمونه‌برداری

نمونه برداری، آماده سازی و هضم نمونه‌های کرم‌خاکی

به منظور ارزیابی توان پایشگری کرم خاکی، نمونه‌های آن از جهت‌های مختلف (شمال، جنوب، غرب و شرف) کارخانه و فواصل مختلف برداشت شدند. توضیح اینکه بهترین زمان برای نمونه‌برداری هنگامی است که بر اثر بارندگی زیاد کرم‌ها برای تنفس به سطح خاک می‌آیند. برای نمونه‌برداری کرم‌های خاکی که در فصل بهار روز ۲۷ خردادماه بود و روزهای قبل بارندگی اتفاق افتاده بود، از روش دستی استفاده شد. در این روش نخست خاک‌های منطقه مد نظر را با استفاده از بیلچه زیر و روکرده و کرم‌های خاکی را از لابه لای خاک‌ها جدا و سپس برای انجام آزمایش‌های مربوطه نمونه‌های جمع‌آوری‌شده به آزمایشگاه منتقل شدند. مجموع ۱۶ ایستگاه در چهار جهت انتخاب شد (توضیح اینکه هشت ایستگاه در جهت شمال، چهار ایستگاه غرب، شرق و جنوب هر کدام دو ایستگاه) و در هر ایستگاه سه نمونه کرم برداشت شد. نمونه جمع‌آوری‌شده با استفاده از آب مقطر چند بار شستشو داده شدند تا آلودگی و ذرات خاک چسبیده به آنها شسته شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و درنهایت با هاون تبدیل به پودر شدند. ۲ گرم از نمونه‌های پودر شده کرم‌های خاکی با نسبت ۴:۱ HNO_3: $HCLO_4$ (۸ میلی‌لیتر HNO_3 و ۲ میلی‌لیتر $HCLO_4$) ترکیب شده و به مدت یک ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت سه ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد هضم شدند. سپس پس از فیلتر کردن نمونه‌ها به وسیله‌ی کاغذ صافی واتمن ۴۲ میکرون، توسط آب مقطر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانیده شد و برای آنالیزهای بعدی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (۳۸). برای کنترل کیفیت آنالیزها سه نمونه شاهد بلنک نیز در کنار سایر نمونه ها هضم شد.

فاکتور تجمع زیستی

فاکتور تجمع زیستی (BAF) توانایی کرم خاکی را در جذب فلزات سنگین از خاک و تجمع در بافت‌هایشان را نشان می‌دهد و از طریق معادله ۱ محاسبه شد (۶).

$$BAF = \frac{C_{\text{کرم خاکی}}}{C_{\text{خاک}}} \quad (۱)$$

$C_{\text{کرم خاکی}}$، مقادیر فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده در بافت‌های کرم خاکی (برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بافت). $C_{\text{خاک}}$، غلظت همان فلزات سنگین در خاک (برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک خاک).

تحلیل‌های آماری

برای انجام تحلیل های آماری از نرم‌افزار SPSS و Excel استفاده شد. ابتدا آماره‌های توصیفی (میانگین، میانه، کمینه، بیشینه، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی) برای فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. برای انجام آزمون نرمالیتی و بررسی تبعیت داده‌ها از باتوجه به تعداد نمونه از آزمون شاپیروویلک استفاده شد. برای بررسی همبستگی بین مقادیر غلظت فلزات سنگین در خاک و کرم خاکی از آزمون همبستگی اسپیرمن استفاده شد. برای مقایسه فلزات سنگین در جهت‌ها و فواصل مختلف از آزمون‌های ANOVA و کروسکال والیس استفاده شد.

نتایج

میانگین، کمینه و بیشینه غلظت کل فلزات سنگین در نمونه‌های خاک فلزات سنگین روی، مس، سرب، کروم و نیکل در جدول ۱ ارائه شده است. در این راستا میانگین غلظت فلزات‌سنگین خاک اطراف کارخانه سیمان آبیک (صرف نظر از فاصله و جهت) حاکی از آن بود که بیشترین و کمترین میانگین غلظت مربوط به نیکل و سرب به ترتیب به میزان ۱۳۵/۷۵(±۲۱/۶۹) و ۶/۳۴(۳±/۴۴) میلی‌گرم بر کیلوگرم است. علاوه بر این میزان میانگین، کمینه و بیشینه پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک مانند ماده آلی (۴/۷۸(±۲/۸۳)، ۱/۳۴، ۱۶/۴۰)، EC (۱۴۸/۶۹۳،۹۰/۰۱(۱.۸۲±/۴۷)، ۸۴۷۹) میکروزیمنس بر سانتی‌متر، pH (۷/۲۸(.±/۳۲)، ۶/۴۹، ۷/۸۳)، رس (۵/۱۴،۲۵/۰۸(±۶/۱۳)، ۲۹/۶۵) درصد، سیلت (۱۶/۱۳(±۵/۲۰)، ۵/۷۰، ۳۰/۱۵) درصد، و شن (۶۹/۷۸(±۹/۲۹)، ۵۲/۵۵، ۸۶/۸۵) درصد، دیده شد (جدول ۱).

نتایج مقایسه میانگین فلزات سنگین خاک از نظر فاصله از کارخانه آبیک

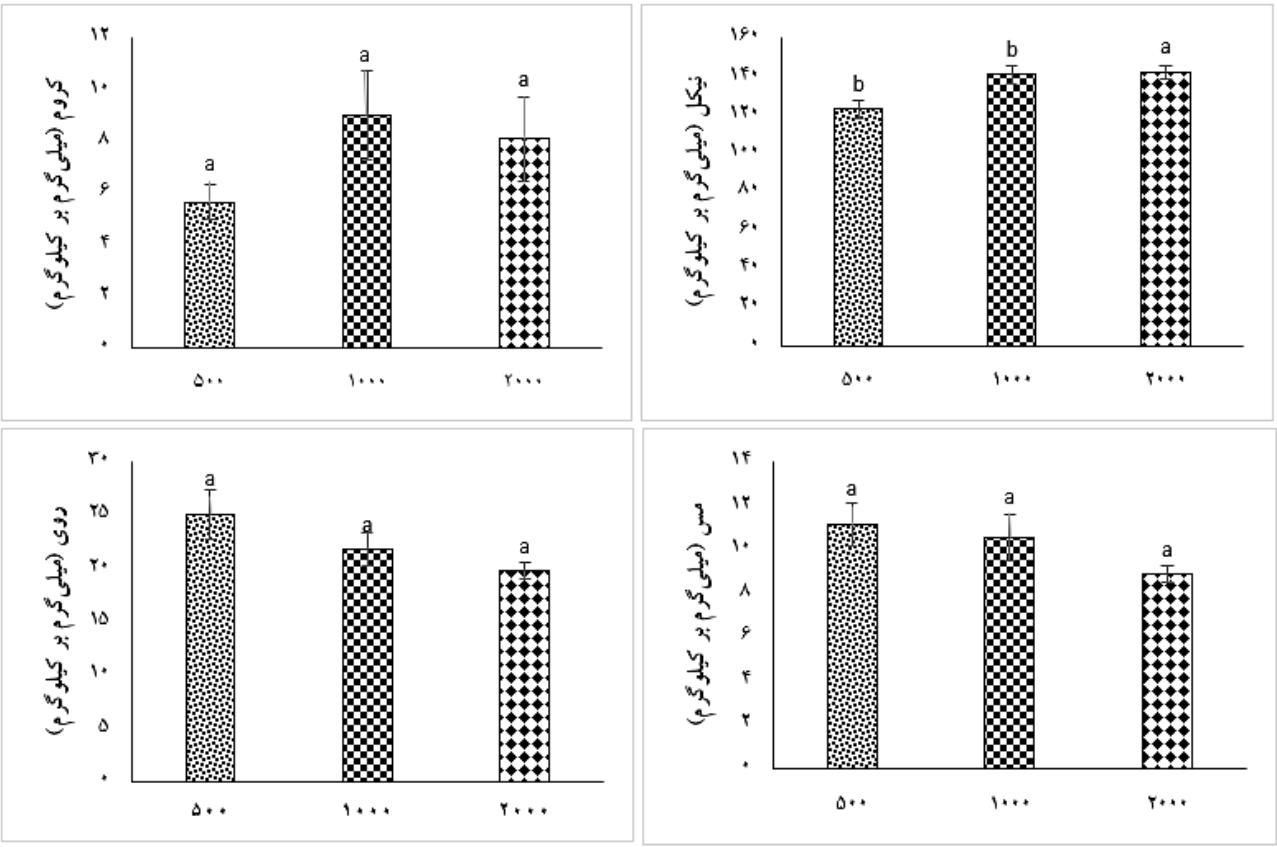
نتایج بررسی مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین خاک در فواصل مختلف (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری) از کارخانه سیمان آبیک با استفاده از آزمون کروسکال والیس و من ویتنی یو نشان داد (شکل ۲) که بین میانگین غلظت فلزات سنگین روی، مس، سرب و کروم در فواصل مختلف اختلاف آماری معناداری وجود ندارد، اما بین میانگین غلظت فلز نیکل خاک در فواصل مختلف اختلاف معنادار وجود دارد و غلظت این فلز تحت تاثیر فاصله از کارخانه سیمان قرار دارد ($p<۰/۰۵$). علاوه بر این نتایج مقایسه میانگین فلزات حاکی از آن است اگرچه از نظر آماری اختلاف معناداری بین میزان تجمع غلظت بیشترها فلزات در فواصل مختلف از کارخانه وجود ندارد، اما بیشترین میزان تجمع غلظت در فواصل ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از کارخانه یا نزدیک به آن بود.

مقایسه میانگین فلزات سنگین خاک در جهت جغرافیایی

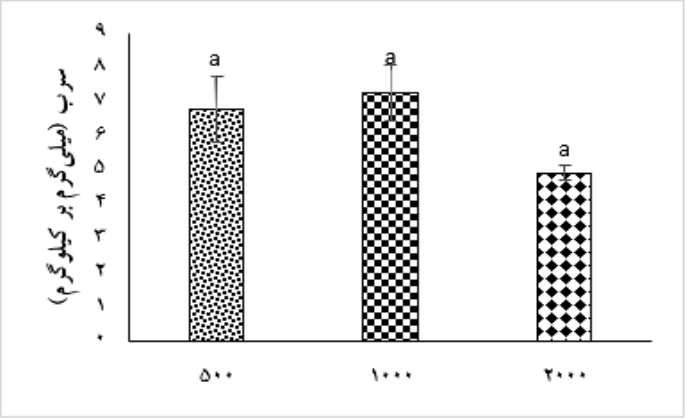
نتایج بررسی توزیع نرمالیته فلزات سنگین خاک از نظر جهت در اطراف کارخانه سیمان آبیک جدول ۳ ارائه شده است. یافته‌های بررسی تاثیر جهت جغرافیایی بر الگوی توزیع غلظت فلزات سنیگن با استفاده از آزمون کروسکال والیس در سطح یک درصد نشان داد که جهت جغرافیایی بر الگوی پراکنش غلظت فلزات سنگین مس، سرب، کروم و نیکل تاثیر معنی‌داری دارد (شکل ۳). نتایج مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین خاک در چهار جهت مختلف حاکی از آن بود که الگوی توزیع و تجمع غلظت فلز مس تحت تاثیر جهت جغرافیایی قرار گرفته است؛ به‌طوری که بیشینه مقادیر آن به میزان ۱۲/۱ و ۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب متعلق به جهت شمال و سپس جنوب و کمینه آن به میزان ۸/۱۹ و ۸/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب متعلق به شمال و شرق است (شکل ۳). بیشترین تجمع

جدول ۱. آمار توصیفی فلزات سنگین خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در اطراف کارخانه سیمان آبیک

فلزات	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
روی	۵/۸۸	۶۴/۳۱	۲۲/۲۰	۷/۶۹	۲/۶۸	۱۴/۱۵
مس	۵/۶۵	۲۳/۴۸	۱۰/۱۹	۳/۹۴	۱/۷۰	۲/۵۲
سرب	۳/۰۹	۱۷	۶/۳۴	۳/۴۴	۱/۷۲	۱/۸۲
کروم	۰/۰۴	۲۱/۹۳	۷/۶۳	۶/۵۶	۰/۵۱	-۱/۰۲
نیکل	۷۹/۶۴	۱۷۳/۸۸	۱۳۵/۷۵	۲۱/۶۹	-۰/۸۴	۰/۰۹
ماده آلی	۱/۳۴	۱۶/۴	۴/۷۸	۲/۸۳	۱/۷۷	۴/۳۰
EC	۱۴۸/۹	۸۳۷۹	۶۹۳/۰۱	۱۰۸۲/۴۷	۶/۱۳	۴۲/۹۵
pH	۶/۴۹	۷/۸۳	۷/۲۸	۰/۳۲	-۰/۶۵	-۰/۱۵
رس	۵/۲۵	۲۹/۶۵	۱۴/۰۸	۶/۱۳	۰/۵۵	-۰/۴۸
سیلت	۵/۷	۳۰/۱۵	۱۶/۱۳	۵/۲۰	۰/۵۶	۰/۷۶
شن	۵۲/۵۵	۸۶/۸۵	۶۹/۷۸	۹/۲۹	-۰/۰۹	-۰/۹۸



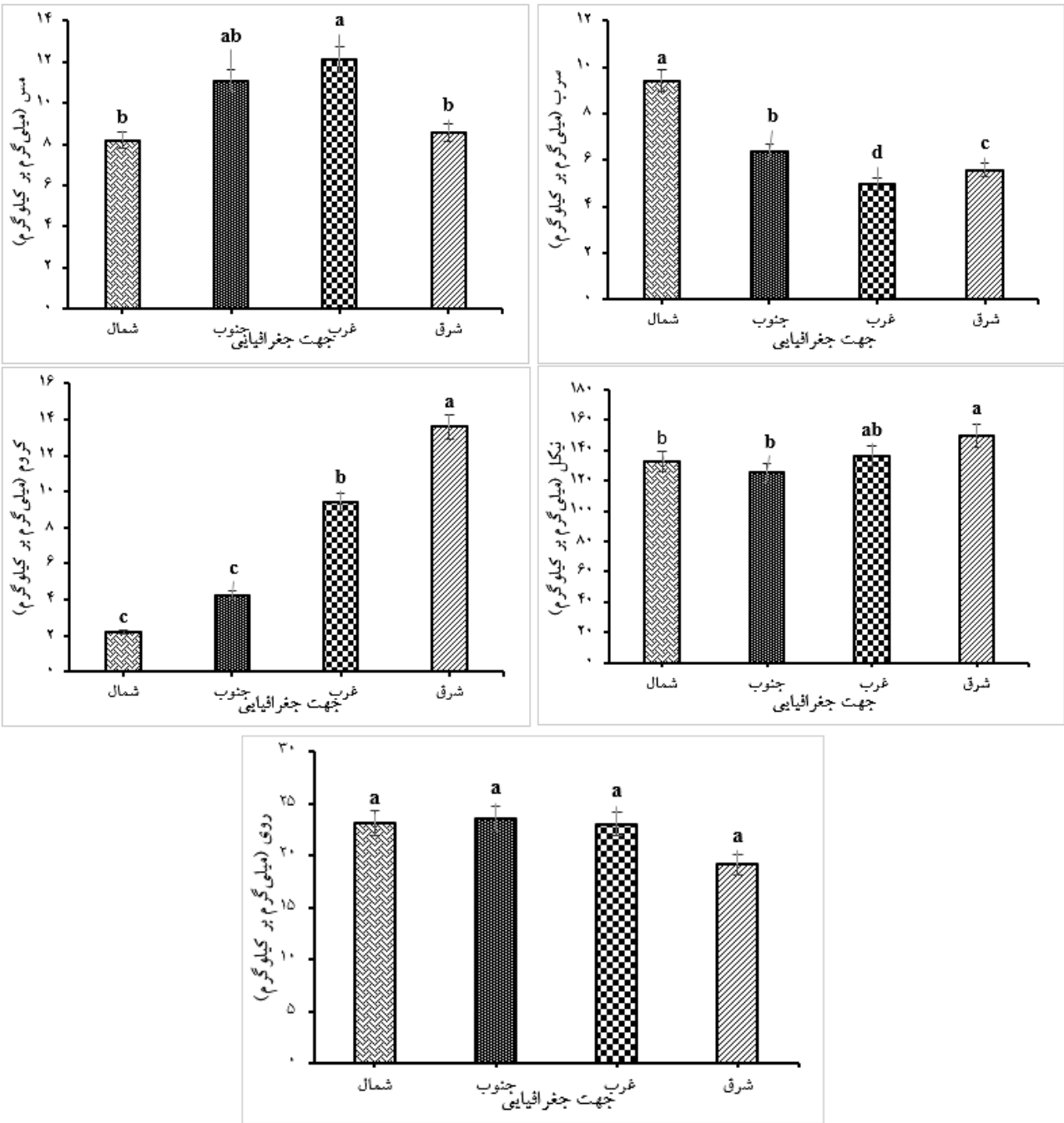
شکل۲ . مقایسه میانگین غلظت فلزات (روی، مس، نیکل، کروم و سرب) در خاک فواصل مختلف کارخانه سیمان آبیک



شکل۲ . مقایسه میانگین غلظت فلزات (روی، مس، نیکل، کروم و سرب) در خاک فواصل مختلف کارخانه سیمان آبیک (ادامه شکل ۲)

جدول ۳. نتایج بررسی توزیع نرمالیته فلزات سنگین خاک از نظر جهت در اطراف کارخانه سیمان آبیک

آزمون Shapiro-Wilk	فاصله	آماره	سطح معنی داری
روی	شمال	۰/۱۲۶	۰/۲
	جنوب	۰/۳۶۵	۰
	غرب	۰/۱۹۹	۰/۰۹
	شرق	۰/۲۰۵	۰/۰۷۱
مس	شمال	۰/۱۸۷	۰/۲
	جنوب	۰/۳۴	۰
	غرب	۰/۱۸۲	۰/۱۶
	شرق	۰/۱۶۴	۰/۲
سرب	شمال	۰/۱۶	۰/۲
	جنوب	۰/۴۲۴	۰
	غرب	۰/۳۱۶	۰
	شرق	۰/۱۷۳	۰/۲
کروم	شمال	۰/۳۰۵	۰/۰۰۵
	جنوب	۰/۲۸۸	۰
	غرب	۰/۲۳۲	۰/۰۲۲
	شرق	۰/۲۲۵	۰/۰۳
نیکل	شمال	۰/۲۶۵	۰/۰۲۹
	جنوب	۰/۱۱۹	۰/۲
	غرب	۰/۳۱	۰
	شرق	۰/۱۵۸	۰/۲



شکل ۳. مقایسه میانگین روی در جهات مختلف از کارخانه سیمان آبیک

فلز سرب در جهت‌های شمال – جنوب به ترتیب با میزان ۹/۴ و ۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم رخ داده است، کمترین میزان سرب با غلظت ۵ و ۵/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب در جهت غرب و شرق کارخانه دیده شد. برخلاف سرب، بیشترین میزان تجمع کروم در خاک با میزان ۱۳/۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم در جهت شرق رخ داده است، بین شمال و غرب از این نظر اختلاف معنی‌داری دیده نشد و از این نظر کمترین میزان را به خود اختصاص دادند. بیشترین میزان تجمع نیکل در جهت‌های شرق و غرب دیده شد. سپس در جهت‌های شمال و جنوب از میزان آن کاسته شد. با این حال در مقایسه با کروم نوسانات

نیکل خاک کمتر بود؛ به‌طوری که دامنه تغییرات کروم ۲/۲-۱۳/۵۸میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده، اما دامنه نوسانات نیکل حدوداً ۱۵۰-۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (شکل ۳).

غلظت فلزات سنگین کرم خاکی (*Eisenia Fetida*) در اطراف کارخانه سیمان آبیک

نتایج کمینه، بیشینه و میانگین غلظت فلزات سنگین کرم خاکی در خاک اطراف زمین‌های کارخانه سیمان آبیک (صرف نظر از فاصله و جهت) به‌ترتیب ۵۰/۸۴، ۷۰/۳۷ و ۵۷/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک کرم برای روی و ۴/۴۳، ۱۶/۶۵ و ۵۷/۵۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک برای مس، میانگین سرب به‌ترتیب برابر با ۳/۴، ۷/۵۱ و ۵/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک و برای نیکل به‌ترتیب ۸۲/۲۵، ۱۴۴/۴۵ و ۱۰۶/۱۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک و غلظت کروم موجود در کرم‌خاکی حاوی بیشترین میزان نوسان (از ۰/۷۱تا ۱۲/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) به دست آمد (جدول ۴).

همبستگی بین تجمع فلزات سنگین در کرم‌خاکی با مقادیر آنها در خاک و نیز ویژگی‌های خاک

نتایج بررسی توزیع نرمالیته کلیه متغیرهای مورد اندازه‌گیری (فلزات سنگین در خاک و کرم‌خاکی و خصوصیات خاک) در اطراف کارخانه سیمان آبیک به منظور بررسی نوع آزمون آماری (اعم پارامتریک یا ناپارامتریک بودن) در جدول ۵ و ۶ ارائه شده است. یافته‌های بررسی بین فلزات سنگین کرم‌خاکی با سایر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده شامل فلزات سنگین و پارامترهای فیزیکی – شیمیایی خاک (موادآلی، pH، EC و بافت خاک) با استفاده از آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که بین غلظت روی در کرم‌خاکی با غلظت مس در خاک رابطه منفی و معنی‌داری (سطح ۰/۰۵) و با pH رابطه مثبت و معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ وجود دارد (جدول ۶). نتایج نشان داد که بین غلظت مس در کرم‌خاکی با فلزات مس و سرب خاک به‌ترتیب با میزان ۰/۶۳ و ۰/۵۳ رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد؛ ولی بین غلظت مس در کرم‌خاکی با مشخصه‌های خاک همبستگی وجود نداشت ($p< ۰/۰۵$). گفتنی است که سرب کرم‌خاکی با هیچ یک از صفات مورد مطالعه در این پژوهش رابطه نداشت. همچنین غلظت کروم در کرم‌خاکی همانند سرب کرم‌خاکی مستقل از سایر مشخصه‌های مورد مطالعه بود و تنها با سیلت خاک رابطه مثبت و معنی‌داری به میزان ۰/۶۲ و در سطح ۰/۰۱ دارد. نتایج حاکی از آن است که غلظت نیکل در کرم خاکی نسبت به سایر فلزات یافت شده در کرم‌خاکی بیشترین رابطه را با سایر مشخصه‌های موجود دارد؛ به‌طوری که با روی خاک، سرب خاک، نیکل خاک و هدایت الکتریکی رابطه عکس در سطح ۰/۰۵ درصد دارد.

مقایسه میانگین فلزات سنگین کرم‌خاکی از نظر فاصله از کارخانه سیمان آبیک

نتایج مقایسه میانگین فلزات سنگین کرم‌خاکی در فواصل مختلف (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری) از کارخانه سیمان آبیک با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) نشان داد، بین مقادیر غلظت روی، مس و کروم در کرم‌خاکی در فواصل مختلف اختلاف معنادار آماری مشاهده نشده است ($P<۰/۰۵$)؛ اگرچه بین میزان تجمع این فلز در یافت گونه جانوری مورد مطالعه نوسانات اندکی از نظر غلظت فلزات یادشده در فواصل مختلف وجود داشت، ولی از لحاظ آماری معنی‌دار نیست. برای نمونه غلظت روی در کرم خاکی با افزایش فاصله از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر به ترتیب با میزان ۶۰ و ۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم از میزان آن کاسته شده است؛ اما این میزان به‌قدری نبوده است که از لحاظ آماری سبب تفاوت بین گروه‌ها شود. همچنین یافته‌ها نشان داد بین غلظت فلزات سرب و نیکل از نظر فاصله با کارخانه در بافت کرم خاکی تفاوت وجود دارد؛ به گونه‌ای که غلظت فلز سرب با افزایش فاصله از کارخانه از میزان آن در بافت کرم خاکی کاسته می‌شود؛ به‌طوری که بیشترین

جدول ۴. آمار توصیفی فلزات سنگین در کرم‌خاکی (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در اطراف کارخانه سیمان آبیک

فلزات	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
روی	۵۰/۸۴	۷۰/۳۷	۵۷/۵۱	۵/۷۸	۱/۱۲	۱/۵۳
مس	۴/۴۳	۱۶/۶۵	۹/۶۶	۳/۴۴	۰/۵۶	۰/۹۷
سرب	۳/۴	۷/۵۱	۵/۱۸	۱/۵۰	۰/۴۲	−۱/۴۵
کروم	۰/۷۱	۱۲/۵۵	۵/۴۶	۳/۷۶	۰/۳۷	−۰/۲۲
نیکل	۸۲/۲۵	۱۴۴/۴۵	۱۰۶/۱۷	۲۱/۶۷	۰/۷۰	−۰/۹۹

جدول ۵. نتایج بررسی توزیع نرمالیته کلیه متغیرهای مورد اندازه‌گیری (فلزات سنگین در خاک و کرم‌خاکی و خصوصیات خاک) در اطراف کارخانه سیمان آبیک

	آزمون شاپیروویلک	آماره	سطح معنی‌داری
کرم خاکی	روی	۰/۱۲	۰/۲
	مس	۰/۲۳	۰/۰۲۶
	سرب	۰/۱۸	۰/۱۴
	کروم	۰/۴۰	۰
	نیکل	۰/۱۷	۰/۲
خاک	روی	۰/۳۱	۰
	مس	۰/۲۹	۰/۰۰۱
	سرب	۰/۲۰	۰/۰۹۴
	کروم	۰/۲۱	۰/۰۶
	نیکل	۰/۱۵	۰/۲
	ماده آلی	۰/۱۵	۰/۲
	pH	۰/۱۲	۰/۲
	EC	۰/۴۰	۰
	رس	۰/۱۷	۰/۲
	سیلت	۰/۱۳	۰/۲
	شن	۰/۲۲	۰/۰۴

جدول ۶. آزمون همبستگی اسپیرمن بین خصوصیات و فلزات سنگین خاک با فلزات سنگین کرم خاکی

		کرم خاکی					خاک											
		روی	مس	سرب	کروم	نیکل	روی	مس	سرب	کروم	نیکل	ماده آلی	pH	EC	رس	سیلت	شن
کرم خاکی	روی	۱															
	مس	-۰/۴۱	۱														
	سرب	۰/۲	۰/۴۳	۱													
	کروم	-۰/۱۷	-۰/۲۴	-۰/۰۸	۱												
	نیکل	۰/۰۵	-۰/۱۳	-۰/۱۸	۰/۴	۱											
خاک	روی	۰/۰۶	۰/۰۴	-۰/۰۱	۰/۰۹	-۰/۵۸*	۱										
	مس	-۰/۵۱*	۰/۶۳**	۰/۳۷	-۰/۰۳	-۰/۱۳	۰/۲۳	۱									
	سرب	-۰/۳۳	۰/۵۳*	۰/۳۹	۰/۰۸	-۰/۵*	۰/۷۱**	۰/۶۴*	۱								
	کروم	۰/۲۶	-۰/۳۶	-۰/۳۰	-۰/۳۴	-۰/۴۴	۰/۳۹	-۰/۱۵	۰/۱۲	۱							
	نیکل	۰/۰۷	۰/۰۳	-۰/۲	-۰/۱۷	-۰/۵۵*	-۰/۳۲	۰/۲۳	-۰/۳۷	-۰/۲	۱						
	ماده آلی	-۰/۳۱	۰/۰۸	-۰/۱۳	-۰/۰۲	-۰/۴۵	۰/۳۷	۰/۱۳	۰/۲	-۰/۱۴	-۰/۳	۱					
	pH	۰/۵۹*	-۰/۲۹	۰/۲۸	-۰/۱۳	۰/۳۲	-۰/۳۷	-۰/۵۴	-۰/۵۶	-۰/۲۵	۰/۱۱	-۰/۱۷	۱				
	EC	۰/۰۹	-۰/۲۳	-۰/۱۱	۰/۱۳	-۰/۵۵*	۰/۷۰**	۰/۰۲	۰/۴۷	۰/۵۶*	-۰/۴۶	۰/۲۵	-۰/۳۹	۱			
	رس	۰/۴۹	-/۳۹۰	-۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۴۳	-۰/۵۴*	-۰/۷۱	-۰/۶۷	۰/۱	۰/۰۸	-۰/۵۷	۰/۶۲*	-۰/۴	۱		
	سیلت	۰/۰۸	-۰/۳۱	-۰/۰۱	۰/۶۲**	۰/۲۳	۰/۰۲	-۰/۳۷	-۰/۰۹	-۰/۲۱	-۰/۳۶	-۰/۱۸	۰/۱۵	-۰/۱۳	۰/۲۹	۱	
	شن	-۰/۳۶	۰/۴۳	-۰/۰۵	-/۳۸۰	-۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۶۲*	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۴۱	-۰/۵۶	۰/۳۱	-۰/۷۲	-۰/۸۳	۱

* همبستگی در سطح ۰/۰۵

** همبستگی در سطح ۰/۰۱

جدول ۷. نتایج بررسی توزیع نرمالیته فلزات سنگین در کرم‌خاکی از نظر فاصله در اطراف کارخانه سیمان آبیک

آزمون Shapiro-Wilk	فاصله	آماره	سطح معنی‌داری
روی	۵۰۰	۱	۰/۹۹
	۱۰۰۰	۰/۸۲	۰/۱۵
	۲۰۰۰	۱	۱
مس	۵۰۰	۱	۱
	۱۰۰۰	۰/۷۰	۰/۰۱
	۲۰۰۰	۱	۱
سرب	۵۰۰	۱	۰/۹۹
	۱۰۰۰	۰/۹۹	۰/۹۶
	۲۰۰۰	۱	۰/۹۸
کروم	۵۰۰	۱	۰/۹۹
	۱۰۰۰	۰/۹۷	۰/۸۴
	۲۰۰۰	۱	۰/۹۹
نیکل	۵۰۰	۱	۱
	۱۰۰۰	۰/۹۷	۰/۸۵
	۲۰۰۰	۱	۱

و کمترین میزان غلظت سرب با ۷ و ۳/۸ (میلی‌گرم در کیلوگرم) در فاصله ۵۰۰ و ۲۰۰۰ متری از کارخانه دیده شد. همچنین، از نظر غلظت نیکل در کرم‌خاکی، بیشترین میزان (۱۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) متعلق به فاصله‌های ۲۰۰۰ بود و کمترین میزان نیز متعلق به فواصل ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری بود که از لحاظ آماری بین این دو فاصله تفاوت معنی‌داری دیده نشد (شکل ۴).

مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در کرم خاکی در جهت جغرافیایی مختلف

نتایج توزیع نرمال فلزات سنگین در کرم‌خاکی از نظر جهت در اطراف کارخانه سیمان حاکی از نرمال بودن کلیه فلزات در چهار جهت بوده است؛ ازاین‌رو جهت تجزیه و تحلیل داده از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه استفاده شد. در این راستا نتایج مقایسه میزان تجمع غلظت فلزات سنگین کرم‌های خاکی جمع‌آوری‌شده در جهت‌های جغرافیایی مختلف (شمال، جنوب، غرب و شرق) از کارخانه سیمان آبیک با استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه در سطح معناداری ۹۹ درصد نشان داد (شکل ۵)، جهت جغرافیایی تاثیر معنی‌داری بر میزان تجمع غلظت فلزات سنگین مس، سرب و کروم در بافت کرم‌خاکی ندارد ($p>0/05$)؛ اما بر میزان تجمع غلظت فلزات روی و کرم فلزات در بافت گونه جانوری مورد مطالعه نیز تحت تاثیر جهت جغرافیایی مختلف قرار دارد. در این راستا نتایج نشان داد بیشترین تجمع روی در بدن کرم‌خاکی (۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در جهت غرب دیده شده؛ درحالی‌که جنوب و شرق از این نظر باهم تفاوت معنی‌داری نداشتند و برخلاف روی، بیشترین میزان تجمع نیکل در بدن کرم‌خاکی با میزان ۱۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در جهت شرق رخ داده است، بین جنوب و غرب از این نظر اختلاف معنی‌داری دیده نشد (شکل ۵).

نتایج فاکتور انباشت زیستی

نتایج بررسی دامنه فاکتور انباشت زیستی در جهات مختلف کارخانه سیمان آبیک حاکی از آن است بیشترین و کمترین دامنه تغییرات فاکتور انباشت زیستی برای کروم و مس ثبت شد. به طور کلی دامنه BAF برای فلزات سرب ، مس ، کروم و نیکل کمتر از یک گزارش شد (جدول ۸).

مقایسه غلظت فلزات سنگین در خاک با مقادیر استانداردهای جهانی و ملی

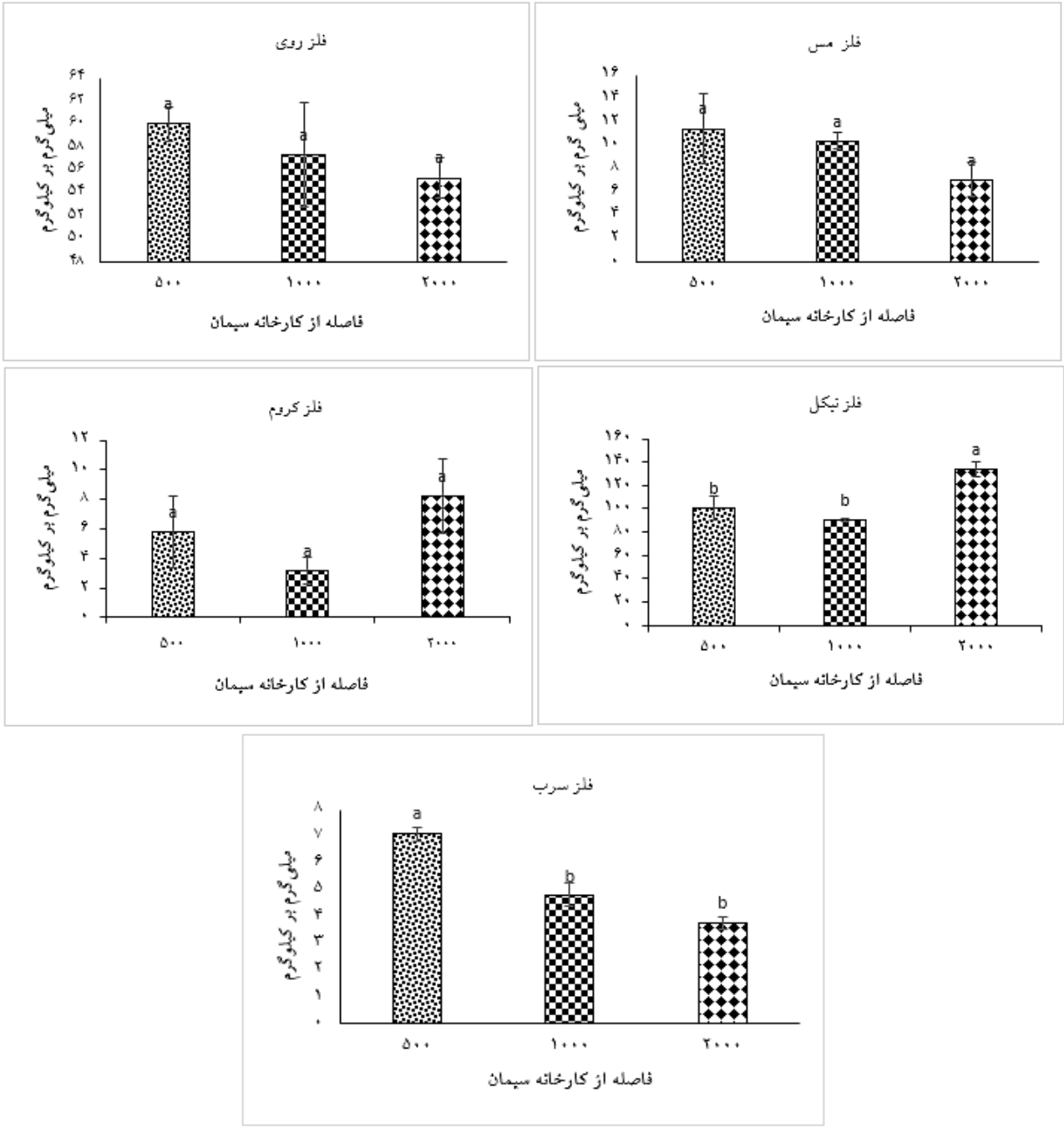
نتایج مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین خاک مناطق مختلف با میانگین شیل، پوسته زمین، غلظت استاندارد حفاظت محیط زیست ایران، EPA و WHO در جدول ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، میانگین غلظت فلز نیکل اندازه‌گیری‌شده در خاک اطارف کارخانه سیمان از میانگین پوسته زمین، میانگین شیل، استاندادرهای EPA و WHO نیز بیشتر بوده؛ اما از استاندارد محیط زیست ایران نیز کمتر بوده است. همچنین نتایج نشان داد میانگین غلظت چهار فلز روی، مس، سرب و کرم در خاک مورد مطالعه کمتر از میانگین شیل، پوسته زمین، استاندارد حفاظت محیط زیست ایران، EPA و WHO است.

بحث

به منظور بررسی نقش کارخانه سیمان بـر آلودگی فلزات سنگین در منطقه اثـر فاصله روی تجمع فلزات سنگین در خاک اطراف کارخانه مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا نتایج مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در فواصل سه‌گانه نشان داد که با افزایش فاصله، بر میزان نیکل خاک افزوده می‌شود؛ به‌طوری که بیشترین میزان نیکل خاک با مقدار ۱۴۲/۵ میلی‌گرم در فاصله ۲۰۰۰ متری از کارخانه دیده شد. کمترین میزان با مقادر ۱۲۳/۱ میلی‌گرم در فاصله ۵۰۰ متری از کارخانه دیده شد. از مهم‌ترین دلایل این موضوع می‌توان به تاثیر ارتفاع دودکش و بادهای غالب منطقه یا منشأ زمین شناسی اشاره کرد که توزیع و پراکنش آلاینده‌ها را تحت تاثیر خود قرار می دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده اثر فاصله از کارخانه سیمان بر تجمع فلز سنگین نیکل معنی‌دار شد که با نتایج دریواسی و همکاران (۸) و سلگی و همکاران (۳۰) مطابقت داشت. در مورد سایر فلزات سنگین اگرچه اثر فاصله معنی‌دار نبود، اما روند کاهشی با افزایش فاصله از کارخانه بر رفتار فلزات سنگین حاکم بود. بر این اساس در مورد فلز روی، مس و سرب کمترین مقدار غلظت فلزات سنگین در فاصله ۲۰۰۰ متر از کارخانه به دست آمد و روند کاهشی بر رفتار این فلزات با فاصله گرفتن از کارخانه حاکم بود. نتایج بـه‌دسـت‌آمـده گویای این واقعیت است که کارخانـه سـیمان مـی‌توانـد عاملی در این الگوی پراکنش فلزات باشد. این نتایج مشـابه آهیمادجی و همکـاران (۱)، آل–اوود وهمکاران (۳)، سلگی و خدابندلو (۲۹)، اولینکا و همکاران (۲۱)، پورخباز و همکاران (۲۲) و سلگی و همکاران (۲۸) اسـت. همچنـین آل– اوود و همکـاران (۳) با تعیین میزان غلظت فلزات سنگین در فواصـل ۵۰ ، ۲۰۰، ۸۰۰ و ۳۲۰۰ متری از کارخانه نشان دادنـد کـه میزان فلزات سنگینی چون Pb ، Cu و Zn بـا افـزایش فاصـله از کارخانه سیمان کاهش می‌یابد کـه بـا مطالعـه حاضر مطابقت دارد. وجود بادهای غالب گـاه از تـداوم حرکـت فلزات سنگین به نقاط مختلف جلوگیری می‌کند و تـه‌نشـینی ذرات خروجـی از دودکـش در نـواحی نزدیـک بیشتر است (۱۸). بر اساس نتایج حاصل فلز نیکل و کروم روندی صعودی با فاصله گرفتن از کارخانه نشان دادند که با نتایج سلگی و همکاران (۳۰) همخوانی دارد.

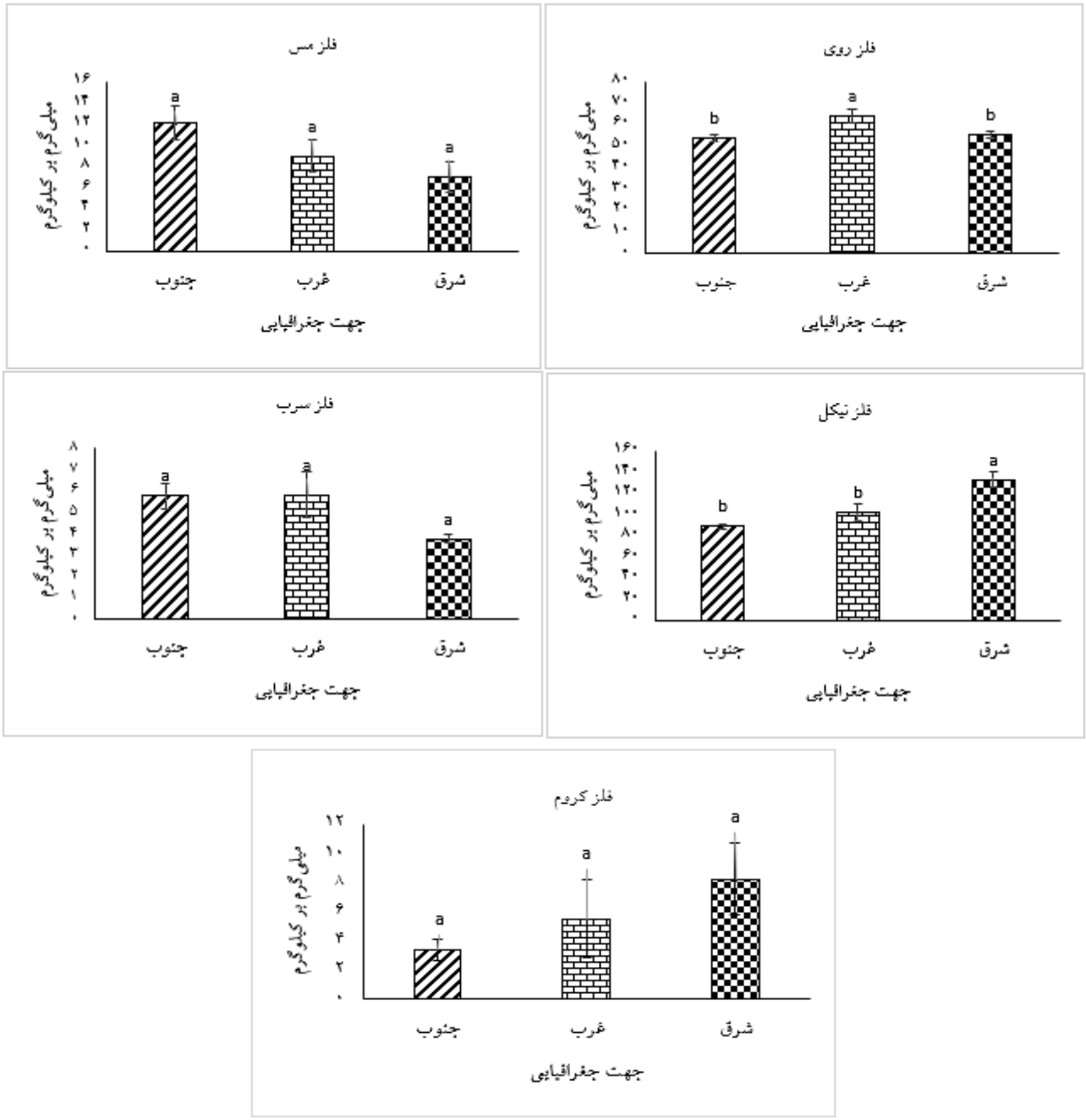
مقایسه میانگین فلزات سنگین خاک در جهت جغرافیایی

یافته‌های بررسی تأثیر جهت جغرافیایی بر الگوی توزیع غلظت فلزات سنگین نشان داد که جهت جغرافیایی بر الگوی پراکنش غلظت فلزات سنگین مس، سرب، کروم و نیکل تاثیر معنی‌داری دارد و الگوی توزیع و تجمع غلظت فلز مس تحت تأثیر جهت جغرافیایی قرار گرفته است؛ به‌طوری که بیشینه مقادیر آن به ترتیب متعلق به جهت شمال و سپس جنوب و کمینه آن به‌ترتیب



شکل ۴. مقایسه میانگین غلظت کروم در کرم‌خاکی در فواصل مختلف از کارخانه سیمان آبیک

متعلق به شمال و شرق است. بیشترین تجمع فلز سرب در جهت‌های شمال – جنوب رخ داده است و کمترین میزان به‌ترتیب در جهت غرب و شرق کارخانه دیده شد. برخلاف سرب، بیشترین میزان تجمع کروم در خاک در جهت شرق رخ داده است. بیشترین میزان تجمع نیکل در جهت‌های شرق و غرب دیده شد. سپس در جهت‌های شمال و جنوب از میزان آن کاسته شد. با این حال در مقایسه با کروم نوسانات نیکل خاک کمتر بود. نتایج این پژوهش نشان داد اثر جهت جغرافیایی بر غلظت فلزات سنگین در مورد مس، نیکل، کروم و سرب معنی‌دار بود که با نتایج پورخباز و همکاران (۲۲) و مسلم‌پور



شکل ۵. مقایسه میانگین غلظت نیکل در کرم‌خاکی در جهت‌های مختلف از کارخانه سیمان آبیک

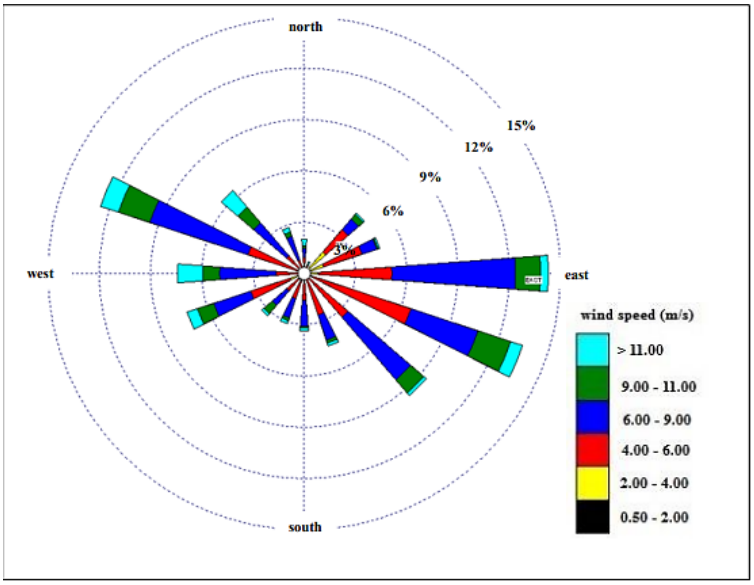
و شهدادی (۱۷) مطابقت نداشت. آنها کم‌بودن سرعت و درصد باد های غالب منطقه را عامل عدم تفاوت معنی‌دار غلظت فلزات سنگین در جهت‌های مختلف عنوان کردند؛ اما در پژوهش حاضر سرعت و درصد بادهای غالب منطقه زیاد بود. با توجه به اینکه تغییرات غلظت فلزات یک منطقه علاوه بر منشأ انسانی، می‌توانند تحت تأثیر منشأ یا ساختار زمین‌شناسی، عوامل محیطی و اقلیمی مانند جهت بادهای غالب و غیره قرار گیرد. این نتیجه قابل توجیه است و باد غالب منطقه (شکل ۶) احتمالاً می‌تواند موجب انتشار فلزات از شرق به غرب منطقه شده است. از سوی دیگر می‌توان فعالیت و آلایندگی کارخانهٔ

جدول ۸. نتایج فاکتورانباشت زیستی فلزات سنگین (BAF) در کرم‌خاکی در جهات مختلف کارخانه سیمان آبیک

جهت جغرافیایی	سرب	کروم	مس	روی	نیکل
شمال	–	–	–	–	–
جنوب	۰/۴۰	۰/۲۶	۰/۶۰	۱/۵۶	۰/۵۹
غرب	۰/۶۹	۰/۴۵	۰/۹۳	۲/۵۳	۰/۶۸
شرق	۰/۷۷	۰/۵۸	۰/۸۸	۲/۵۵	۰/۹۰

جدول ۹. نتایج مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین روی، مس، سرب، کروم و نیکل خاک اطراف کارخانه سیمان آبیک با استانداردهای مختلف

کاربری	روی	مس	سرب	کروم	نیکل
استاندارد خاک ایران (سازمان حفاظت محیط زیست)	۵۰۰	۴۰۰	۸۰	۱۱۰	۱۵۵
پوسته زمین	۷۵	۵۰	۱۴	۱۰۰	۸۰
میانگین شیل	۹۵	۴۵	۲۰	۹۰	۵۰
حد مجاز برای سلامتی انسان	۲۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۵۰	۱۰۰
EPA (۲۰۰۲)	۱۱۰۰	۵۰	۲۰۰	۱۱	۵۰
WHO (۱۹۹۳)	۳۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰
مطالعه حاضر	۲۲/۲۰	۱۰/۱۹	۶/۳۴	۷/۶۳	۱۳۵/۷۵



شکل ۶. گلباد سالانه منطقه آبیک (اداره کل هواشناسی استان قزوین)

سیمان همراه با فعالیت‌های کشاورزی و انتشارات ترافیکی، از دلایل تغیرات متفاوت آلودگی فلزات سنگین باشد. بیشترین مقدار سرب در جهت شمال منطقه اندازه‌گیری شد که باتوجه به وجود اتوبان کرج–قزوین در شمال منطقه مورد مطالعه این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد و منبع آلودگی سرب در این منطقه ترافیک این اتوبان است. سرب از جمله فلزات سنگینی است که توسط خودروها تولید شده و جریان ترافیکی موجب انتشار آن در محیط زیست می‌شود (۳۲).

نتایج بررسی بین فلزات سنگین کرم‌خاکی با سایر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده شامل فلزات سنیگن و پارامترهای فیزیکی – شیمیایی خاک (موادآلی، pH، EC و بافت خاک) حاکی از آن بود که بین غلظت روی در کرم‌خاکی با غلظت مس در خاک رابطه منفی و معنی‌داری و با pH رابطه مثبت و معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ وجود دارد. بین غلظت مس در کرم‌خاکی با فلزات مس و سرب خاک رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد، ولی بین غلظت مس در کرم‌خاکی با مشخصه‌های خاک همبستگی وجود نداشت. همچنین غلظت کروم در کرم‌خاکی همانند سرب کرم‌خاکی مستقل از سایر مشخصه‌های مورد مطالعه بود و تنها با سیلت خاک رابطه مثبت و معنی‌داری داشت. نتایج حاکی از آن است که غلظت نیکل در کرم خاکی نسبت به سایر فلزات یافت‌شده در کرم‌خاکی بیشترین رابطه را با سایر مشخصه‌های موجود دارد؛ به‌طوری که با روی، سرب، نیکل خاک و هدایت الکتریکی رابطه عکس دارد. به‌طوری آنچه که از نتایج برمی‌آید، مشخصه‌های خاکی از جمله بافت خاک تأثیر چندانی بر میزان فلزات در کرم‌خاکی نداشته است. به طور کلی در تبیین این نتایج می‌توان بیان کرد، سیسیانیت و همکاران (۶) در پژوهش خود با بررسی اثر کرم‌خاکی در خاک‌های آلوده نشان دادند پس از ۲۸ روز مقدار مس در بافت خاک به ۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسیده است. وینوت و همکاران (۳۴) نیز مقدار غلظت فلز مس داخل خاک و بافت کرم‌خاکی نزدیک بهم بوده است که مقدار آن به‌ترتیب برای کرم خاکی و خاک برابر بود با (۱/۰۳ و ۱/۶). لوونگوا و همکاران (۱۱) نشان دادند که مقدار فلزات سنگین در بافت کرم‌خاکی کمتر از خاک است (کرم‌خاکی< خاک). همچنین بین مس کرم‌خاکی با فلزات مس و سرب خاک به‌ترتیب با میزان ۰/۶۳ و ۰/۵۳ رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد. الیگیوو و همکاران (۱۰) نیز نشان دادند که در بیشتر نمونه‌ها سطوح فلزات در نمونه‌های کرم‌خاکی کمتر از سطوح فلزات در نمونه‌های خاک بود. ناهیدان و همکاران (۱۹) نشان دادند که حضور کرم‌خاکی باعث افزایش خصوصیات فیزیکی خاک می‌شود. غلظت نیکل در کرم خاکی نسبت به سایر فلزات یافت‌شده در کرم‌خاکی بیشترین همبستگی را با سایر مشخصه‌های موجود دارد؛ به‌طوری که با روی خاک، سرب خاک، نیکل خاک و هدایت الکتریکی رابطه عکس و معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد دارد. به طور کلی مشخصه‌های خاکی از جمله بافت خاک تأثیر چندانی بر میزان فلزات کرم‌خاکی نداشته است. رفیعی و همکاران (۲۳) نشان دادند که هیچ یک از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی به تنهایی بر میزان عناصر سنگین مورد مطالعه تاثیر مشخصی ندارند؛ اما اکسیدهای آلومینیم و آهن، مقدار رس، pH و به نسبت کم‌تر SiO_2، درصد ماسه و قابلیت تبادل کاتیونی (CEC) بیشترین تاثیر را بر جذب فلزات سنگین داشته‌اند.

نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه و مقایسات میانگین فلزات سنگین کرم‌خاکی از نظر فاصله از کارخانه آبیک نشان داد که بین فاصله‌های مختلف تفاوت معنی‌داری وجود دارد. به طور کلی این نتایج با یافته های پژوهش اولینکا و همکاران (۲۱) مبنی بر وجود تفاوت معناداری بین غلظت فلزات در کرم خاک با فاصله از کارخانه سیمان همسو است. آنها گزارش کردند با افزایش فاصله از میزان غلظت فلزات در کرم خاکی کاسته شده است. پورخباز و همکاران (۲۲) گزارش کردند مقادیر فلزات بر اساس تغییر مسافت از کارخانهٔ سیمان نوسان دارد؛ به‌طوری که میانگین غلظت بیشتر فلزات با افزایش فاصله از کارخانه کاهش می‌یابد که هم‌راستا در نتیجه پژوهش حاضر است. یکی از دلایل پراکنش فلزات توسط گردوغبار و ذرات معلق در هوا است. همچنین، از نظر نیکل کرم‌خاکی، بیشترین میزان (۱۳۳

میلی‌گرم در کیلوگرم) متعلق به فاصله های ۲۰۰۰ بود و کمترین میزان نیز متعلق به فواصل ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری دیده شد. سیستانی و همکاران (۲۷) به این نتیجه رسیدند در منطقه صنعتی اطراف کارخانه فولاد بیشترین غلظت مربوط به فلز سرب بوده و کمترین برای نیکل و کروم است. به‌طور کلی بیان داشتند غلظت سرب و عناصر دیگر به فاصله مرتبط است و ارتباط معناداری با فاصله دارند؛ طوری که نیکل در فاصله کمتر غلظت کمتری نیز دارد. شایسته‌فر و رضایی (۲۵) نشان دادند که با افزایش فاصله از منطقه صنعتی مقدار غلظت فلزات سرب و روی کم می‌شود و فلز نیکل غلظت بیشتری دارد. به طور کلی بیان کردند که غلظت عناصری مانند نیکل و سلنیوم در مناطق غیر آلوده بیشتر از مناطق آلوده هستند. سلگی و همکاران (۲۸) اشاره کردند که شاخص بار آلودگی تخمینی (PLI) خاک‌های اطراف کارخانه عملاً به فلزات آلوده نشده بودند. سلگی و خدابندلو (۲۹) در پژوهش خود اشاره کردند که تفاوت معنی‌داری در محتوای سرب و کادمیوم در فواصل مختلف از کارخانه دیده نشد. همچنین بیان کردند که بین مناطق نمونه‌برداری شمالی، جنوبی و غربی تفاوت معنی‌داری وجود دارد که بیشترین غلظت کادمیوم در خاک در جنوب وجود دارد. به طور کلی، تنوع، تعداد کل و زیست‌توده کرم‌های خاکی با افزایش فاصله از منابع انتشار افزایش یافت. وانگ و همکاران (۳۵) در پژوهش خود نشان دادند که تغییرات غلظت فلز روی و مس تحت تاثیر فاصله از منطقه صنعتی در نوسان بودند به‌طوری که هرچه فاصله بیشتر شود، از غلظت فلزات یادشده کاسته می شود. سلگی و همکاران (۲۸) اشاره کردند که الگوی فضایی کادمیوم نشان داد که انتشار کارخانه سیمان بر میزان کادمیوم خاک تأثیر دارد؛ زیرا بالاترین سطح در منطقه نزدیک به کارخانه سیمان است. به طور کلی در تبیین این یافته‌ها می‌توان بیان کرد عوامل مختلفی اعم از فاصله از کارخانه، ویژگی‌های خاک‌شناسی، میزان تجمع فلزات در خاک، میزان و جهت باد غالب بر توزیع و میزات تجمع فلزات خاک و در نتیجه زیست‌مندان خاکی مانند کرم خاکی مور هستند.

نتایج مقایسه میزان تجمع غلظت فلزات سنگین کرم‌های خاکی جمع‌آوری‌شده در جهت‌های جغرافیایی مختلف (شمال، جنوب، غرب و شرق) از کارخانه سیمان آبیک حاکی از بود جهت جغرافیایی تاثیر معنی‌داری بر میزان تجمع غلظت فلزات سنگین مس، سرب و کروم در بافت کرم‌خاکی ندارد؛ اما بر میزان تجمع غلظت فلزات روی و کرم فلزات در بافت گونه جانوری مورد مطالعه نیز تحت تاثیر جهت جغرافیایی مختلف قرار دارد. به طور کلی در تبیین این یافته‌ها می‌توان بیان کرد که اولینکا و همکاران (۲۱) نشان دادند که جهت جغرافیایی بر غلظت فلزات سنگین در کرم خاکی تاثیرگذار است؛ به طوری که در مطالعه خود نشان دادند که غلظت روی، مس و سرب در جهت شمالی نسبت به سایر جهت‌ها بیشترین مقدار را به خود اختصاص دادند. همچنین عناصر یادشده موجود در خاک نیز در جهت شمالی کارخانه سیمان WAPCO بیشتر از سایر جهت‌ها بود و نتیجه گرفتند که افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک سبب افزایش فلزات سنگین در کرم خاکی می‌شود و بیان کردند کرم خاکی به عنوان شاخص زیستی و پاکسازی فلزات سنگین در خاک نقش اساسی می‌تواند داشته باشد.

نتایج بررسی دامنه فاکتور انباشت زیستی در جهات مختلف کارخانه سیمان آبیک حاکی از آن است بیشترین و کمترین دامنه تغییرات فاکتور انباشت زیستی برای کروم و مس ثبت شد. نتایج این مطاله با نتایج لوکاری و همکاران (۱۵) و لی‌یو و همکاران (۱۴) مطابقت دارد. آنها گزارش کردند فاکتور زیستی برای فلزات کروم، نیکل، اهن و سرب کمتر از یک بود. اصولاً عوامل مختلی بر میزان تجمع فلزات سنگین در بدن زیست‌مندان خاکی به خصوص کرم خاکی مختلف نقش دارد که از جمله این موارد می‌توان به تغییرات شیمیایی اتفاق‌افتاده در رفتارهای غذایی کرم‌های خاکی بوده موجب تغییر در میزان دستیابی فلزات (مکانیسم‌های موجود در بدن کرم خاکی سبب کاهش جذب فلزات سنگین در بافت‌های خود می‌شوند) و بنابراین بازگشت بیشتر فلزات به خاک و درنتیجه باعث می‌شود تا گیاهان

دستیابی بیشتر برای جذب فلزات پیدا کنند (۲۱). همچنین فرایند معدنی‌شدن فلزات سنگین تجمع‌یافته در بافت کرم خاکی مرده در محیط آلوده به فلزات سنگین، موجب آزاد شدن و درنتیجه بازگشت مجدد این فلزات به خاک محل زندگی کرم‌های خاکی می‌شود (۱۳). گفتنی است که تنها شاخص BAF برای عنصر روی بیشتر از یک با دامنه ۲/۵۵-۱/۵۶ به دست آمد. به عبارتی دیگر، کرم خاکی مقدار بیشتری از این فلز روی را از خاک جذب و در بافت خود انباشته کند که همین امر سبب افزایش BAF بیشتر از یک شد. نتایج این مطالعه مشابه نتایج ایورمیلا و همکاران (۳۳) و مورگان و همکاران (۱۶) بود. نتایج این پژوهشگران نشان داد که BAF کرم خاکی برای فلز روی بزرگتر از یک بود. در مطالعه دیگر، رحیمی و همکاران (۲۴) در بررسی اثر غلظت فلزهای سنگین در لجن فاضلاب بر فاکتور BAF، هم‌راستا با نتایج پژوهش پیش‌رو، بیان داشتند که کرم خاکی توانایی جذب روی و کادمیوم را در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین دارد؛ به‌طوری که BAF بیشتر از یک محاسبه شد.

نتیجه‌گیری

هدف مطالعه حاضر بررسی غلظت فلزات سنگین در کرم خاکی (Eisenia Fetida) و خاک‌های اطراف کارخانه سیمان آبیک استان البرز در فواصل و جهت جغرافیایی مختلف و همچنین ارزیابی پتانسیل کرم خاکی به عنوان یک شاخص زیستی برای پایش غلظت فلزات سنگین در خاکهای اطراف کارخانه بود. در این راستا بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کارخانه سیمان آبیک را می‌توان به‌عنوان منبع آلودگی فلزات خاک در زمین های منطقه مورد مطالعه دانست؛ به‌طوری که باعث افزایش غلظت مس، نیکل، کروم، سرب و روی در خاک این منطقه شده است. علاوه بر این الگوی پراکنش فلزات سنگین در اطراف کارخانه به صورت همگن نبوده است و فاصله و جهت جغرافیایی از عوامل تأثیرگذار بر پراکنش فلزات سنگین در اطراف کارخانه بودند؛ به گونه‌ای اثر فاصله تنها درمورد فلز نیکل و اثر جهت برای همه فلزات سنگین به جز روی از نظر آماری معنی‌دار بود. همچنین نتایج حاکی از آن بود که غلظت نیکل خاک نسبت به سایر فلزات سنجش‌شده در کرم‌خاکی بیشترین رابطه را با سایر مشخصه‌های خاک دارد؛ به‌طوری که با روی، سرب و نیکل خاک و هدایت الکتریکی رابطه عکس دارد؛ بنابراین مشخصه‌های خاکی از جمله بافت خاک تاثیر چندانی بر میزان فلزات در کرم‌خاکی نداشته است. شاخص BAF حاکی از آن بود که نسبت تجمع فلزات سرب، نیکل، مس، کروم در کرم خاکی در مقایسه با خاک کمتر از یک است؛ اما مقدار آن برای فلز روی بیشتر از یک برآورد شد. به طور کلی از محدودیت‌های مهم پژوهش حاضر عدم سنجش برخی از ویژگی خاک‌شناسی کلیدیِ اثرگذار بر تحرک فلزات (مانند کربنات، ظرفیت تبادل کاتیونی و اکسیدهای آهن/منگنز) است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که کرم‌خاکی پتانسیل آن را دارد تا به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای شاخص زیستی آلودگی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت دانشگاه ملایر انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می شود.

منابع مورد استفاده

References

1. Ahiamadjie, H., A. Tandoh, J.B. Gyampo, O. Nyarku, M. Mumuni, I.I. Agyemang, O. Ackah, M. Otoo and S.B. Dampare. 2011. Determination of the elemental contents in soils around Diamond Cement Factory, Aflao. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 3(1): 46-50.

2. Alamgir, M. 2016. The effects of soil properties to the extent of soil contamination with metals. PP. 1-19. *In*: Hasegawa, H., Rahman, I., Rahman, M (Eds.), Environmental remediation technologies for metal-contaminated soils, Springer, Tokyo.
3. Al-Oud, S.S., M.E.A. Nadeem and B.H. Al-Shbel. 2011. Distribution of heavy metals in soils and plants around a cement factory in Riyadh city, central of Saudi Arabia. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science* 11(2): 183-191.
4. Atuchin, V.V., L.K. Asyakina, Y.R. Serazetdinova, A.S. Frolova, N.S. Velichkovich and A.Y. Prosekov. 2023. Microorganisms for bioremediation of soils contaminated with heavy metals. *Microorganisms* 11(4): 864.
5. Azhar, U., H. Ahmad, H. Shafqat, M. Babar, H.M.S. Munir, M. Sagir, M. Arif, A. Hassan, N. Rachmadona, S. Rajendran and M. Mubashir. 2022. Remediation techniques for elimination of heavy metal pollutants from soil: A review. *Environmental Research* 214: 113918.
6. Česynaitė, J., M. Praspaliauskas, N. Pedišius and G. Sujetovienė. 2021. Biological assessment of contaminated shooting range soil using earthworm biomarkers. *Ecotoxicology* 30: 2024-2035.
7. Chen, G., J. Fan, Y. Xu, P. Su, M. Yao, X. He, C. Zhang, P. Gao and L. Zhu. 2025. Meta-analysis of endocrine-disrupting chemical effects on earthworm functional traits. *Environmental Research* 272: 121208.
8. Darivasi, S., K. Saeb and M. Mollashahi. 2016. Effects of distance from pollutant sources on heavy metal concentrations around Neka cement factory soil. *Journal of Environmental Science and Technology* 17(4): 34-46.
9. Edwards, C.A. 2004. The importance of earthworms as key representatives of the soil fauna. PP. 3-11. *In*: Edwards (Ed.). Earthworm ecology, CRC Press, Boca Raton.
10. Elaigwu, S.E., V.O. Ajibola and F.M. Folaranmi. 2007. Earthworm (*Eudrilus eugenia* Kinberg) as bio-indicator of the heavy metal pollution in two municipal dump sites of two cities in northern Nigeria. *Research Journal of Environmental Sciences* 1(5): 244-250.
11. Iorungwa, M.S., R.A. Wuana and S.G. Yiase. 2013. Comparative assessment of levels of heavy metals in earthworm casts and soils at contaminated sites. *International Journal of Science and Technology* 2(4): 320-325.
12. Jacob, c.,and B. Clarke. 2002. Methods of soil analysis: Part 4 physical methods. Pp. 255.293. *In*: Jacob H. Dane and G. Clarke Topp (Eds.). SSSA Book Series. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America.
13. Kokhia, M., M. Lortkipanidze, O. Gorgadze, M. Kuchava and D. Nebieridze. 2022. Earthworms (Oligochaeta: Lumbricidae) and heavy metals: content and bioaccumulation in the body. *Journal of Agricultural Science* 1: 95-100.
14. Liu, H., H. Wang, H. Zhao, H. Wang, R. Xia, X. Wang and J. Zhou. 2024. Speciation, bioaccumulation, and toxicity of the newly deposited atmospheric heavy metals in soil-earthworm (*Eisenia fetida*) system near a large copper smelter. *Science of the Total Environment* 924: 171700.
15. Lukkari, T., S. Teno, A. Väisänen and J. Haimi. 2006. Effects of earthworms on decomposition and metal availability in contaminated soil: microcosm studies of populations with different exposure histories. *Soil Biology and Biochemistry* 38(2): 359-370.
16. Maraun, M., J. Alphei, M. Bonkowski, R. Buryn, S. Migge, M. Peter, M. Schaefer and S. Scheu. 1999. Middens of the earthworm *Lumbricus terrestris* (Lumbricidae): microhabitats for micro- and mesofauna in forest soil. *Pedobiologia* 43: 276-287.
17. Moslempour, M.E. and S. Shahdadi. 2013. Assessment of heavy metal contamination in soils around of Khash Cement Plant, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 5(1): 111-118.
18. Mousavi, M., M. Pournia and F. Amiri. 2013. Distribution of heavy metals in agricultural soils around Karun Cement Factory, southeast of Masjed Soleiman. *Geochemistry* 1(3): 226-215.
19. Nahidan, S., M. Faryadras and V. Dorostkar. 2020. The effect of earthworm and application of cow manure and its biochar on aggregate associated carbon and some soil physical properties. *Agricultural Engineering* 43(3): 365-387.
20. Nfor, B., P.B.A. Fai, S.A. Tamungang, J.N. Fobil and N. Basu. 2022. Soil contamination and bioaccumulation of heavy metals by a tropical earthworm species (*Alma nilotica*) at informal e-waste recycling sites in Douala, Cameroon. *Environmental Toxicology and Chemistry* 41(2): 356-368.
21. Olayinka, O.T., A.B. Idowu, G.A. Dedeke, O.A. Akinloye, K.O. Ademolu and A.A. Bamgbola. 2012. Earthworm as bio-indicator of heavy metal pollution around Lafarge, Wapco cement factory, Ewekoro, Nigeria. *Colerm Proceedings* 2: 488-495.
22. Pourkhabbaz, H.R., S. Javanmardi, H. Yusefnia, M. Eslami, S. Makrouni and H. Aghdar. 2016. Environmental evaluation of heavy metals contamination in soils around the cement factory in Behbahan City. *Geography and Environmental Planning* 27(3): 87-106.
23. Rafiei, B., F. Aliani and M. Farshbaf. 2012. Assessment of heavy metal pollution in the surrounding area of the cement and smelting factories, SE Tehran, and its relationship to physico-chemical soil parameters. *New Findings in Applied Geology* 5(9): 30-37.

24. Rahimi, G. and E. Ebrahimi. 2021. Investigating the effect of concentration of heavy metals in the soil on the bioaccumulation factor and survival of *Eisenia foetida*. *Journal of Animal Research (Iranian Journal of Biology)* 34(3): 156-165.
25. Shayestefar, M. and A. Rezaei. 2013. The study of environmental behavior and the investigation of heavy metals distribution in the soils of the Sarcheshmeh copper mine area of Kerman. *Journal of Mining Engineering* 8(18): 13-21.
26. Sinkakarimi, M.H., E. Solgi and A.C. Hosseinzadeh. 2017. Cadmium and lead effects on viability, lipid peroxidation and total antioxidant capacity levels in *Eisenia fetida*. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences* 27(149): 28-39.
27. Sistani, N., M. Moeinaddini, N. Khorasani, A. Hamidian, M. Ali-Taleshi and R. Yancheshmeh. 2017. Heavy metal pollution in soils nearby Kerman steel industry: metal richness and degree of contamination assessment. *Iranian Journal of Health and Environment* 10(1): 75-86.
28. Solgi, E. 2015. An investigation on Cd and Pb concentrations of soils around the Kurdistan cement factory in Western Iran. *Journal of Chemical Health Risks* 5(3): 179-191.
29. Solgi, E. and H. Khodabandelo. 2016. Cadmium and lead disruption in soils around the Hegmatan cement factory, Iran. *Health Scope* 5(2): 1-7.
30. Solgi, E., F. Beigmohammadi and A. Zamanian. 2020. Application of pollution indices to investigate of heavy metals sequestration in soil (Case study of Nahavand Cement Factory). *Applied Soil Research* 8(3): 188-201.
31. Solgi, E., M. Keramaty and M. Solgi. 2020. Biomonitoring of airborne Cu, Pb, and Zn in an urban area employing a broad leaved and a conifer tree species. *Journal of Geochemical Exploration* 208: 106400.
32. Tabibian, S., S. Bidarigh and S.Y. Torabian. 2019. Investigation on the adsorption of heavy metal in lead in a plane species in traffic areas in Rasht. *Human and Environment* 17(4): 39-46.
33. Urmila, R.K., S. Sharma, and R. Kumar. 2025. Earthworms: The Environmentally Preferred Bioengineers for Managing Heavy Metals. PP. 365-384. *In*: Dey, S. and Bhattacharya, S. (Eds.). Biotechnological Interventions in the Removal of Emerging Pollutants, Springer Nature, Singapore.
34. Vinoth, A., R. Kalaivani and R. Selvasundaram. 2014. Heavy metal identification in different agroecosystem by using earthworm. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3(7): 745-748.
35. Wang, K., Y. Qiao, H. Zhang, S. Yue, H. Li, H. Ji and L. Liu. 2018. Bioaccumulation of heavy metals in earthworms from field contaminated soil in a subtropical area of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 148: 876-883.
36. Wu, C., F. Li, S. Yi and F. Ge. 2021. Genetically engineered microbial remediation of soils co-contaminated by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: advances and ecological risk assessment. *Journal of Environmental Management* 296: 113185.
37. Yadav, R., R. Kumar, R.K. Gupta, T. Kaur, A. Kour, S. Kaur and A. Rajput. 2023. Heavy metal toxicity in earthworms and its environmental implications: A review. *Environmental Advances* 12: 100374.
38. Yap, C.K., A. Ismail and S.G. Tan. 2004. Heavy metal (Cd, Cu, Pb and Zn) concentrations in the green-lipped mussel *Perna viridis* (Linnaeus) collected from some wild and aquacultural sites in the west coast of Peninsular Malaysia. *Food Chemistry* 84(4): 569-575.