ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک کشاورزی آبیاری شده با آب رودخانه خیاوچای- مشگین‌شهر، استان اردبیل

همت نصیری مویلی، عطا شاکری*، میثم رستگاری مهر
دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ علوم زمین
دریافت ۱۳۹۹/۰۶/۰۱ پذیرش ۱۴۰۰/۰۵/۲۴

چکیده

آلودگی خاک چه ناشی از عوامل طبیعی و چه انسانی، کیفیت محیط زیست را کاهش می‌دهد. هدف این پژوهش ارزیابی آلودگی خاک‌های زراعی مشگین‌شهر با استفاده از شاخص زمین‌شیمیایی و روش‌های آماری است. برای این منظور ۱۴ نمونه خاک از زمین‌های کشاورزی تحت آبیاری رودخانه خیاوچایی در مشگین‌شهر جمع‌آوری، و غلظت عناصر آرسنیک، کبالت، کروم، مس، آهن، منگنز، فسفر، سرب و روی در نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده الایی تعیین شد. شاخص‌های زمین‌شیمیایی شامل شاخص زمین انباشت (Igeo)، عامل آلودگی (CF) و ضریب غنی‌شدگی (EF) همراه با تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) و ضریب هم‌بستگی پیرسون برای تعیین وضعیت و روند آلودگی خاک این منطقه استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت کل آرسنیک، سرب و روی در منطقه بررسی شده به‌ترتیب ۲۰/۰۹ mg/kg، ۱۷/۳۵، ۱۰۰/۸۵ است که این غلظت‌ها بیش‌تر از غلظت زمینه پوسته بود. نتایج محاسبه شاخص‌های زمین شیمیایی نشان‌دهندهٔ غنی‌شدگی زیاد آرسنیک در خاک منطقه‌است که به‌نظر می‌رسد در معدن آهن مویل به‌عنوان اصلی‌ترین منشأ این عنصر، به‌صورت ثانویه از چشمه‌های هیدروترمال در لیمونیت ته نشین شده است. هم‌چنین آبیاری زمین‌های زراعی با رودخانه خیاوچای با غلظت بالای آرسنیک عامل دیگری در آلودگی خاک به این عنصر است. براساس نتایج تحلیل‌های آماری، آرسنیک، آهن و سرب بیش از سایر عناصر تحت تأثیر معدن آهن مویل و منابع هیدروترمال قرار داشته و فسفر، مس و روی در منطقه از عوامل انسان‌زاد نیز ناشی می‌شوند. نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین برنامه‌های پایش و ارزیابی‌های زیست-محیطی و سلامت منطقه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، آرسنیک، شاخص‌های آلودگی خاک، مشگین‌شهر.

Investigation of Heavy Metals Pollution in Agricultural Soils Irrigated by Khiavchay River Water-Meshginshahr, Ardebil Province

Hemmat Nasiri Moili, Ata Shakeri*, Meisam Rastegari Mehr
Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University

Abstract

Soil pollution, whether by natural or anthropogenic factors, decreases the quality of environment. The aim of this study is assessing agricultural soils'contamination in Meshginshahr using geochemical index and statistical methods. For this purpose, 14 soil samples were collected from farmlands irrigated by Khiavchay River in Meshginshahr, and concentration of As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, P, Pb and Zn were determined using Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS). Geochemical indices including geoaccumulation index (Igeo), contamination factor (CF) and enrichment factor (EF), along with principal component analysis (PCA) and Pearson's correlation

*نویسنده مسئول shakeri1353@gmail.com

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

coefficient were used to determine the pollution status of the study area. Results showed that mean concentrations of As, Pb and Zn in the study area were 20.09, 17.35 and 100.85 mg/kg which these concentrations are higher than baseline in Earth crust. The results of geochemical indices revealed high enrichment of As in soils of the study area, which it seems that As is precipitated from hydrothermal springs in limonite minerals of Moil iron mine as the main source of this element. Also, irrigating the farmlands by Khiavchay River (with high As concentration) is the other factor in As contamination in soils. Based on the results of statistical analysis, As, Fe and Pb were affected by Moil iron mine and hydrothermal sources more than other studied elements, and P, Cu and Zn were affected by anthropogenic sources in the study area. The results of this study may be used to develop monitoring programs and environmental and health assessment of the area.

Keywords: Heavy metals, Arsenic, Soil pollution indices, Meshginshahr

مقدمه

آلودگی را می‌توان به‌صورت تغییرات نامطلوب فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب، خاک و هوا تعریف کرد که بر زندگی بشر، گیاهان و جانوران مرتبط با آنها، فرایندهای صنعتی و سرمایه‌های فرهنگی اثرگذار است (طلایی و همکاران، ۱۳۹۸). منابع آلودگی، اساسا به دو گروه زمین‌زاد و انسان‌زاد تقسیم‌بندی می‌شوند. منابع زمین‌زاد شامل آلودگی‌های ناشی از سازندهای زمین‌شناسی، اندیس‌های معدنی، چشمه‌های معدنی، منابع آب‌شور و لب‌شور است و از آلودگی‌های انسان‌زاد می‌توان به فعالیت‌های صنعتی، حمل و نقل، مصرف کودهای کشاورزی، فعالیت‌های معدنکاری و پسماندها و پساب‌ها اشاره کرد (Misra et al., 2009). عوامل مهم در تهدید سلامت خاک شامل فرسایش، کاهش ماده آلی و تنوع زیستی، آلودگی فلزات سنگین، شوری خاک و رانش زمین است (Andrews & Carroll, 2001). نگرانی عمده در مورد فلزات سنگین به‌علت منابع گسترده انتشار آنها، سمیت و پایداری آنها است (Islam et al., 2015). اگر چه خطر آلودگی خاک کم‌تر از دیگر آلودگی‌ها نیست، اما از آن‌جاکه این آلودگی ملموس نیست کم‌تر به آن توجه شده است (Hatami et al., 2015). بیش‌تر عناصر جزئی در غلظت‌های کم برای موجودات زنده ضروری هستند، با این حال مقادیر زیاد آنها در خاک آلوده، منجر به فروکاهی کیفیت خاک، کاهش محصول، و کاهش کیفیت مواد غذایی تولیدی می‌شود (Keshavarzi et al., 2015).

عناصر مغذی ضروری و فلزات دیگر موجود در مواد غذایی، از راه خاک وارد شبکه غذایی می‌شوند. غلظت طبیعی عناصر بالقوه سمی در خاک معمولاً کم است، مگر در مورد خاک‌هایی که از سنگ‌های کانه‌دار تشکیل شده باشند. مقدار عناصر جزئی خاک‌ها می‌تواند در اثر فعالیت انسانی نیز به‌شدت افزایش یابد (Siegel, 2002). منشأهای غیرنقطه‌ای و زمین‌زاد از مهم‌ترین منابع آلوده‌کننده هستند که در آنها عناصر مختلف در اثر هوازگی سنگ‌ها در محیط پراکنده می‌شوند. مناطق معدنی از جمله منابع غیر متمرکز آلودگی هستند که در آنها آزادسازی، تمرکز و تخلیه برخی از عناصر باعث ایجاد آلودگی در منابع خاک شده و در نهایت چرخه زیستی را نیز آلوده می‌سازند (Gruda, 2005).

در سال‌های اخیر، توسعهٔ صنعتی و کشاورزی در ایران رشد فزاینده‌ای داشته است و محققان مختلف به‌دنبال ارزیابی آلودگی در محیط بوده‌اند (خیرآبادای و همکاران، ۱۳۹۴). از این‌رو لازم است تا از مجموعه روش‌های مختلف کمی و کیفی ارزیابی آلودگی خاک استفاده شود تا درک بهتری از وسعت آلودگی به‌دست آید. با توجه به آلودگی رودخانه خیاوچای در منطقهٔ زمین‌گرمایی سبلان به‌وسیلهٔ منابعی مانند چشمه‌های طبیعی و معدن آهن مشگین‌شهر (Shakeri et al., 2020) و به‌دلیل آبیاری زمین‌های زراعی منطقه به‌وسیلهٔ این رودخانه، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آلودگی آرسنیک، کبالت، سرب، روی، مس، آهن، منگنز و کروم با استفاده از شاخص‌های زمین انباشت، عامل آلودگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی در خاک سطحی شهرستان مشگین‌شهر انجام شده است.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ بررسی شده

شهرستان مشگین‌شهر در شمال غربی ایران و در ۸۳۹ کیلومتری تهران و ۹۰ کیلومتری غرب شهرستان اردبیل واقع شده و از نظر مساحت دومین شهر بعد از مرکز استان اردبیل است. مشگین شهر با مساحت ۳۸۸۰ کیلومتر مربع ، ۲۲ درصد مساحت استان را تشکیل می‌دهد. این شهر در محدوده "55 '11 °38 و "00 '22 °38 عرض شمالی و "30 '38 °47 و"20 '48 °47 طول شرقی قرار دارد. بیش‌ترین بارش در ماه آبان ۶۰ میلی‌متر و کم‌ترین بارش در ماه مرداد کم‌تر از ۵ میلی‌متر در سال ۲۰۱۴ گزارش شده است. از نظر زمین‌شناسی محدودهٔ بررسی شده عمدتاً شامل جریان‌های گدازه‌ای تراکی آندزیت پلیوسن و پلیستوسن، داسیت، آندزیت، لاهار، توف و برش‌های پیروکلاستیک، و نهشته‌های آبرفتی کواترنری است (Shakeri et al., 2020) (شکل ۱).

نمونه برداری و تجزیه نمونه‌ها

در این پژوهش نقاط نمونه‌برداری با الگوی قضاوتی و با توجه به نوع کشت، منابع احتمالی آلاینده و شاخه‌های فرعی مهم ورودی به رودخانه انتخاب شدند. با توجه به اطلاعات ابتدایی موجود، در مجموع ۱۴ نمونه خاک (۰-۲۰cm) از زمین‌های کشاورزی که با آب رودخانه خیاوچایی آبیاری می‌شوند، برداشته شد. نمونه‌برداری از خاک با استفاده از بیلچه پلاستیکی انجام گرفت. در هر زمین تعداد ده نمونه خاک با الگوی زیگزاگی و گاها تصادفی برداشت و پس از ترکیب، به‌عنوان نمونه نماینده انتخاب شد. سپس نمونه‌ها شماره‌گذاری شد و به آزمایشگاه آماده‌سازی نمونه دانشکدهٔ علوم‌زمین دانشگاه خوارزمی منتقل شد. در آزمایشگاه نمونه‌ها در دمای اتاق خشک شد، سپس بخشی از آنها پس از عبور از الک ۲۳۰ مش برای هضم چهار اسید و تجزیه عنصری با طیف سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) به آزمایشگاه زرآزما ارسال شد. هم‌چنین فسفر نیز به‌دلیل ارتباط با جذب آرسنیک در خاک بررسی شد. شکل ۱ موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقهٔ بررسی شده را نشان می‌دهد.

روش‌شناسی تحلیل داده‌ها

روش‌های زمین‌شیمیایی متعددی در بررسی شدت آلودگی فلزات سنگین در خاک ورسوب استفاده می‌شود. در این پژوهش برای تعیین شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین از شاخص زمین انباشت (Igeo)، عامل آلودگی (CF) و عامل غنی شدگی (EF) استفاده شد.

الف) شاخص زمین انباشت

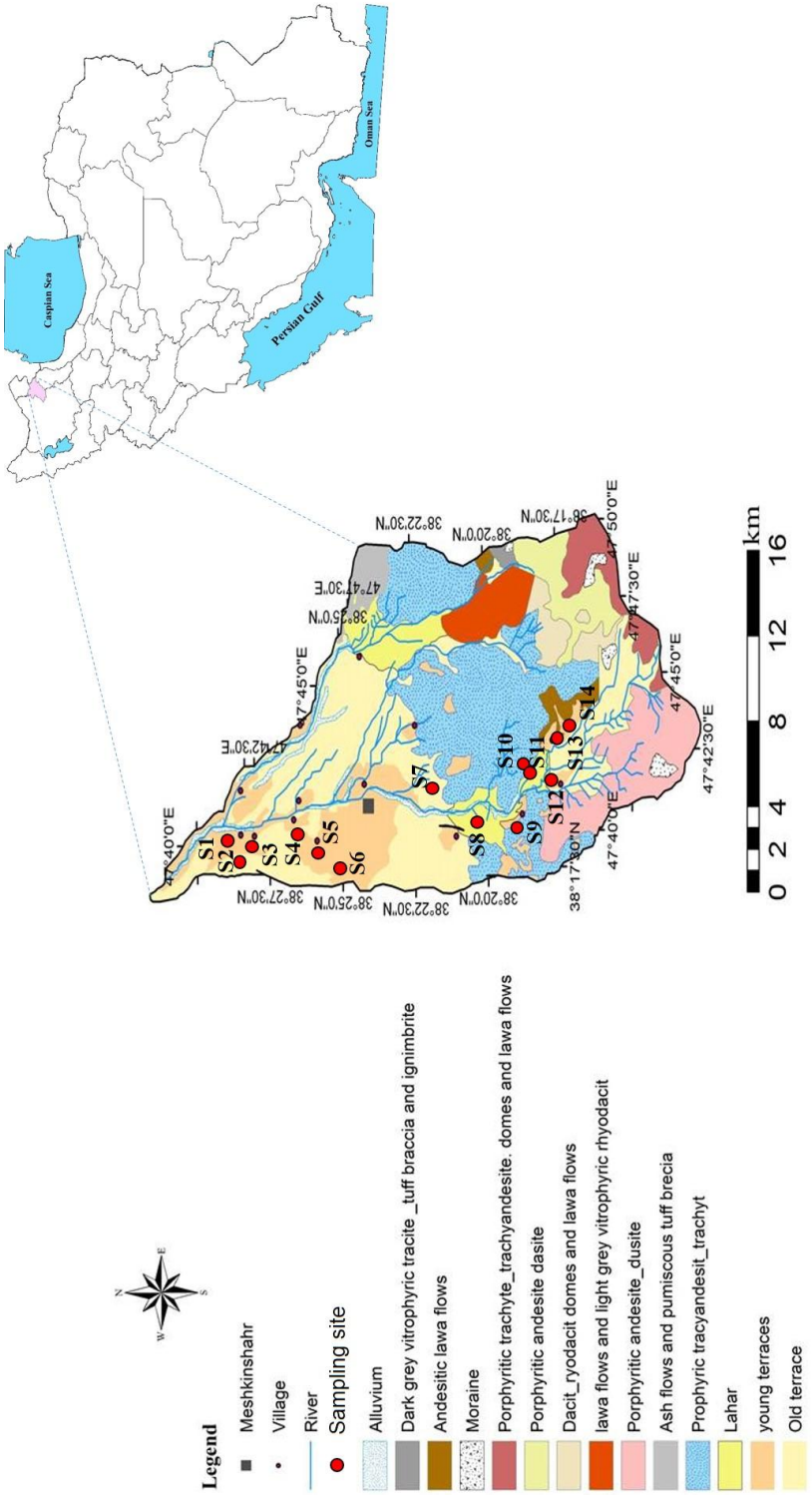
شاخص زمین انباشت به‌وسیلهٔ Muller در سال ۱۹۶۹ برای ارزیابی آلودگی خاک به‌وسیلهٔ مقایسه میزان فلزات سنگین در حال حاضر و پیش از صنعتی شدن معرفی شده است (Muller, 1969). این شاخص به‌منظور مشخص کردن درجهٔ آلودگی و میزان تأثیر عوامل انسانی از عوامل طبیعی در محیط خاک و رسوب استفاده شده (Yap et al., 2002) و از طریق معادلهٔ (۱) محاسبه می‌شود:

$$Igeo=\log_2[Cn/1.5Bn] \quad (۱)$$

در این معادله Cn غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه و Bn غلظت همان عنصر در نمونه زمینه است. در این پژوهش از میانگین غلظت عناصر در پوسته زمین به‌عنوان مرجع استفاده شده است. در معادلهٔ (۱) برای تصحیح اثرات

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

مواد مادری خاک، نوسانات طبیعی و تغییرات بسیار کم ایجاد شده در اثر فعالیت‌های انسانی از ضریب ۱/۵ استفاده می‌شود. بر اساس این شاخص، خاک‌ها در ۷ گروه مختلف طبقه‌بندی می‌شوند (Muller, 1969).



شکل ۱. نقشهٔ زمین‌شناسی محدودهٔ بررسی شده و نقاط نمونه‌برداری

Figure 1. Geological map of the study area and sampling points

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

ب) عامل آلودگی

بر اساس عامل آلودگی، می‌توان مقدار فلزات را نسبت به مقدار طبیعی آنها سنجید و میزان آلایندگی خاک را تعیین کرد (Naimi & Ayoubi, 2013). عامل آلودگی با معادلهٔ (۲) محاسبه می‌شود:

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

در این رابطه CF عامل آلودگی، [C] sample غلظت عنصر بررسی شده و [C] background غلظت عنصر در نمونه مرجع است. در این پژوهش از میانگین غلظت عناصر در پوسته زمین به‌عنوان مرجع استفاده شده است. خاک‌ها از نظر آلودگی به فلزات سنگین بر اساس عامل آلودگی به ۴ گروه CF<۱ (آلودگی کم)، ۳>CF≥۱ (آلودگی متوسط)، ۶>CF ≥۳ (آلودگی زیاد)، و CF≥۶ (آلودگی بسیار زیاد) تقسیم می‌شوند (Islam et al., 2015).

ج) ضریب غنی‌شدگی

یکی از روش‌های رایج در ارزیابی آثار انسان‌زاد روی خاک، محاسبه ضریب غنی‌شدگی به‌هنجار شده (EF) در غلظت‌های بیش‌تر از حد زمینه فلزات است. در راستای محاسبه EF باید مقدار فلز اندازه‌گیری شده را با توجه به فلز مرجع نمونه مانند آهن، اسکاندیم، تیتانیم، منگنز یا آلومینیوم بهنجار کرد (Chong et al., 2010). در این پژوهش، برای ارزیابی غنی‌شدگی فلزات سنگین در خاک نسبت به پوسته، از عنصر اسکاندیم به‌دلیل غیرمتحرک بودن و نیز داشتن کم‌ترین تغییرات در نمونه‌ها به‌عنوان به‌هنجار کننده و مرجع، در محاسبات ضرایب آلودگی استفاده شده است. برای محاسبه ضریب غنی‌شدگی عناصر خاک از معادلهٔ (۳) استفاده شده است (Ho et al., 2010):

$$EF=\frac{Cn(Sample)/Cref(Sample)}{Bn(background)/Bref(background)} \quad (۳)$$

در این رابطه Cn (sample) غلظت عنصر در نمونه خاک بررسی شده و Cref (sample) غلظت عنصر مرجع در نمونه خاک است. Bn (background) و Bref (background) نیز به‌ترتیب غلظت فلز در نمونه مرجع و غلظت عنصر مرجع را در محیط مرجع نشان می‌دهد.

مقدار عامل غنی‌شدگی بین ۰/۵ تا ۲ زمین‌زاد و مقادیر بیش از ۲ اثر انسان‌زاد تلقی می‌شود. هم‌چنین به‌طورکلی بر اساس عامل غنی‌شدگی پنج سطح آلودگی قابل تمایز است (Sutherland, 2000).

د) تجزیه‌های آماری

پس از تجزیه‌های شیمیایی، به‌منظور بررسی نحوهٔ ارتباط عناصر با یک‌دیگر و نیز تعیین منشأ آنها، نتایج حاصل با استفاده از تجزیه‌های آماری بررسی شد. آمار توصیفی، ضریب هم‌بستگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی داده‌ها با نرم‌افزار SPSS 20 انجام شد.

یافته‌ها و بحث

نتایج تجزیه نمونه‌های خاک و خلاصه آماری مربوط به آنها همراه با مقادیر میانگین غلظت عناصر بررسی شده در پوستهٔ زمین و خاک جهانی در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسهٔ غلظت عناصر در منطقه با میانگین آنها در خاک جهانی و پوسته زمین نشان می‌دهد که میانگین غلظت آرسنیک، روی و فسفر در خاک کشاورزی مشگین‌شهر بیش از مقادیر آنها در خاک جهانی و پوسته زمین است. هم‌چنین غلظت آهن و سرب در منطقهٔ مطالعاتی نسبت به پوسته زمین، و غلظت کبالت و منگنز نسبت به خاک‌های جهانی بیش‌تر است. از میان عناصر بررسی شده، آرسنیک، فسفر و

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

آهن به‌ترتیب با مقادیر ۶۸/۶۱، ۳۴/۲۷ و ۳۰/۷۶ درصد بیش‌ترین ضرایب تغییر را در منطقه نشان می‌دهند. ضریب تغییر زیاد به‌ویژه برای آرسنیک، نشان‌دهندهٔ تفاوت غلظت زیاد در بخش‌های مختلف منطقه بررسی شده و احتمالاً تفاوت منبع آلاینده است. با مقایسهٔ میانگین غلظت‌های به‌دست آمده از عناصر (جدول ۱) می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات عناصر سنگین در خاک مشگین‌شهر بدین‌صورت است:

Fe>P>Mn>Zn>Cu>Cr>As>Pb>Co

چنان‌چه مشاهده می‌شود، آهن بیش‌ترین و کبالت کم‌ترین غلظت را در نمونه‌های خاک تجزیه شده دارد.

جدول ۱. غلظت عناصر در نمونه‌های خاک کشاورزی آبیاری شده با آب رودخانه خیاوچای (mg/kg)

Table 1. Elements' concentration in agricultural soil samples irrigated by Khiavchay River water (mg/kg)

شماره نمونه	As	Fe	Pb	Zn	P	Mn	Cr	Cu	Co
S1	۶۶/۵	۷۸۵۳۵	۲۸	۸۸	۱۸۸۹	۴۶۸	۵۵	۳۵	۱۸
S2	۱۹/۷	۴۵۱۹۱	۱۸	۱۳۶	۲۵۸۳	۸۴۱	۵۳	۴۹	۱۴
S3	۱۶	۴۴۱۷۱	۲۱	۱۱۴	۱۷۳۰	۸۶۵	۶۳	۶۰	۱۸/۸
S4	۱۸/۲	۳۸۵۱۳	۱۶	۱۱۵	۲۰۵۹	۷۷۴	۴۱	۵۵	۱۵/۴
S5	۹/۹	۳۵۰۲۵	۱۳	۸۲	۱۴۴۷	۷۰۶	۳۶	۴۹	۱۳/۷
S6	۱۹/۸	۳۳۸۶۳	۱۴	۷۹	۱۴۷۲	۶۷۸	۵۶	۴۲	۱۲/۵
S7	۹/۴	۳۴۱۵۸	۱۲	۸۲	۱۸۴۸	۶۰۶	۳۹	۵۲	۱۲/۶
S8	۱۸/۵	۳۱۱۲۰	۱۵	۷۳	۱۶۱۰	۵۰۱	۳۷	۴۳	۱۱/۵
S9	۲۱	۳۰۸۹۰	۱۳	۸۵	۱۵۱۲	۵۶۷	۴۰	۴۴	۱۱/۹
S10	۱۴	۲۹۴۷۱	۲۵	۱۵۹	۴۰۸۴	۶۳۶	۳۸	۶۸	۱۴/۹
S11	۱۸	۳۹۷۸۵	۲۰	۹۷	۱۶۷۷	۶۶۱	۴۲	۵۱	۱۴/۵
S12	۱۶/۹	۳۸۳۵۴	۱۹	۸۹	۱۷۴۷	۷۰۸	۵۸	۵۵	۱۴
S13	۱۶/۴	۳۵۸۷۳	۱۴	۱۱۷	۱۸۷۸	۷۰۸	۴۱	۵۱	۱۳/۲
S14	۱۷	۳۸۲۰۹	۱۵	۹۶	۲۱۱۹	۶۸۹	۴۰	۵۳	۱۳/۷
میانگین	۲۰/۰۹	۳۹۵۱۱/۲	۱۷/۳۵	۱۰۰	۱۹۷۵	۶۷۲	۴۵/۶۴	۵۰	۱۴/۱۹
کمینه	۹/۴	۲۹۴۷۱	۱۲	۷۳	۱۴۴۷	۴۶۸	۳۶	۳۵	۱۱/۵
بیشینه	۶۶/۵	۷۸۵۳۶	۲۸	۱۵۹	۴۰۸۴	۶۸۹	۶۳	۶۸	۱۸/۸
انحراف معیار	۱۳/۷۸	۱۲۱۵۴/۱۴	۴/۷۸	۲۴/۵۱	۶۷۷/۰۱	۱۱۳/۶۶	۹/۱۷	۸/۱۴	۲/۰۹
ضریب تغییر	۶۸/۶۱	۳۰/۷۶	۲۷/۵۴	۲۴/۳	۳۴/۲۷	۱۶/۹۱	۲۰/۰۹	۱۶/۱۲	۱۴/۷۸
میانگین غلظت در پوسته زمین*	۱/۵	۵۰۰۰۰	۱۵	۷۰	۱۰۰۰	۹۵۰	۱۲۶	۶۰	۲۰
میانگین جهانی غلظت در خاک	*۱۴	**۳۲۰۰۰	*۳۲	**۵۹/۸	**۶۲۰	*۴۳۷	*۱۵۰	*۶۳	*۱۲

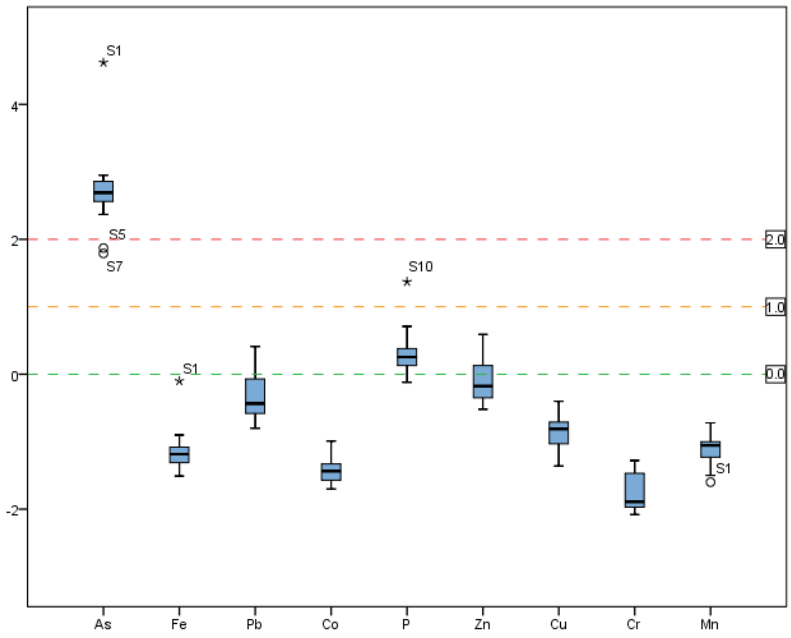
*Kabata-Pendias A., Mukherjee, 2007; **Bowen, 1982

بررسی شدت آلودگی

نتایج حاصل از محاسبهٔ شاخص زمین انباشت در نمونه‌های خاک برداشت شده از ایستگاه‌های نمونه‌برداری محدودهٔ بررسی شده در مشگین‌شهر در شکل ۲ ارائه شده است. این نتایج حاکی از آن است که میزان آرسنیک در خاک ایستگاه S1 (روستای مویل، مجاور معدن آهن) در محدودهٔ آلودگی شدید تا بی‌نهایت آلوده قرار دارد (میزان Igeo برابر ۴/۶۲). هم‌چنین این عنصر در ۷۸ درصد از نمونه‌های برداشته شده (۱۱ نمونه) در محدودهٔ آلودگی متوسط تا شدید (میزان Igeo بین ۲/۳۷ تا ۲/۹۵) و در دو ایستگاه در محدودهٔ آلودگی متوسط قرار دارد (میزان Igeo بین ۱/۷۹ تا ۱/۸۷). به‌نظر می‌رسد تأثیر مستقیم چشمه‌های هیدروترمال آلوده به آرسنیک در محدودهٔ معدن، و اثر غیرمستقیم آنها در آلودگی آب رودخانه در پایین‌دست و آبیاری زمین‌ها با آب رودخانه، عامل اصلی آلودگی خاک منطقه به این عنصر باشد. عنصر فسفر در ایستگاه S10 (روستای نصیرآباد) در محدودهٔ آلودگی متوسط قرار دارد

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

(میزان Igeo برابر ۱/۳۷)، در ده ایستگاه در محدودهٔ بدون آلودگی تا آلودگی متوسط (میزان Igeo بین ۰/۰۳ تا ۰/۷۱) و در سایر ایستگاه‌ها بدون آلودگی است. سایر عناصر بررسیشده در محدودهٔ بدون آلودگی قرار دارند.



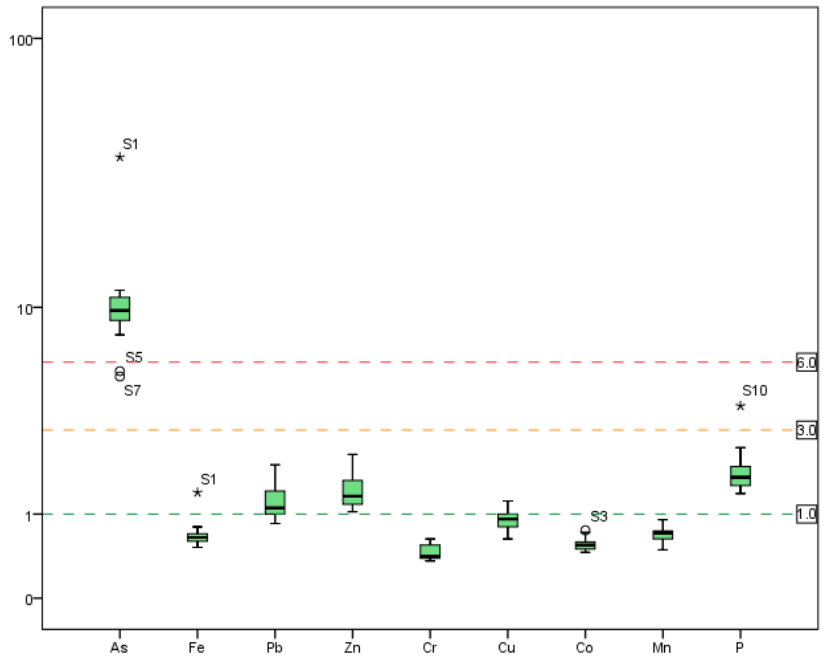
شکل ۲. نمودار جعبه‌ای شاخص زمین انباشت عناصر در خاک کشاورزی مشگین شهر

Figure 2. Box plot of elements' geoaccumulation index in agricultural soil of Meshginshahr

نتایج ضریب آلودگی در ایستگاه‌های بررسی شده در شکل ۳ ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، آرسینک در نمونه‌های S5 و S7 (به‌ترتیب مربوط به روستای دیزو و آقبلاق) دارای آلودگی قابل توجه (میزان Cf بین ۵/۲۲ تا ۵/۵) و در مابقی ایستگاه‌ها دارای آلودگی بسیار زیاد (میزان Cf بین ۷/۷۷ تا ۳۶/۹۴) است. فسفر در ایستگاه S10 در محدودهٔ آلودگی قابل توجه قرار دارد (میزان Cf برابر ۳/۸۸) و در مابقی ایستگاه‌ها در محدودهٔ آلودگی متوسط قرار دارد (میزان Cf بین ۱/۳۷ تا ۲/۴۶). روی (Zn) در تمامی نقاط نمونه‌برداری در محدودهٔ آلودگی متوسط قرار دارد (میزان Cf بین ۱/۰۴ تا ۲/۲۷). عناصر آهن، سرب و مس در هر دو محدودهٔ آلودگی متوسط و آلودگی کم قرار دارند و عناصر کبالت، کروم و منگنز تنها در محدودهٔ آلودگی اندک قرار دارند.

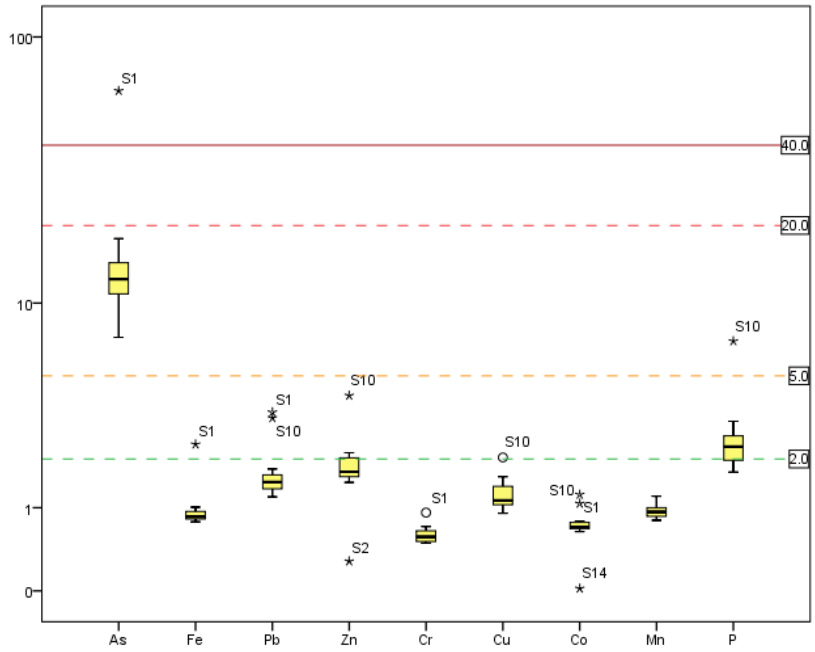
نتایج حاصل از محاسبه EF برای فلزات سنگین نمونه‌های خاک بررسی شده در شکل ۴ نمایش داده شده است. مقدار متوسط EF برای عنصر آرسنیک در ایستگاه‌های بررسی شده در محدودهٔ غنی‌شدگی قابل توجه (۱۵/۹۶) و برای عنصر فسفر در محدودهٔ غنی‌شدگی متوسط قرار دارد (۲/۶۴). هم‌چنین مقدار متوسط EF برای سایر عناصر شامل کبالت، کروم، مس، آهن، منگنز، سرب و روی، در محدودهٔ سطح آلودگی تهی تا کمی غنی‌شده قرار دارد (مقدار متوسط EF بین ۰/۶۰ تا ۱/۸۳). بنابراین، منطقه به‌طورکلی غنی‌شدگی چشم‌گیری را نسبت به عنصر آرسنیک نشان می‌دهد. این نتایج تطابق خوبی با پژوهش انجام شده قبلی روی رودخانه خیاوچای داشته و با توجه به جنس سازندها و آبیاری زمین‌های کشاورزی با آب آلوده به آرسنیک، منطقی است. نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های آلودگی حاکی از آن است که حداکثر آلودگی آرسنیک در ایستگاه شمارهٔ یک و نزدیک به معدن هماتیت روستای موئیل وجود دارد. وجود لیمونیت با تجمع ثانویه آرسنیک در این معدن مهم‌ترین دلیل غلظت زیاد این عنصر در آب، رسوب و به تبع آن خاک‌های کشاورزی آبیاری شده با آب رودخانه خیاوچای محسوب می‌شود.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]



شکل ۳. نمودار جعبه‌ای عامل آلودگی عناصر در خاک کشاورزی مشگین شهر

Figure 3. Box plot of elements' contamination factor in agricultural soil of Meshginshahr



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای ضریب غنی شدگی عناصر در خاک کشاورزی مشگین شهر

Figure 4. Box plot of elements' enrichment factor in agricultural soil of Meshginshahr

تجزیه‌های آماری

ضریب هم‌بستگی

به‌منظور ارزیابی ارتباط میان عناصر بررسی شده، پس از نرمال سازی داده‌ها با روش لگاریتمی (Lognormal) از ضریب هم‌بستگی پیرسون استفاده شد. نتایج مربوط به ضریب هم‌بستگی عناصر در خاک مشگین‌شهر در جدول ۲ ارائه

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

شده است. هم‌بستگی زیاد آرسنیک با آهن (r=۰/۹۱۱) و سرب (r=۰/۶۳۷) و هم‌بستگی منفی آن با فسفر (r= -۰/۶۵) مشاهده شد. براساس بررسی‌های پیشین (Shakeri et al., 2020)، از میان کانی‌های آهن‌دار منطقه، بیش‌ترین غلظت آرسنیک در لیمونیت اندازه‌گیری شده است. در فرایند تشکیل لیمونیت فری هیدریت نامحلول به‌وسیلهٔ اکسایش آهن دوظرفیتی تشکیل می‌شود و طی این واکنش، آرسنیکی که از چشمه‌های آب گرم و آبهای هیدروترمال منطقه منشأ گرفته است با آهن هم‌ته‌نشین می‌شود (Bhattacharya et al., 2007). بنابراین آرسنیک در معدن آهن مویل تحت تاثیر منابع ژئوترمال و چشمه‌های آبگرم منطقه، به‌صورت ثانویه در لیمونیت ته‌نشین شده است. هم‌بستگی منفی آرسنیک با فسفر می‌تواند به‌دلیل رقابت این دو عنصر به‌صورت آنیون (آرسنات و فسفات) در جذب به‌وسیلهٔ کلوئیدهای خاک باشد. هم‌چنین منشأ متفاوت آنها دلیل دیگر ارتباط منفی بین آرسنیک و فسفر است. با این وجود، سرب نیز با منشأ زمین‌زاد در منطقه ارتباط مثبتی با آرسنیک نشان می‌دهد. هم‌بستگی کبالت با آهن (r=۰/۶۸۷)، سرب (r=۰/۷۵۶) و کروم (r=۰/۵۶۴) نیز منشأ عمدتاً زمین‌زاد این عناصر را نشان می‌دهد. هم‌چنین هم‌بستگی مس با روی (r=۰/۶۹۰)، فسفر (r=۰/۶۳۰) و منگنز (r=۰/۵۴۵) نیز حاکی از منشأ متفاوت آنها از سایر عناصر است. بنابراین وجود سازندهای آذرین و سنگ‌های مربوط به فازهای نهایی تفریق ماگمایی در منطقه در کنار چشمه‌های هیدروترمال و معدن سنگ آهن منشأ عمده عناصر بررسی شده هستند.

جدول ۲. ضریب هم‌بستگی پیرسون عناصر بررسی شده

Table 2. Pearson's correlation coefficient of the studied elements

	As	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	P
As	۱								
Co	۰/۴۸۲	۱							
Cr	۰/۳۶۱	۰/۵۶۴	۱						
Cu	-۰/۶۱۰	۰/۲۱۷	-۰/۰۹۳	۱					
Fe	۰/۹۱۱	۰/۶۸۷	۰/۴۹۷	-۰/۴۶۲	۱				
Mn	-۰/۴۹۳	۰/۲۹۱	۰/۳۶۵	۰/۵۴۵	-۰/۱۹۷	۱			
Pb	۰/۶۳۷	۰/۷۵۶	۰/۴۲۶	۰/۱۳۹	۰/۶۶۱	-۰/۱۲۱	۱		
Zn	-۰/۱۴۰	۰/۳۵۶	۰/۰۳۰	۰/۶۹۰	-۰/۰۵۱	۰/۴۸۲	۰/۴۴۵	۱	
P	-۰/۶۵	۰/۱۸۲	-۰/۱۵۷	۰/۶۳۰	-۰/۰۸۴	۰/۰۹۸	۰/۴۹۸	۰/۸۶۰	**۱**

تحلیل مؤلفهٔ اصلی

تحلیل مؤلفهٔ اصلی در حالی که تعداد ابعاد متغیرها را به تعداد کم‌تری مؤلفهٔ غیرمرتبط کاهش می‌دهد، به توضیح بیش‌تر واریانس داده‌ها کمک می‌کند. در این پژوهش تحلیل مؤلفهٔ اصلی با استفاده از استخراج مؤلفه‌ها به‌ویژه مقدار بزرگ‌تر از ۱ و پس از چرخش واریمکس داده‌ها[1] با نرمال‌سازی کیزر[2] استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیهٔ عاملی عناصر بررسی شده نمونه‌های خاک در جدول ۳ ارائه شده است. سه مؤلفهٔ بیش از ۷۹ درصد از واریانس داده‌ها را استخراج می‌کنند. مؤلفهٔ اول با توضیح ۳۸/۷۳ درصد از واریانس کل شامل آهن، آرسنیک، سرب و کبالت است. هم‌چنین کروم نیز بار متوسط در این مؤلفه نشان می‌دهد. این عناصر در منطقه دارای منشأ یکسان هستند که با توجه توزیع آنها می‌توان دریافت که این عناصر دارای منشأ سازندی هستند و عمدتاً تحت تأثیر معدن آهن (هماتیت) روستای موئیل هستند. لازم به ذکر است که وجود چشمه‌های هیدروترمال متعدد در محدوده معدن عامل اصلی قرارگیری آرسنیک در شبکه لیمونیت به‌صورت ثانویه است. مؤلفهٔ دوم با توضیح ۲۸/۴۱ درصد از واریانس کل شامل عناصر فسفر، روی و

1. Varimax rotation
2. Kaiser normalization

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

مس است و می‌توان گفت که این عناصر دارای منشأ انسان‌زاد هستند به‌طوری‌که عنصر فسفر ناشی از افزودن کود به زمین‌های کشاورزی و باغات بوده و عناصر مس و روی به احتمال زیاد ناشی از خردایش لوله‌های مسی قدیمی که در شبکه آبرسانی به‌کار رفته حاصل می‌شود و از طریق فاضلاب‌ها و پساب‌ها به زمین‌های کشاورزی منتقل می‌شود. دو عنصر دیگر شامل منگنز و کروم با توضیح ۱۲/۳۱ درصد از واریانس کل در مؤلفهٔ سوم قرار دارند و می‌توان نتیجه گرفت این عناصر نیز دارای منشأ عمدتاً زمین‌زاد هستند و به‌طور طبیعی در خاک منطقه مشگین‌شهر یافت می‌گردند، با این تفاوت که نسبت به عناصر مؤلفهٔ اول کم‌تر تحت تأثیر معدن آهن و منابع هیدروترمال قرار دارند.

جدول ۳. مؤلفه‌های محاسبه شده برای عناصر بعد از چرخش واریمکس

Table 3. Calculated components for elements after Varimax rotation

	مؤلفهٔ ها		
	مؤلفهٔ اول	مؤلفهٔ دوم	مؤلفهٔ سوم
Fe	**۰/۹۴۶**	-۰/۱۷۴	-۰/۰۲۶
As	**۰/۹۰۶**	-۰/۲۱۱	-۰/۳۲۴
Pb	**۰/۸۳۸**	۰/۴۶۷	-۰/۰۳۴
Co	**۰/۷۷۳**	۰/۲۵۳	۰/۴۳۲
P	۰/۰۸۲	**۰/۹۵۳**	-۰/۱۵۳
Zn	۰/۰۹۳	**۰/۹۱۳**	۰/۲۲۸
Cu	-۰/۳۱۱	**۰/۷۹۶**	۰/۳۹۰
Mn	-۰/۱۹۳	۰/۲۵۴	**۰/۹۰۵**
Cr	۰/۵۹۰	-۰/۱۸۶	**۰/۶۵۱**

نتیجه‌گیری

با بررسی غلظت فلزات سنگین در محدودهٔ مشگین‌شهر (از روستای موئیل تا روستای عربلو) مشخص شد که میانگین غلظت کل آرسنیک، سرب و روی در منطقه بررسی شده به‌ترتیب ۲۰/۰۹ mg/kg، ۱۷/۳۵، ۱۰۰/۸۵ است که این غلظت‌ها بیش‌تر از غلظت زمینه بود. بر همین اساس، بیش‌ترین مقدار آلودگی شبه‌فلز آرسنیک و فلز سرب در ایستگاه شمارهٔ یک و نزدیک به معدن آهن (هماتیت) روستای موئیل بهدست آمد. وجود چشمه‌های هیدروترمال با غلظت بالای آرسنیک در منطقه که از عوامل آلودگی آب رودخنه خیاوچای محسوب می‌شوند، و آبیاری زمین‌های زراعی با آب رودخانه از عوامل مهم غنی‌شدگی آرسنیک در خاک منطقه محسوب می‌شود. با توجه به مقدار شاخص زمین‌انباشت، خاک محدودهٔ بررسی شده دارای آلودگی متوسط تا شدید نسبت به شبه‌فلز آرسنیک است. نتایج عامل غنی‌شدگی مبین غنی‌شدگی قابل توجه برای عنصر آرسنیک و غنی‌شدگی متوسط برای عنصر فسفر است که تحت تأثیر عامل سازندی و طبیعی برای عنصر آرسنیک و عامل انسانی برای عنصر فسفر است. نتایج حاصل از تجزیه‌های آماری نقش مهم معدن آهن مویل و چشمه‌های هیدروترمال منطقه را در افزایش غلظت آرسنیک، آهن و سرب در خاک منطقه را نشان داد. با توجه به آثار منفی آلاینده‌های خاک بر محیط زیست و با در نظر گرفتن غلظت زیاد آرسنیک در محدودهٔ بررسی شده، بررسی غلظت این عنصر در محصولات زراعی منطقه و ارزیابی ریسک سلامت ضروری به‌نظر می‌رسد. برای این منظور، ارزیابی تحرک و زیست‌دسترس‌پذیری عناصر با روش‌های استخراج ترتیبی، بررسی نقش پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک در تحرک عنصری و بررسی نقش گونه‌های گیاهی در جذب آلاینده از خاک می‌تواند کمک به‌سزایی در تحلیل بهتر نتایج داشته باشد.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

منابع

۱. خیرآبادی ح.، افیونی م.، شمس‌الله ا.، سفیانیان ع.، "ارزیابی خطر ناشی از فلزات سنگین در خاک و گیاهان زراعی خوارکی عمده در استان همدان"، مجلهٔ علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد ۱۹، شمارهٔ ۷۴ (۱۳۹۴) ۲۷-۳۸.

۲. طلایی ر.، پیروان ح.، مطعم ف.، "ارزیابی زیست‌محیطی خاک‌های آلوده در معدن دوست بیگلو (شمال مشگین‌شهر-ایران)"، مجلهٔ مخاطرات طبیعی، شمارهٔ ۲۰ (۱۳۹۸) ۱۶۶-۱۴۷.

3. Andrews S. S., Carroll C. R., "Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management", Ecological Applications, 11(6) (2001) 1573-1585.
4. Bhattacharya P., Welch A. H., Stollenwerk K. G., McLaughlin M. J., Bundschuh J., Panaullah, G., "Arsenic in the environment: biology and chemistry" (2007).
5. Bowen H. J. M., "Environmental chemistry vol. 2 (specialist periodical report), (1982) The Royal Society of Chemistry.
6. Chong W. A. N. G., Hai-Nan K. O. N. G., Xin-Ze W. A. N. G., Hao-Dong W. U., Yan L. I. N., Sheng-Bing H. E., "Effects of iron on growth and intracellular chemical contents of Microcystis aeruginosa", Biomedical and Environmental Sciences, 23 (1) (2010) 48-52.
7. Gruda N., "Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption", Critical Reviews in Plant Sciences, 24 (3) (2005) 227-247.
8. Hatami Manesh M., Mirzaei M., Gholamali Fard M., Riyahi Bakhtiyari A. R., & Sadeghi, M., "Evaluation of copper, zinc, and chromium concentration in landfill soil and hospital waste ash of Shahrekord municipal solid waste landfill", Iranian Journal of Health and Environment, 8 (1) (2015) 57-66.
9. Ho H. H., Swennen R., Van Damme A., "Distribution and contamination status of heavy metals in estuarine sediments near Cua Ong Harbor, Ha Long Bay, Vietnam", Geologica Belgica, 13 (1-2) (2010) 37-47.
10. Islam M. S., Ahmd, M. K., Habibullah-Al-Mamun M., Hoque, M. F., "Preliminary assessment of heavy metal contamination in surface sediments from a river in Bangladesh", Environmental earth sciences, 73 (4) (2015) 1837-1848.
11. Kabata-Pendias A., Mukherjee A. B., "Trace elements from soil to human", (2007) Berlin: Springer.
12. Keshavarzi B., Moore F., Ansari M., Mehr M. R., Kaabi H., Kermani M., "Macronutrients and trace metals in soil and food crops of Isfahan Province, Iran", Environmental monitoring and assessment, 187 (1) (2015) 4113.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]

13. Misra S., Newsom H. E., Prasad M. S., Geissman J. W., Dube, A., Sengupta, D., "Geochemical identification of impactor for Lonar crater, India", Meteoritics & Planetary Science, 44 (7) (2009) 1001-1018.
14. Muller G., "Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River", Geojournal, 2 (1969) 108-118.
15. Naimi S., Ayoubi S., "Vertical and horizontal distribution of magnetic susceptibility and metal contents in an industrial district of central Iran", Journal of Applied Geophysics, 96 (2013) 55-66.
16. Shakeri A., Fard M. S., Mehrabi B., Mehr M. R., "Occurrence, origin and health risk of arsenic and potentially toxic elements (PTEs) in sediments and fish tissues from the geothermal area of the Khiav River, Ardebil Province (NW Iran)", Journal of Geochemical Exploration, 208 (2020) 106347.
17. Siegel F. R., "Environmental geochemistry of potentially toxic metals (Vol. 32), (2002) Berlin: Springer.
18. Sutherland R. A., "Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii", Environmental Geology, 39 (6) (2000) 611–627.
19. Yap C. K., Ismail A., Tan S. G., Omar H., "Correlations between speciation of Cd, Cu, Pb and Zn in sediment and their concentrations in total soft tissue of green-lipped mussel Perna viridis from the west coast of Peninsular Malaysia", Environment International, 28 (1-2) (2002) 117-126.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2026-05-18]