Journal of Urban Management & Environmental Engineering

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.2, No.4; 2025.pp: 1-20

Research paper

(Received 18 Dec., 2024 Accepted 18 Jan., 2025)

Assessment of Pollution by Ba, Co, Mo, Ni, and Va in Surface Soils Surrounding the Tailings Dam of the Chahar Gonbad Copper Mine: An Analysis of Pollution Indices

Seyed Morteza Moosavirad[1*] , Mahboub Saffari[1]

[1]*Department of Environment, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*

Abstract

This study investigates the pollution and sources of heavy metals in the soils and sediments of the tailings dam at the Chah-Gonbad copper mine. For this purpose, six sediment samples from the tailings dam and nine soil samples from its surroundings were collected and analyzed. The concentrations of pollutants including barium, cobalt, molybdenum, nickel, and vanadium were measured using a four-acid digestion method and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results showed that the average concentrations of barium, cobalt, molybdenum, nickel, and vanadium in the tailings sediments were 585, 22, 3.7, 30.1, and 79.8 mg/kg, respectively, and in the surrounding soils were 244.8, 17, 0.63, 30.6, and 124.7 mg/kg, respectively. Enrichment factor analysis indicated that in the tailings sediments, all five elements had very low enrichment intensities, falling within the non-polluted range. In the surrounding soils, the enrichment factor for all elements was below 2, suggesting minimal impact from human activities. The geoaccumulation index in sediments classified cobalt and molybdenum into the low to moderate pollution category, while other elements were classified as non-polluted. In the surrounding soils, the enrichment factor for molybdenum and barium was in class zero, indicating no pollution. In contrast, cobalt was classified into classes 0 and 1, indicating either no pollution or slight pollution. Furthermore, vanadium and nickel were categorized in classes 1 and 2, suggesting slight to moderate pollution of these elements in some parts of the area. The findings of this study revealed that the weathering of parent rocks is the primary source of heavy metal concentrations in the area, but mining activities, particularly in the tailings sediments, have contributed to localized increases in the concentrations of some elements, including vanadium and nickel. These results emphasize the importance of continuous pollution monitoring and environmental management, including sediment stabilization and the use of pollution-reduction methods in the region.

Keywords: Soil pollution, Heavy metals, Tailings dam, Chahar Gonbad copper mine, Pollution index

*Corresponding Author: Seyed Morteza Moosavirad
Email: *s.m.moosavirad@kgut.ac.ir*
Phone: 09134125140

DOI: 10.48306/jumee.2024.494892.1061

نشریه علمی مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال دوم/شماره چهارم/زمستان ۱۴۰۳/صفحه ۱-۲۰

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱

ارزیابی آلودگی عناصر باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در خاک‌های سطحی مجاور سد باطله معدن مس چهارگنبد: تحلیل شاخص‌های آلودگی

سید مرتضی موسوی راد*[۱]، محبوب صفاری[۱]

[۱]دانشیار گروه محیط‌زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی آلودگی و منشأ عناصر سنگین در خاک‌ها و رسوبات سد باطله معدن مس چهارگنبد پرداخته است. بدین منظور، ۶ نمونه رسوب از سد باطله و ۹ نمونه خاک از اطراف آن جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفتند. غلظت عناصر آلاینده شامل باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم با استفاده از روش هضم چهار اسیدی و دستگاه طیف‌سنج جرمی پلاسمای القایی اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، میانگین غلظت عناصر باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در رسوبات سد باطله به ترتیب ۵۸۵، ۲۲، ۳/۷، ۳۰/۱ و ۷۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در خاک‌های اطراف سد به ترتیب ۲۴۴/۸، ۱۷، ۰/۶۳، ۳۰/۶ و ۱۲۴/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. تحلیل شاخص غنی‌شدگی نشان داد که در رسوبات سد باطله، هر پنج عنصر مورد مطالعه دارای شدت غنی‌شدگی بسیار کم بوده و در محدوده بدون آلودگی قرار دارند. در خاک‌های اطراف سد، شاخص غنی‌شدگی برای تمامی عناصر در محدوده کمتر از ۲ قرار گرفت که بیانگر تأثیر ناچیز فعالیت‌های انسانی است. شاخص زمین‌انباشت در رسوبات، کبالت و مولیبدن را در طبقه آلودگی کم تا متوسط قرار داد، در حالی که سایر عناصر در طبقه بندی غیرآلوده قرار گرفتند. در خاک‌های اطراف سد، شاخص غنی‌شدگی برای عناصر مولیبدن و باریم در کلاس صفر قرار داشت که نشان‌دهنده عدم آلودگی بود. در مقابل، عنصر کبالت در کلاس‌های ۰ و ۱ قرار گرفت که حاکی از عدم آلودگی یا آلودگی خفیف است. همچنین، عناصر وانادیم و نیکل در کلاس‌های ۱ و ۲ طبقه‌بندی شدند که نشان‌دهنده آلودگی خفیف تا متوسط این عناصر در برخی نقاط منطقه می‌باشد. یافته‌های این تحقیق نشان داد که هوازدگی سنگ‌های مادر منشأ اصلی غلظت عناصر سنگین در منطقه است، اما فعالیت‌های معدنی به‌ویژه در رسوبات سد باطله، به افزایش محلی غلظت برخی عناصر از جمله وانادیم و نیکل کمک کرده است. این نتایج بر اهمیت پایش مداوم آلودگی و مدیریت زیست‌محیطی از جمله تثبیت رسوبات و به‌کارگیری روش‌های کاهش آلودگی در این منطقه تأکید دارد.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک، عناصر سنگین، سد باطله، معدن مس چهارگنبد، شاخص آلودگی

* نویسنده مسئول: سید مرتضی موسوی راد

ایمیل:*s.m.moosavirad@kgut.ac.ir*

شماره تماس: ۰۹۱۳۱۴۲۵۱۴۰

DOI: 10.48306/jumee.2024.494892.1061

۱-مقدمه

در دنیای امروز، حفاظت از محیط زیست به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های جوامع بشری تبدیل شده و توجه ویژه‌ای به کاهش اثرات مخرب فعالیت‌های صنعتی، به‌ویژه صنایع معدنی، معطوف شده است. فعالیت‌های استخراج و بهره‌برداری از معادن هرچند با هدف برداشت مواد ارزشمند صورت می‌گیرد، اما همواره حجم زیادی از مواد زائد و باطله‌های معدنی را بر جای می‌گذارد [۱]. این ضایعات که حاوی مقادیر قابل توجهی از عناصر آلاینده هستند، در محوطه‌هایی موسوم به سدهای باطله ذخیره می‌شوند. سدهای باطله به عنوان مخزن‌های نگهداری نه تنها باطله‌های جامد، بلکه زه‌آب‌های ناشی از فرآوری مواد معدنی نیز به شمار می‌آیند [۲]. بر اساس تحقیقات انجام‌شده، ترکیبات موجود در این ضایعات و زه‌آب‌ها می‌توانند بر کیفیت منابع آبی سطحی و زیرزمینی و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مجاور اثرات مخربی داشته باشند [۳]. این پیامدها عمدتاً ناشی از تجمع عناصر آلاینده در باطله‌ها و انتشار آن‌ها به محیط اطراف است که تحت تأثیر نوع ماده معدنی و فرآیندهای فرآوری قرار می‌گیرد [۳]. عوامل گوناگونی همچون نفوذ زه‌آب‌ها، فرسایش بادی و شستشوی ناشی از بارندگی می‌توانند موجب انتقال این آلاینده‌ها به محیط‌های اطراف شوند. این انتقال در نهایت به آلودگی خاک و انتشار آلاینده‌ها در اکوسیستم منجر می‌شود. از سوی دیگر، پخش این مواد در خاک‌های منطقه، نه‌تنها منابع آبی را به خطر می‌اندازد، بلکه با ورود به زنجیره غذایی، سلامت انسان و حیوانات را نیز تهدید می‌کند [۳]. سازمان‌های محیط‌زیستی استانداردهایی را برای سنجش میزان آلاینده‌ها در خاک تدوین کرده‌اند. بر اساس این استانداردها، غلظت آلاینده‌هایی که از حد مجاز فراتر روند، پیامدهای نامطلوب و جبران‌ناپذیری بر سلامت موجودات زنده و پایداری محیط زیست به همراه خواهد داشت. در این راستا، بررسی و تحلیل شاخص‌های آلودگی خاک همچون فاکتور غنی‌سازی و شاخص بار آلودگی به عنوان معیارهای علمی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴]. استفاده از این شاخص‌ها در مطالعات مناطق معدنی، امکان شناسایی میزان و الگوی پراکندگی آلاینده‌ها را فراهم ساخته و به مدیران و سیاست‌گذاران محیط زیست در اتخاذ راهکارهای مناسب جهت کنترل و مدیریت آلودگی کمک شایانی می‌کند. در نتیجه، پایش مستمر و ارزیابی دقیق اثرات زیست‌محیطی صنایع معدنی، به‌ویژه در زمینه مدیریت پسماندها و جلوگیری از پراکندگی آلاینده‌ها، گامی اساسی در جهت کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و حفظ تعادل اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود. مطالعه Hatje و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثرات زیست‌محیطی نشت باطله‌های آهن در حادثه سامارکو پرداخت که بیش از ۶۵۰ کیلومتر از سد تا رودخانه دوچه و اقیانوس اطلس را تحت تأثیر قرار داد. این حادثه موجب افزایش چشمگیر غلظت رسوبات معلق (تا ۳۳ هزار میلی‌گرم در لیتر) و انباشت پسماندهای معدنی در رودخانه شد. میزان انتقال فلزات محلول مانند آهن، باریم و آلومینیوم به ترتیب ۸۵/۸، ۳۷/۹ و ۲۵ میکروگرم بر ثانیه گزارش شد. همچنین، رسوبات منطقه غنی‌سازی بالایی از جیوه، کبالت، آهن و نیکل نشان دادند. فلزات سنگین فراتر از استانداردها، تهدیدی جدی برای محیط زیست محسوب می‌شوند که علاوه بر فروپاشی سد، به فعالیت‌های معدن‌کاوی و بارش‌های فصلی نیز مرتبط است[۵]. مطالعه Liu و در مطالعه‌ای که توسط Wang و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد، سطح آلودگی، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و الگوی توزیع عمودی فلزات سنگین در سد باطله یک معدن متروکه سرب-روی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، از روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) برای تعیین الگوی توزیع عمودی فلزات سنگین در عمق استفاده شد. سطح آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص جامع آلودگی نمیرو (Nemerow) و شاخص زمین‌انباشت (Igeo) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این مطالعه شاخص ریسک اکولوژیکی بالقوه (PER) برای ارزیابی ریسک زیست‌محیطی فلزات سنگین به کار گرفته شد و منابع و مخاطرات احتمالی آلودگی فلزات سنگین شناسایی شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که آلاینده‌های اصلی شامل سرب، روی، مس و آرسنیک هستند که بیشترین غلظت آن‌ها، در لایه مرزی بین ناحیه احیاشده و لایه باطله مشاهده شد. میزان آلودگی در نواحی مختلف به ترتیب؛ لایه مرزی > لایه باطله > ناحیه عمیق > ناحیه احیاشده بود و سطح آلودگی فلزات به ترتیب کاهشی سرب > روی > آرسنیک >مس مشاهده شد. همچنین، با در نظر گرفتن اثرات سمی فلزات سنگین، ریسک اکولوژیکی بالقوه (PER) نیز روندی مشابه با سطح آلودگی نشان داد و سهم هر یک از فلزات در شاخص ریسک اکولوژیکی بالقوه به ترتیب سرب > آرسنیک > روی > مس گزارش شد. این مطالعه به‌خوبی الگوی پراکندگی، سطح آلودگی و ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین را در سد باطله یک معدن متروکه آشکار ساخت و بر اهمیت مدیریت صحیح این آلاینده‌ها برای کاهش اثرات زیست‌محیطی تأکید کرد [۶]. در پژوهش انجام شده توسط Buch و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی آلودگی محیط زیست و خطرات بهداشتی انسان ناشی از سد باطله معدن Córrego do Feijão (در بروماديئيو، برزیل) پرداخته شد. در این مطالعه، پس از شکست سد معدن Córrego do Feijão که در ایالت میناس ژرایس برزیل قرار دارد و باعث کشته شدن حداقل ۲۷۸ نفر شد، تخریب گسترده‌ای در اکوسیستم‌های آبی و زمینی به وجود آمد که به طور مستقیم کیفیت محیط زیست و اجتماعی منطقه را به خطر انداخت.

این پژوهش به ارزیابی آلودگی و خطرات بهداشتی ناشی از رسوب باطله‌های سد در خاک‌ها، در یک منطقه نمونه‌برداری به طول حدود ۲۰۰ کیلومتر پرداخت. با استفاده از شاخص‌های خطر اکولوژیکی بالقوه و بار آلودگی، غنی‌سازی عناصر کادمیم، آرسنیک، جیوه، مس، سرب و نیکل در خاک‌ها نشان داد که مناطق بروماديئيو، ماریو کامپوس، بتیم و سائو خواکیم دو بیکاس بیشترین آسیب را از شکست سد دیده‌اند. این مطالعه تأکید می‌کند که اقدامات اصلاحی و ترمیمی باید به طور فوری در این مناطق انجام شود. همچنین، ارزیابی خطرات سمی، از جمله اثرات حاد، مزمن و ژنوتوکسیک بر افراد ساکن و شاغل در مناطق معدنی باید اولویت مدیریت عمومی و شرکت‌های معدنی قرار گیرد تا اطمینان حاصل شود که اقدامات زیست‌محیطی مؤثر و بدون ضرر برای سلامت انسان در طول زمان انجام می‌شود [۷].

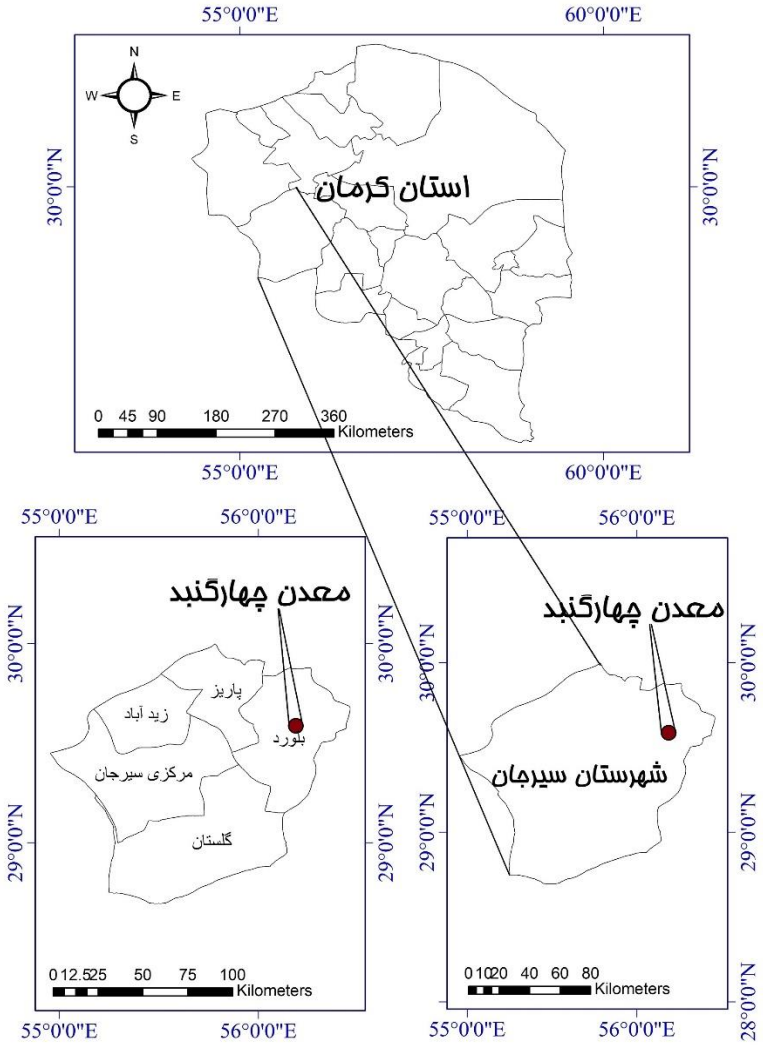
معدن روباز مس چهارگنبد با ذخیره‌ای معادل ۳ میلیون و ۱۷ هزار و ۴۱۹ تن، یکی از معادن حاوی کانی‌های مس در منطقه محسوب می‌شود. مهم‌ترین ترکیبات معدنی موجود در این معدن شامل کالکوپیریت و پیریت هستند، در حالی که مقادیری از کانی‌های بورنیت، کوولیت و کالکوسیت نیز در آن دیده می‌شوند. بر اساس ارزیابی‌ها، مساحت تقریبی منطقه تحت تأثیر آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنکاری و سد باطله در حدود ۱۴/۳ کیلومتر مربع برآورد می‌شود. با استناد به داده‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای، در بالادست این معدن دو سد باطله به چشم می‌خورد. در بخش جنوبی، یک سد رسوب‌گیر با وسعتی در حدود ۹۹ هزار و ۷۰۰ متر مربع و در بخش شمالی، سد دیگری به مساحت حدود ۳۲ هزار و ۵۰۰ متر مربع به‌منظور مهار و مدیریت زه‌آب سد جنوبی احداث شده‌اند. فعالیت‌های استخراج و فرآوری در این معدن طی سال‌های اخیر نسبتاً محدود بوده و دوره بهره‌برداری آن چندان طولانی نبوده است. با این‌حال، نگرانی‌هایی در خصوص احتمال آلودگی خاک اطراف سد باطله مطرح شده است. در مطالعه‌ای پیشین که توسط صفاری و همکاران (۱۴۰۰) در این منطقه صورت گرفت، وضعیت آلاینده‌هایی از قبیل مس، سرب، روی، کادمیم، آنتیموان و آرسنیک بررسی شدند. نتایج نشان داد که رسوبات سد باطله غنی از عناصر مس و آنتیموان هستند و در برخی از نمونه‌های خاک سطحی نیز مقادیر قابل‌توجهی از مس و آرسنیک ثبت شد. با این‌وجود، میزان عناصر دیگر نظیر سرب، روی، کادمیم و آنتیموان در محدوده‌ای پایین‌تر از مقادیر استاندارد زیست‌محیطی قرار داشتند. ارزیابی شاخص‌های مرتبط با آلودگی خاک نیز نشان داد که آرسنیک و آنتیموان بالاترین میزان انباشتگی و غنی‌شدگی را داشته و این امر عمدتاً ناشی از فعالیت‌های معدنکاری و سدهای باطله است. در عین حال، برای سایر عناصر شواهد قطعی مبنی بر وجود آلودگی جدی در منطقه یافت نشد [۴]. با توجه به مقدمه ذکر شده، پژوهش حاضر با هدف بررسی جامع‌تر آلاینده‌های عناصر سمناک باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم ناشی از سد باطله و تأثیرات آن بر محیط خاک منطقه طراحی شده است. این عناصر به دلیل ویژگی‌های خاص شیمیایی و مخاطرات بالقوه‌ای که برای محیط زیست و سلامت انسان دارند، در کانون توجه این مطالعه قرار گرفته‌اند. هدف از این تحقیق، ارائه تصویری روشن‌تر از اثرات زیست‌محیطی سد باطله بر محیط خاک منطقه و تولید داده‌های علمی موردنیاز برای تدوین راهکارهای مدیریتی پایدار است. این مطالعه به‌طور ویژه به بررسی آلاینده‌های کمتر مطالعه‌شده‌ای مانند باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در خاک‌های اطراف سد باطله معدن مس چهارگنبد می‌پردازد. برخلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً بر عناصری مانند مس، آرسنیک و آنتیموان متمرکز بودند، پژوهش حاضر با استفاده از شاخص‌های پیشرفته آلودگی خاک مانند شاخص زمین‌انباشت و فاکتور غنی‌سازی، تصویری دقیق‌تر از پراکندگی و شدت آلودگی این عناصر ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای مدیریت پایدار آلودگی خاک در مناطق معدنی و تدوین راهکارهای عملی جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی این آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا، میزان غلظت این عناصر با مقادیر استانداردهای ملی حفاظت محیط زیست ایران مقایسه شده و شاخص‌های مختلف نظیر شاخص زمین انباشت و فاکتور غنی‌سازی با دقت مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

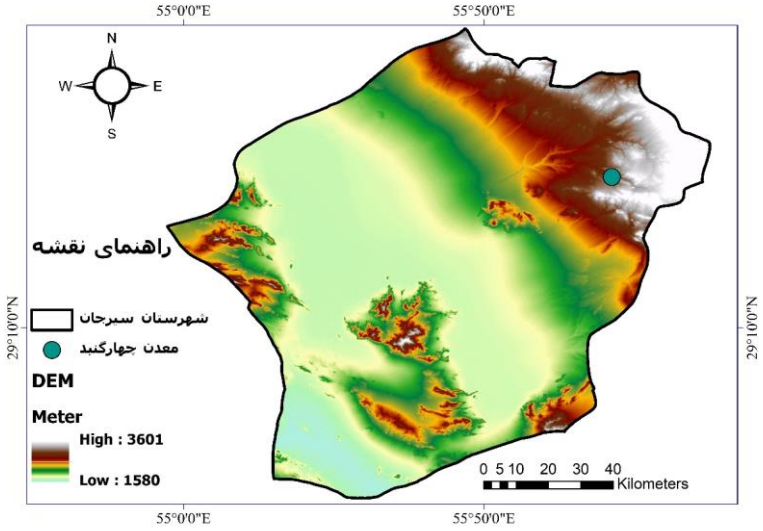
۲-۱- منطقه مطالعاتی

در پژوهش حاضر، منطقه مورد مطالعه کانسار مس رگه‌ای چهارگنبد واقع در جنوب شرق ایران، شمال شرق سیرجان و استان کرمان انتخاب شده است. این معدن در فاصله تقریبی ۸۰ کیلومتری شهر سیرجان قرار دارد و مختصات جغرافیایی آن بین طول‌های شرقی ۵۶ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض‌های شمالی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۶۵ دقیقه قرار گرفته است. محدوده مذکور در منطقه کوهستانی چهارگنبد قرار دارد که بخشی از کمربند ماگمایی ارومیه-دختر محسوب می‌شود و از دیدگاه جغرافیایی در نوار کوهستانی دهج-ساردوئیه جای گرفته است. موقعیت دقیق این معدن در شمال شرقی سیرجان و غرب شهرستان

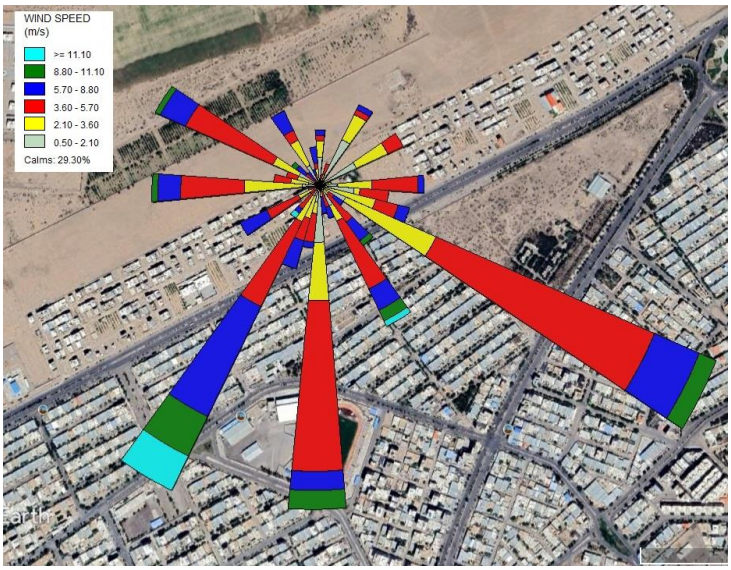
کرمان در نقشه مربوطه نمایش داده شده است (شکل ۱). از منظر زمین‌شناسی، این منطقه در ارتفاعات کوهستانی قرار داشته و بازه ارتفاعی آن از ۲۳۷۰ متر در بخش‌های پایین تا ۲۷۰۱ متر در نقاط مرتفع متغیر است. جزئیات بیشتر در خصوص تغییرات ارتفاع این محدوده در نقشه‌های توپوگرافی ارائه شده است (شکل ۲). اقلیم منطقه کوهستانی بوده و شرایط آب‌وهوایی آن سرد و معتدل است. در فصل زمستان، دما بین منفی ۷ تا ۱۵ درجه سلسیوس نوسان دارد و در تابستان نیز دما به حدود ۱۸ تا ۳۷ درجه سلسیوس می‌رسد. این منطقه از نظر اقلیم‌شناسی در دسته‌بندی مناطق نیمه‌خشک معتدل قرار می‌گیرد. مطابق با آمار ارائه‌شده توسط وزارت نیرو، میانگین بارش سالانه در این منطقه حدود ۲۹۶ میلی‌متر است و میزان رطوبت نسبی به‌طور میانگین به ۴۷ درصد می‌رسد. همچنین، منطقه در طول سال به‌طور متوسط ۵۳ روز با یخبندان مواجه می‌شود. پوشش گیاهی منطقه شامل گونه‌های بومی و مقاوم به خشکی است که از جمله آن‌ها می‌توان به درختان بنه، بادام کوهی و ارژن اشاره کرد. علاوه بر این، بوته‌های گون، قیچ و درمنه نیز در این منطقه رشد می‌کنند. بر اساس اطلاعات بادسنجی ایستگاه هواشناسی سیرجان طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸، که به‌عنوان نماینده شرایط باد منطقه معدن در نظر گرفته شده است، بیشتر بادهای غالب از سمت جنوب شرقی به شمال غربی جریان دارند (شکل ۳).



شکل ۱. موقعیت مکانی معدن چهارگنبد در استان کرمان و شهرستان سیرجان



شکل ۲. نقشه رقومی ارتفاعی شهرستان سیرجان و موقعیت معدن چهارگنبد در آن



شکل ۳. گلباد سالانه در موقعیت ایستگاه سینوپتیک سیرجان در دوره آماری ۵ ساله (۱۳۹۳-۱۳۹۸)

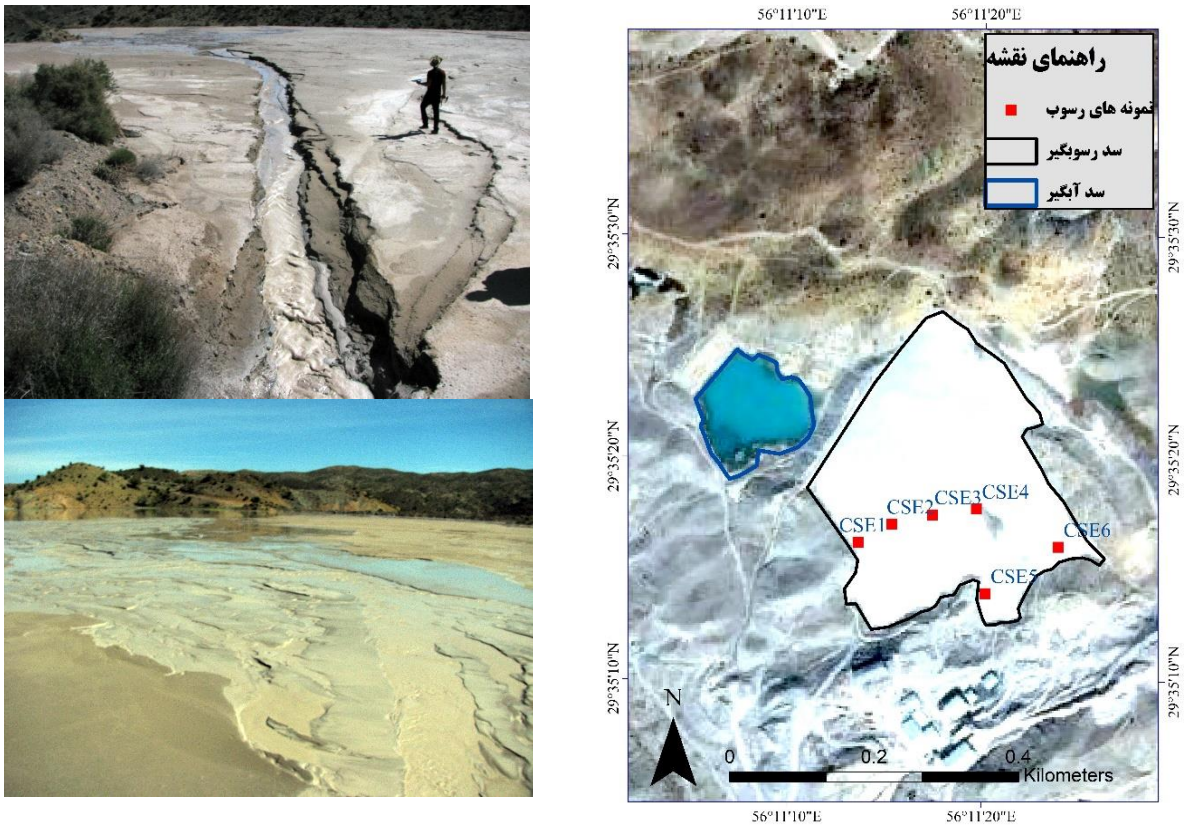
۲-۲- نمونه‌برداری از رسوبات سد باطله و تحلیل شیمیایی عناصر آلاینده

برای دستیابی به هدف اصلی این مطالعه که بررسی میزان آلودگی خاک‌های اطراف سد باطله است، اندازه‌گیری دقیق غلظت عناصر آلاینده در رسوبات این سد از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این راستا، شش نمونه رسوب از سطح سد باطله برداشت شد. این نمونه‌برداری با توجه به تنوع رسوبات موجود (شامل رسوبات قدیمی و جدید) و موقعیت‌های مختلف سد انجام گرفت. نمونه‌های جمع‌آوری‌شده برای آنالیز به آزمایشگاه زرآزما ماهان در شهر کرمان ارسال شدند. شکل ۴، نمایی از سد باطله و محل دقیق برداشت نمونه‌ها را نمایش می‌دهد.

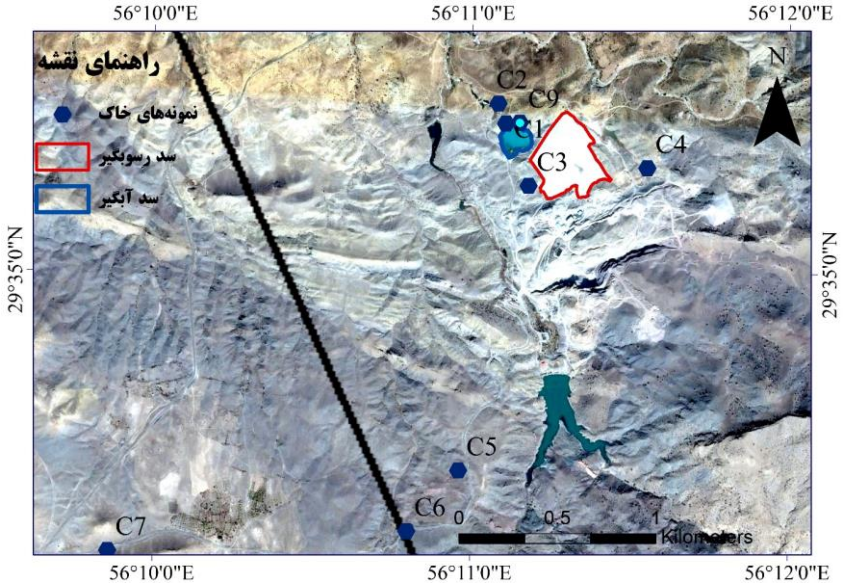
برای سنجش غلظت عناصر آلاینده شامل باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم، از روش هضم چهار اسیدی استفاده شد. این فرآیند با استفاده از ترکیب چهار اسید شامل هیدروکلریک، هیدروفلوئوریک، پرکلریک و نیتریک صورت پذیرفت. سپس، اندازه‌گیری غلظت عناصر مذکور با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جرمی پلاسمای القایی (ICP-MS) انجام شد. حد تشخیص دستگاه برای عناصر باریم، کبالت، نیکل و وانادیم برابر با ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای عنصر مولیبدن معادل ۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین گردید.

۲-۳- نمونه‌برداری خاک اطراف سد باطله و تحلیل شیمیایی عناصر آلاینده

با توجه به ویژگی‌های کوهستانی منطقه و وجود خاک‌های کم‌توسعه نظیر انتی‌سول و اینسپتی‌سول، نمونه‌برداری از خاک مناطق مختلف اطراف سد باطله به‌گونه‌ای انجام گردید که بتواند وضعیت خاک و تاثیرات احتمالی سد باطله بر آن‌ها را به‌خوبی نمایان سازد. بیشتر نواحی به علت کوهستانی بودن و تغییرات ناشی از عملیات معدنی مانند ساخت راه، فاقد خاکرخ‌های قابل توجهی بودند که این موضوع باعث کاهش تعداد نمونه‌های قابل برداشت در منطقه گردید (در مجموع ۹ نمونه). نمونه‌برداری خاک به‌طور غیرسیستماتیک و از جهات مختلف منطقه، از جمله پایین‌دست و بالادست سد باطله و همچنین از جهت باد غالب و مخالف آن انجام شد. برای هر نقطه نمونه‌برداری، یک پلات ۵×۵ متر مشخص گردید و نمونه‌ها از مرکز هر ضلع پلات (۴ نمونه) و درون پلات (۴ نمونه) برداشت شدند و درنهایت یک نمونه برداشت گردید. نمونه‌ها از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر خاک جمع‌آوری شده و پس از ترکیب آن‌ها، یک نمونه مرکب به وزن ۱ کیلوگرم آماده و به آزمایشگاه زرآزما ماهان در کرمان ارسال گردید. غلظت عناصر آلاینده از طریق روش هضم چهار اسید و دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری شد. همچنین، به‌منظور ارزیابی وضعیت اسیدیته خاک‌ها، میزان pH هر نمونه با استفاده از دستگاه pH متر و روش گل اشباع سنجیده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که pH تمامی نمونه‌ها بیشتر از ۷ بوده و این خاک‌ها در دسته خاک‌های قلیایی قرار دارند. شکل ۵ موقعیت نمونه‌برداری‌ها، محدوده سدهای رسوبگیر و آبگیر را نشان می‌دهد. نقاط نمونه‌برداری C5 ، C6، و C7 که در فاصله دورتری از منطقه معدنی قرار دارند، به‌عنوان نمونه‌های شاهد برای مقایسه در این مطالعه استفاده شدند.



شکل ۴. نمای کلی از محیط سد باطله و سد آبگیر و موقعیت نقاط نمونه برداری رسوبات در سد رسوبگیر معدن چهارگنبد



شکل ۵. موقعیت مکانی نمونه‌های خاک موردمطالعه، سد رسوبگیر و سد آبگیر در منطقه معدن چهارگنبد

۲-۴- فاکتور غنی‌شدگی

تشخیص منشأ طبیعی فلزات سنگین که از هوازدگی سنگ‌ها ناشی می‌شوند و تفکیک آن‌ها از عناصر با منشأ انسانی، یکی از بخش‌های مهم مطالعات ژئوشیمیایی محیط‌زیستی در خاک و رسوبات به شمار می‌آید. یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی میزان آلودگی خاک و رسوبات، عامل غنی‌شدگی است [۴] که میزان تأثیرپذیری از منابع انسانی (منابع خارجی) را نیز مشخص می‌سازد. نحوه محاسبه عامل غنی‌شدگی با استفاده از معادله شماره ۱ قابل تبیین است.

$$EF = \frac{[(\frac{C}{R})]_{Sample}}{[(\frac{C}{R})]_{Background}} \quad \text{معادله (۱)}$$

در این معادله، نسبت (C/R) Sample بیانگر غلظت عنصر مورد بررسی به عنصر مرجع در نمونه خاک یا رسوب است که در این مطالعه، عنصر آهن به‌عنوان مرجع انتخاب شده است. همچنین، نسبت (C/R) Background نشان‌دهنده مقدار غلظت همان عنصر در مقایسه با عنصر مرجع در پوسته سطحی زمین می‌باشد. داده‌های مربوط به غلظت عناصر در پوسته زمین از نتایج مطالعات McLennan و Taylor در سال ۱۹۸۲ به دست آمده‌اند [۸]. طبق شاخص غنی‌شدگی، خاک و رسوبات بر اساس سطح آلودگی به پنج دسته متفاوت تقسیم‌بندی می‌شوند که جزئیات آن در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- طبقه بندی ضریب غنی شدگی (نشان دهنده احتمال ایجاد آلودگی) [۴]

فاکتور غنی شدگی	رده آلودگی	توضیحات
ضریب غنی شدگی کمتر از ۲	بدون آلودگی یا زمینه‌ای	تأثیر ناچیز یا عدم تأثیر فعالیت‌های انسانی
ضریب غنی شدگی ۲-۵	آلودگی کم	تأثیر محدود فعالیت‌های انسانی
ضریب غنی شدگی ۵-۲۰	آلودگی متوسط	سطح قابل توجه آلودگی ناشی از منابع خارجی
ضریب غنی شدگی ۲۰-۴۰	آلودگی زیاد	تأثیر قابل ملاحظه و جدی فعالیت‌های انسانی
ضریب غنی شدگی بزرگتر از ۴۰	آلودگی بسیار شدید	آلودگی بسیار بالا و غیرطبیعی ناشی از فعالیت‌های انسانی

۲-۵- شاخص زمین‌انباشت

یکی از روش‌های پرکاربرد در بررسی میزان آلودگی خاک‌ها یا رسوبات، محاسبه شاخص زمین‌انباشت (Igeo) است [۴]. این شاخص به‌منظور ارزیابی شدت آلودگی و تعیین منبع احتمالی عناصر آلاینده استفاده می‌شود و مقدار آن از طریق رابطه ۲ تعیین می‌گردد:

$$Igeo = Log_2(\frac{Cn}{1.5Bn})$$ معادله (۲)

در این فرمول:

- C_n: بیانگر غلظت کل فلز مورد نظر در خاک یا رسوب است.
- Bn: به غلظت زمینه‌ای آن فلز در محیط اشاره دارد.
- **۱/۵:** به‌عنوان یک ضریب تعدیل‌کننده برای کاهش اثر نوسانات ناشی از تغییرات لیتولوژیکی در رسوبات خاک به کار گرفته می‌شود.

جدول ۲- طبقه بندی ضریب غنی شدگی [۴]

شاخص زمین انباشت	کلاس	رده آلودگی	توضیحات
۰≥Igeo	۰	بدون آلودگی	غلظت فلز در حد طبیعی و بدون هیچ اثر آلاینده‌ای است
۰>Igeo>۱	۱	تقریباً بدون آلودگی	کمی افزایش یافته اما هنوز در محدوده مجاز است
۱>Igeo>۲	۲	آلودگی کم	سطح آلودگی جزئی با اثرات کم‌اهمیت زیست‌محیطی
۲>Igeo>۳	۳	آلودگی متوسط	آلودگی مشخص که نیازمند توجه مدیریتی است
۳>Igeo>۴	۴	آلودگی زیاد	افزایش قابل‌توجه آلودگی با اثرات منفی واضح
۴>Igeo>۵	۵	آلودگی شدید	آلودگی بحرانی که تهدیدی جدی برای محیط زیست است
Igeo>۵	۶	آلودگی بسیار شدید	شرایط فوق بحرانی و خطرات گسترده زیست‌محیطی

بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده از شاخص زمین‌انباشت، آلودگی خاک یا رسوبات به هفت گروه مختلف دسته‌بندی می‌شود که در جدول ۲ ارائه شده است. این طبقه‌بندی کمک می‌کند تا شدت آلودگی به‌صورت دقیق‌تر ارزیابی و برای مدیریت زیست‌محیطی اقدامات لازم برنامه‌ریزی شود.

۲-۶- تحلیل‌های آماری

برای ارزیابی شاخص‌های آماری مرتبط با هر عنصر، از نرم‌افزار آماری Minitab19 بهره گرفته شد. همچنین، برای محاسبه شاخص‌های آلودگی و طراحی نمودارهای موردنیاز، از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی میزان غلظت و شاخص‌های آلودگی باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در رسوبات سد باطله معدن مس چهارگنبد

جدول ۳، توصیف آماری از مقادیر کمی عناصر باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در نمونه‌های رسوب برداشت شده از بخش‌های مختلف سد باطله معدن مس چهارگنبد را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آماری، مقادیر متوسط باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در نمونه‌های رسوب سد باطله معدن مس چهارگنبد به ترتیب ۵۸۵، ۲۲، ۳/۷۱، ۳۰/۱۷ و ۷۹/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. بر این اساس، مقادیر کمی عناصر در رسوبات سد باطله به ترتیب باریم > وانادیم > نیکل > کبالت > مولیبدن مشاهده شد. میانگین غلظت باریم ۵۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد که نوسانات زیادی را در مقادیر حداقل (۱۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و حداکثر (۱۹۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نشان می‌دهد، همچنین ضریب تغییرات بالا و چولگی مثبت، نشان‌دهنده توزیع نامتقارن داده‌ها به سمت مقادیر بالاتر است. کبالت با میانگین ۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و تغییرات نسبی کمتر ۲۰ و ۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، از توزیع نسبتاً یکنواختی برخوردار بود. مولیبدن با میانگین ۳/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، نوسانات قابل توجهی بین ۰/۹۶ و ۸/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم داشت و چولگی مثبت آن به سمت مقادیر بالا تمایل دارد. نیکل با میانگین ۳۰/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه تغییرات ۲۲ تا ۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تغییرات بالایی را نشان می‌دهد و چولگی مثبت آن نیز حاکی از توزیع نامتقارن است. وانادیم با میانگین ۷۹/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و محدوده ۶۹ تا ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تغییرات کمتری نشان داد و توزیع داده‌ها نسبتاً متقارن بود.

جدول ۳- توصیف آماری مقادیر عناصر سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در نمونه های رسوب سد باطله منطقه معدن مس چهارگنبد

عنصر	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
باریم	۵۸۵	۱۶۳	۱۹۶۱	۶۸۰/۰۸۷	۸۶/۰۱۸	۲/۳۵۲	۵/۶۴۳
کبالت	۲۲	۲۰	۲۴	۱/۵۴۹	۱۴۲۰/۰۹۴	۰	-۱/۸۷۵
مولیبدن	۳/۷۱۰	۰/۹۶۰	۸/۹۰۰	۲/۸۳۸	۱۳۰/۷۳۳	۱/۴۹۴	۲/۳۲۰
نیکل	۳۰/۱۶۷	۲۲	۴۴	۷/۵۴۸	۳۹۹/۶۸۴	۱/۴۱۳	۲/۶۸۱
وانادیم	۷۹/۸۳۳	۶۹	۹۰	۷/۴۱۴	۱۰۷۶/۷۹۹	-۰/۰۲۳	-۰/۲۱۹

برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات زیست‌محیطی عناصر آلاینده در رسوبات سد باطله و تأثیر آن‌ها بر اکوسیستم اطراف، ضروری است که ویژگی‌های طبیعی هر عنصر در رسوبات منطقه و میزان تغییرات آن‌ها در رسوبات سد باطله بررسی شود. در این راستا، برای تحلیل تغییرات ژئوشیمیایی رسوبات هر منطقه، معمولاً از داده‌های زمینه‌ای پژوهش‌های قبلی استفاده می‌شود. بنابراین، برای مقایسه مقادیر عناصر موجود در رسوبات سد باطله با رسوبات مناطق فاقد آلودگی خارج از محدوده سد، از داده‌های زمینه‌ای مربوط به رسوبات منطقه چهارگنبد که توسط Yousefi Sharik Abad et al (۲۰۱۲) گزارش شده است، بهره‌برداری گردید [۹] (جدول ۴). جدول مقایسه‌ای مقادیر آلاینده‌های باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در نمونه‌های رسوب سد باطله معدن مس چهارگنبد و مقادیر طبیعی این عناصر در رسوبات منطقه، تفاوت‌های قابل توجهی را بین غلظت‌های این عناصر در رسوبات آلوده و زمینه طبیعی نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقایسه مقادیر آلاینده‌های (میلی‌گرم بر کیلوگرم) باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم در نمونه های رسوب سد باطله منطقه معدن مس چهارگنبد و مقادیر عناصر در زمینه طبیعی رسوبات منطقه

عنصر	میانگین عناصر در رسوبات سد باطله مطالعه حاضر	مقادیر عناصر در زمینه طبیعی رسوبات منطقه*
باریم	۵۸۵	۳۳۷/۳
کبالت	۲۲	۳۵/۹
مولیبدن	۷۱۰/۳	۰/۲
نیکل	۱۶۷/۳۰	۳۷۱
وانادیم	۸۳۳/۷۹	۱۸۱

* برگرفته از مطالعات Yousefi Sharik Abad et al. (2012) [۹]

برای عنصر باریم، میانگین غلظت در رسوبات سد باطله ۵۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که به طور چشمگیری بیشتر از مقدار زمینه‌ای ۳۳۷/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رسوبات طبیعی منطقه است. این تفاوت بزرگ نشان‌دهنده تجمع غیرطبیعی باریم در اثر فعالیت‌های معدنی و فرآیندهای صنعتی در این منطقه است. مولیبدن در رسوبات سد باطله معدن مس چهارگنبد با میانگین ۳/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت شده است، در حالی که مقدار زمینه‌ای طبیعی این عنصر ۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. این افزایش غلظت نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های معدنی بر تجمع غیرطبیعی مولیبدن در رسوبات سد باطله است. میزان کبالت در رسوبات سد باطله معدن مس چهارگنبد با میانگین ۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم ثبت شده که نسبت به مقدار طبیعی آن در رسوبات منطقه، معادل ۳۵/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند به چند دلیل منطقی نسبت داده شود. این احتمال وجود دارد که کبالت از رسوبات ناحیه به دلیل ویژگی‌های ژئوشیمیایی آن، همچون تحرک بالا در شرایط خاص، به لایه‌های عمیق‌تر یا دیگر نواحی منطقه جابجا شده باشد. از سوی دیگر، فعالیت‌های معدنی و استخراجی می‌تواند باعث تغییر در شرایط شیمیایی خاک و رسوب شده و بر روند ته‌نشینی و غلظت عناصر تاثیرگذار باشد. بنابراین، این کاهش نسبی می‌تواند نتیجه فعالیت‌های معدنی و ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی منطقه باشد که بر روی رفتار و توزیع کبالت در رسوبات اثر گذاشته است. میزان نیکل در رسوبات سد باطله معدن مس چهارگنبد با میانگین ۳۰/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شده، که نسبت به مقدار طبیعی زمینه ۳۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. این کاهش قابل توجه می‌تواند به مانند فرایندهای ممکن در رفتار کبالت باشد. وانادیم نیز در رسوبات سد باطله معدن مس چهارگنبد با میانگین ۷۹/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شده است، که نسبت به مقدار طبیعی زمینه‌ای آن به میزان ۱۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد که می‌تواند این تغییرات به مانند کبالت و

نیکل باشد. جدول ۵، نسبت میانگین عناصر در رسوبات سد باطله به مقادیر عناصر در زمینه طبیعی رسوبات منطقه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، عناصر مولیبدن و باریم در نمونه های رسوبات سد باطله معدن چهار گنبد نسبت به زمینه طبیعی رسوبات منطقه، دارای افزودگی می‌باشند. در طرف مقابل، عناصر کبالت، نیکل و وانادیم در نمونه های رسوبات سد باطله معدن چهار گنبد نسبت به زمینه طبیعی رسوبات منطقه، روند کاهیدگی را نشان دادند. بر این اساس، کاهش مقادیر برخی از عناصر در رسوب سد باطله می‌تواند نشان از بالاتر بودن مقادیر این عناصر در سنگ‌های طبیعی منطقه در مقایسه با زون های کانه زا باشد.

جدول ۵- نسبت میانگین عناصر در رسوبات سد باطله مطالعه حاضر به مقادیر عناصر در زمینه طبیعی رسوبات منطقه

وانادیم	نیکل	مولیبدن	کبالت	باریم
۰/۴۴	۰/۰۸	**۱۸/۵۵**	۰/۶۱	**۱/۷۳**

در پژوهشی که توسط Akter و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، آلودگی معادن متروکه با استفاده از شاخص آلودگی یکپارچه (IPI) در خاک، آب و رسوبات بررسی شد. هدف این مطالعه طبقه‌بندی مناطق آلوده و ارزیابی سطوح آلودگی فلزات سنگین در این مناطق بود. نتایج نشان داد که بیشتر مناطق معدنی حاوی غلظت‌های بالای فلزات سنگین در آب و خاک بودند که معمولاً از استانداردهای مجاز فراتر می‌رفت. در رسوبات، Zn بیشترین آلودگی را نشان داد و سایر فلزات سنگین مانند Ni، As، Cd، Cu، Pb، Hg و Cr^{6+} نیز در مقادیر قابل توجهی وجود داشتند. این تحقیق خطرات آلودگی زیست‌محیطی ناشی از بارش‌های زیاد در مناطق معدنی را شناسایی کرد [۱۰]. مقادیر فاکتور غنی شدگی فلزات مورد مطالعه در رسوبات منطقه معدنی چهار گنبد در جدول ۶ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، هر پنج عنصر مورد مطالعه شدت غنی شدگی عناصر بسیار کم بوده و به عبارتی بدون آلودگی می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط Saadat و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، آلودگی رسوبات در مناطق معدنی شرق ایران با استفاده از شاخص‌های آلودگی و ارزیابی ریسک بررسی شد. تحلیل ۱۴۰۰ نمونه رسوب آبراهه‌ای نشان داد که عناصر Fe، Sr، Zn، Cr، Cu، Ni، Co، Pb، As، Sb، و Hg در این منطقه موجود هستند، که بیشترین غلظت‌ها مربوط به Fe و کمترین آن‌ها مربوط به Hg بود. فاکتورهای غنی‌شدگی بسیار شدید برای Co و غنی‌شدگی بالا برایSb ، Hg، Cr، و Sr شناسایی شد. همچنین، همبستگی بالای Cu، Zn و Sb با کانی‌سازی طلا و همبستگی Cr و Ni با سنگ‌های اولترامافیک مشخص شد. این مطالعه نشان داد که فعالیت‌های معدنی، حتی در مراحل اولیه، می‌توانند موجب آلودگی خاک و انتشار فلزات سنگین، به‌ویژه در اطراف مناطق معدنی شوند [۱۱]. در پژوهشی که توسط Wu و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد، آلودگی رسوبات آبی ناشی از عناصر سمی بالقوه (PTEs) ناشی از فعالیت‌های معدنی در چین بررسی شد که تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم به‌شمار می‌آید. در این مطالعه، وضعیت آلودگی، توزیع فضایی و خطرات اکولوژیکی و بهداشتی عناصرCd ، Cu، Zn، Pb، Cr و As با استفاده از ارزیابی شاخص‌ها، تحلیل فضایی، مدل‌های ارزیابی خطر بهداشتی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو بررسی گردید. نتایج نشان داد که رسوبات مورد بررسی درجات مختلفی از آلودگی PTEرا نشان دادند، به‌ویژه Cd که ۱۰۴/۸۵ برابر بیشتر از مقدار پس‌زمینه آن بود و بالاترین میزان غنی‌شدگی را داشت. بیش از ۶۴/۵٪ از رسوبات آلوده به فعالیت‌های معدنی فلزی خطرات اکولوژیکی بسیار بالایی داشتند که عمدتاً توسط Cd ایجاد شده بود. همچنین، خطرات بهداشتی ناشی از رسوبات برای کودکان ۱/۷۲ و ۶/۴۶ برابر بیشتر از بزرگسالان بود [۱۲].

جدول ۶- مقادیر فاکتور غنی شدگی فلزات مورد مطالعه در رسوبات منطقه معدنی چهار گنبد

شماره نمونه	وانادیم	نیکل	مولیبدن	کبالت	باریم
CSE۱	۰/۷۲	۰/۷۰	۲/۸۶	۱/۱۱	۰/۳۷
CSE۲	۰/۶۶	۰/۷۲	۱/۶۵	۱/۰۸	۰/۳۲
CSE۳	۰/۴۱	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۷۲	۱/۲۸
CSE۴	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۸۵	۱/۰۵	۰/۳۰
CSE۵	۰/۶۳	۱/۰۵	۰/۶۳	۱/۱۴	۰/۱۴
CSE۶	۰/۶۱	۰/۴۶	۰/۲۷	۰/۸۹	۰/۲۰
متوسط	**۰/۵۹**	**۰/۶۷**	**۱/۱۰**	**۰/۹۸**	**۰/۴۷**

جدول شماره ۷ میزان شاخص زمین انباشت فلزات باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم را در رسوبات ناحیه معدنی چهارگنبد ارائه می‌دهد. طبق داده‌های به دست آمده، شاخص انباشتگی زمین برای فلزات وانادیم، نیکل و باریم نشان‌دهنده وضعیت غیرآلوده در این منطقه است. در مقابل، فلزات کبالت و مولیبدن در بازه آلودگی متوسط تا قابل توجه قرار دارند. فرآیند خردایش سنگ‌ها به منظور جداسازی مواد معدنی باعث افزایش سطح تماس سنگ با آب می‌شود که این موضوع به تسریع واکنش‌های هوازدگی شیمیایی کمک می‌کند. یکی از پیامدهای اصلی این فرآیند، اکسید شدن کانی‌های سولفیدی و تولید اسید سولفوریک در بستر سنگ است. نفوذ آب‌های زیرزمینی به سطح زمین و فرآیند فرسایش سطحی و شیمیایی، نقش مهمی در جابجایی و انتقال فلزات دارند. این شرایط با وقوع اکسیداسیون کانی‌های پیریتی همراه بوده و محیطی اسیدی ایجاد می‌کند. این تغییر در شرایط شیمیایی محیط، به‌ویژه تغییرات شاخص Eh-pH، زمینه‌ای مناسب برای تجمع و پایداری غلظت فلزات آلاینده فراهم می‌آورد [۴]. در پژوهشی که توسط Kırıs و Baltas (۲۰۲۱) انجام شد، غلظت فلزات سنگین Mn، Cr، Fe، Ni، Cu، Zn، Cd و Pb در رسوبات جمع‌آوری‌شده از ۱۲ ایستگاه در سواحل دریای سیاه، رودخانه‌های Buyukdere و Sabuncular در منطقه معدن مس Cayeli در ریزه، ترکیه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت‌های Mn، Cr، Fe، Ni، Cu، Zn، Cd و Pb در رسوبات به ترتیب ۵۸۵/۱۰، ۲۲/۵، ۳۳، ۶۰۳/۹۵، ۷/۴، ۶۳/۹۷، ۷۵/۵، ۰/۲ و ۷/۸۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. بررسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات نشان داد که بیشتر فلزات مورد بررسی در حد مجاز قرار دارند. طبق ارزیابی شاخص‌های غنی‌شدگی (EF)، شاخص تجمعی (Igeo)، شاخص آلودگی (CF) و شاخص بار آلودگی (PLI)، رسوبات منطقه آلودگی زیادی نداشتند و تنها Cu، Zn و Cd به میزان کمی غنی‌شده بودند. نتایج PCA نشان داد که منابع طبیعی به‌ویژه برای Mn، Cr، Ni و Pb مسئول آلودگی هستند، در حالی که Cu، Zn و Cd تأثیر کمی از ورودی‌های انسانی داشتند. ارزیابی خطرات بهداشتی نشان داد که غلظت‌های فلزات سنگین در رسوبات خطری برای سلامت انسان از طریق بلع یا تماس پوستی ایجاد نمی‌کنند [۱۴].

جدول۷- مقادیر شاخص زمین انباشتگی فلزات مورد مطالعه در رسوبات منطقه معدنی چهار گنبد

شماره نمونه	وانادیم	نیکل	مولیبدن	کبالت	باریم
CSE۱	۰	-۰/۰۵	۱/۹۸	۰/۶۲	-۰/۹۶
CSE۲	-۰/۲۳	-۰/۱۰	۱/۰۹	۰/۴۹	-۱/۲۶
CSE۳	-۰/۳۸	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۴۲	۱/۲۵
CSE۴	-۰/۲۳	-۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۶۲	-۱/۲۱
CSE۵	-۰/۱۷	۰/۵۵	-۰/۱۷	۰/۶۸	-۲/۳۴
CSE۶	-۰/۰۷	-۰/۴۵	-۱/۲۳	۰/۴۹	-۱/۶۷
CSE۱	-۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۷۲	۰/۵۵	-۰/۵۰

۳-۲- وضعیت کمی و شاخص‌های آلودگی باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیم خاک‌های اطراف سد باطله معدن مس چهارگنبد

جدول شماره ۸ جزئیات موقعیت مکانی نمونه‌های خاک جمع‌آوری‌شده از اطراف سد باطله معدن چهارگنبد را ارائه می‌دهد. در این جدول موقعیت نسبی هر نمونه نسبت به سد باطله و فاصله آن از نزدیک‌ترین مرز سد نیز ذکر شده است.

جدول ۸- موقعیت و مشخصات نقاط نمونه برداری خاک در معدن مس چهارگنبد

شماره نمونه	موقعیت نسبت به سد باطله	فاصله نسبی تا سد باطله (متر)
C۱	پایین دست سد باطله (شمال غرب سد)	۲۰۵
C۲	پایین دست سد باطله (شمال غرب سد)	۲۹۵
C۳	جنوب غرب سد باطله	۸۵
C۴	بالادست سد باطله (شرق سد باطله)	۲۴۵
C۵	بیرون از منطقه مطالعاتی (نمونه شاهد- جنوب غربی سد باطله)	۱۵۰۰
C۶	بیرون از منطقه مطالعاتی (نمونه شاهد- جنوب غربی سد باطله)	۱۸۲۰
C۷	بیرون از منطقه مطالعاتی (نمونه شاهد- جنوب غربی سد باطله)	۲۸۵۰
C۸	پایین دست سد باطله (شمال غربی سد باطله)	۱۱۶۰
C۹	پایین دست سد باطله (شمال غربی سد باطله)	۱۴۳

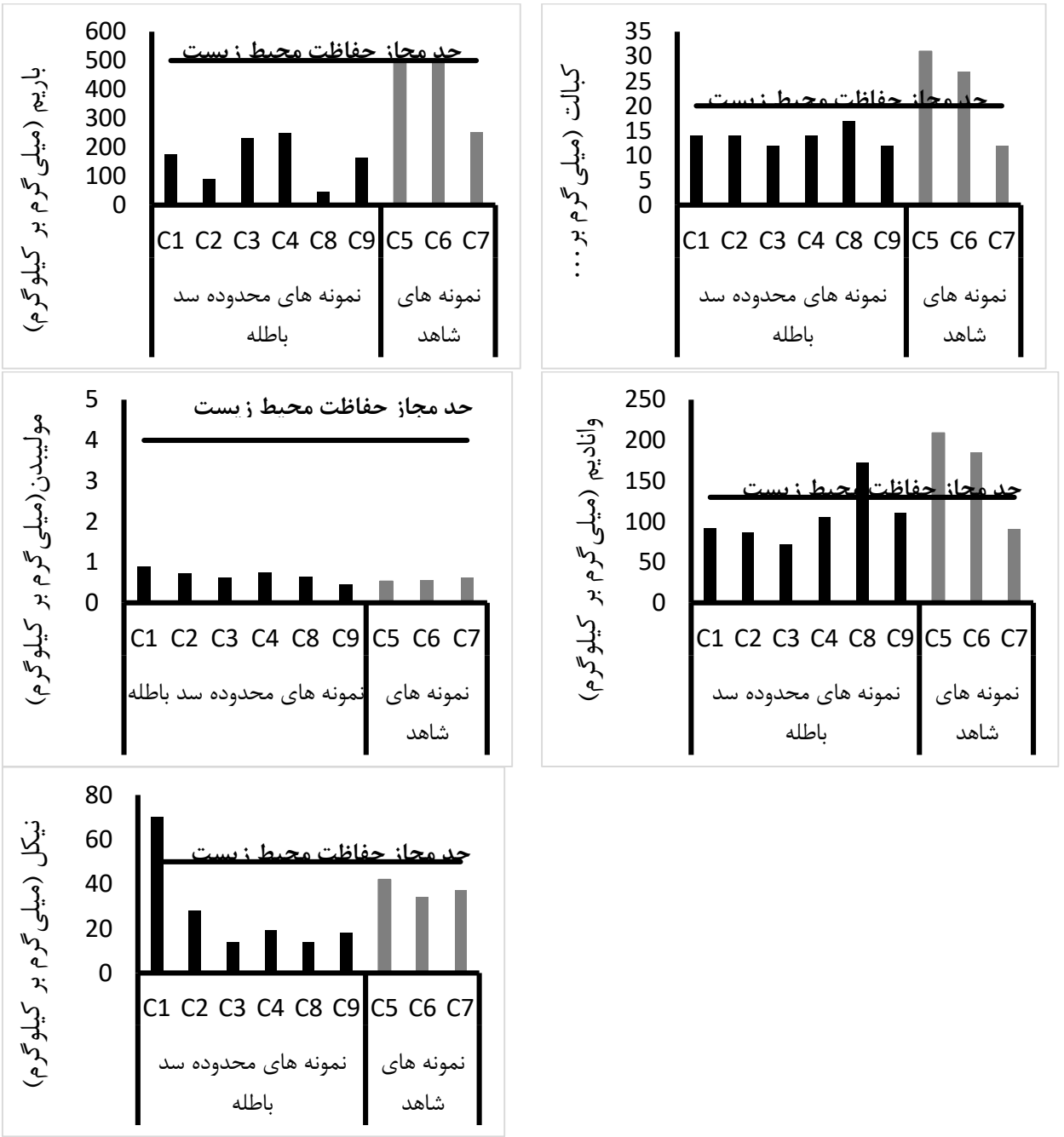
جدول ۹، توصیف آماری مقادیر کمی عناصر مورد مطالعه در نمونه های خاک‌های سطحی منطقه معدن مس چهارگنبد را نشان می‌دهد. بررسی نمونه‌های خاک منطقه معدنی چهارگنبد نشان داد غلظت باریم بین ۴۵ تا ۵۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۲۴۴/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارد. مقادیر ثبت‌شده (به‌جز نمونه شاهد C5 در ۱۵۰۰ متری سد باطله) کمتر از حد مجاز استاندارد حفاظت محیط زیست ایران (۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و حد مجاز مناطق صنعتی (۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. با توجه به مقدار طبیعی باریم در خاک (۱۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، میانگین ۵۶۸ میلی‌گرم) [۱۵]، می‌توان بیان نمود که آلودگی باریم در این منطقه در حال حاضر وجود ندارد. در پژوهش انجام شده توسط Liu و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی خطرات بهداشتی انسان ناشی از قرارگیری در معرض فلزات سنگین از طریق مصرف گندم در نزدیکی سد باطله در شمال چین پرداخته شد. در این مطالعه، فلزات سنگین موجود در خاک‌های کشاورزی و گندم دوازده روستا در نزدیکی سد باطله در باوتو، چین اندازه‌گیری شد تا خطرات بالقوه برای اکوسیستم محلی و سلامت انسان ارزیابی شود. نتایج شاخص‌های عامل آلودگی (Cf) و شاخص انباشت ژئوشیمیایی (Igeo)نشان داد که آلودگی خاک با فلزات سنگین مانند جیوه، سلنیوم و مس جدی است. مقادیر شاخص ترکیبی نمیرو (NCI) نشان داد که حدود ۷۵٪ از نقاط نمونه‌برداری دچار آلودگی فلزات سنگین هستند. همچنین، شاخص خطر اکولوژیکی خاک (IRs) در غرب سد باطله بیشتر از نواحی جنوب غربی بود که نشان‌دهنده سطوح بالاتر جیوه و کادمیم است. شاخص خطر (HQ) منگنز برای بزرگ‌سالان و کودکان بیش از ۳ بود، در حالی که HQ مس برای کودکان بیش از ۱ بود؛ شاخص خطر ترکیبی (HI) برای هر دو گروه بزرگ‌سالان و کودکان بیش از ۲ بود. نتایج نشان می‌دهند که مصرف طولانی‌مدت گندم آلوده به فلزات سنگین در این منطقه می‌تواند منجر به خطرات بهداشتی غیرکارسینوژنیک، به‌ویژه در کودکان شود. تجمع کادمیم در دو روستا خطرات کارسینوژنیک برای سلامت انسان ایجاد کرد. این مطالعه بر لزوم اقدامات فوری برای مدیریت آلودگی خاک‌های کشاورزی در نزدیکی سدهای باطله به منظور کاهش خطرات بهداشتی برای انسان تأکید دارد [۱۶].

جدول ۹- توصیف آماری مقادیر باریم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نمونه های خاک سطحی منطقه معدن مس چهارگنبد

عنصر	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
باریم	۲۴۴/۸	۴۵	۵۰۲	۱۶۰/۱	۶۵/۴۱	۰/۷۹	-۰/۲۴
کبالت	۱۷	۱۲	۳۱	۷/۰۵	۴۱/۴۹	۱/۵	۰/۸۹
مولیبدن	۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۹	۰/۱۳	۲۱	۰/۷۲	۰/۶۳
نیکل	۳۰/۶۶	۱۴	۷۰	۱۷/۹۷	۵۸/۶۲	۱/۳۷	۲/۱۲
وانادیم	۱۲۴/۷۷	۷۲	۲۰۹	۵۰/۰۴	۴۰/۱۰	۰/۸۱	-۱/۱۰

در پژوهشی که توسط Konanç و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد، اثرات زیست‌محیطی آلودگی ناشی از معادن متروکه مس بررسی گردید. این مطالعه بر روی اثرات باقی‌مانده از زباله‌های معدنی یک معدن مس که بین سال‌های ۱۹۰۵ تا ۱۹۲۸ توسط شرکت Caucasus Copper Limited و بعد از آن در سال ۱۹۳۶ توسط Etibank بازنگری و راه‌اندازی شده بود، تمرکز داشت. عملیات معدنی این معدن ۷۵ سال پیش متوقف شده است. نمونه‌های خاک و گیاه از پنج منطقه مختلف اطراف معدن جمع‌آوری و میزان عناصر سمی مانند As، Zn، Pb، Cd، Ni، Mn، Cr، Cu، Al و Fe اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده برای محاسبه شاخص‌های مختلف آلودگی از جمله شاخص غنی‌سازی(EF) ، شاخص تجمعی ژئو(Igeo) ، شاخص آلودگی(CF) ، شاخص خطر زیست‌محیطی(ERI)، شاخص خطر سلامتی انسان (BCF) و شاخص غنی‌سازی گیاهی (EFPlant) استفاده شد. در نمونه‌های خاک، مقادیر بالای EF برای عناصر As (۴۵۳)، Cu (۵۹/۹)، Pb (۳۰/۷) و Zn (۵/۲۶) شناسایی شد. همچنین مقادیر بالای Igeo نشان‌دهنده آلودگی شدید در زمینه‌های As(۸/۲۵)، Cd (۶/۷۲)، Cu (۴/۹۴)، Pb (۴/۳۳) و Zn (۴/۴۲) بود. شاخص‌های CF نیز نشان‌دهنده آلودگی جدی ناشی از فلزات سنگین آرسنیک، کادمیم، سرب، مس و روی داشت. مقادیر ERI نشان داد که عناصرCd، As، Cu و Pb خطرات زیست‌محیطی جدی در مناطق مطالعه ایجاد کرده‌اند. همچنین، در نمونه‌های گیاهی غنی‌سازی برای Mn، Cd، Al، Cu، Pb و Fe شناسایی شد. این عناصر سمی به دلیل شرایط فصلی و توپوگرافی محلی قابلیت گسترش بیشتری دارند. این وضعیت نیاز به اندازه‌گیری غلظت فلزات و متالوئیدها در زمان‌های خاص و ارزیابی آلودگی محیطی ناشی از آب‌های سطحی و منابع زیرزمینی در مناطقی با پتانسیل بالای زهکشی از معادن اسیدی را به‌ویژه در سایت‌های دپوی باطله‌های معدن Kuvarshan

نشان می‌دهد [۱۷]. شکل ۶ روند تغییرات غلظت عناصر در نمونه‌های برداشت‌شده از محدوده‌های مختلف، شامل نمونه‌های نزدیک به بستر سد باطله و نمونه‌های خارج از محدوده را نمایش می‌دهد. در هر نمودار، خط افقی مشکی به‌عنوان حد مجاز استاندارد حفاظت محیط زیست هر عنصر مشخص شده است. نتایج حاکی از آن است که دو عنصر وانادیم و نیکل در برخی نمونه‌ها انحراف قابل‌توجهی از استانداردهای تعیین‌شده دارند که این مساله نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر با بهره‌گیری از شاخص‌های آلودگی است. غلظت کبالت در نمونه‌های شاهد نیز فراتر از حد مجاز استاندارد مشاهده شده است. هرچند این نمونه‌ها خارج از محدوده مورد بررسی قرار دارند، اما برای تبیین دلایل این افزایش نسبت به استانداردهای زیست‌محیطی، بررسی‌های تکمیلی ضروری به نظر می‌رسد. به‌طور مشابه، مقادیر کبالت در نمونه‌های نزدیک به بستر سد باطله نیز باید با استفاده از شاخص‌های آلودگی مورد تحلیل دقیق قرار گیرد. در مقابل، ارزیابی غلظت باریم و مولیبدن در نمونه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده مقادیری کمتر از حد استاندارد حفاظت محیط زیست است، که حاکی از عدم نگرانی قابل‌توجه زیست‌محیطی برای این عناصر در منطقه مورد بررسی می‌باشد.



شکل ۶- روند تغییرات عناصر در محدوده سد باطله و خارج از محدوده (نمونه های شاهد) منطقه معدنی چهار گنبد. (خط افقی مشکی، حد مجاز زیست محیطی هر عنصر می‌باشد)

در پژوهشی که Pecina و همکاران (۲۰۲۳) انجام دادند، نشان داده شد که مغولستان به عنوان یکی از کشورهای وابسته به استخراج منابع معدنی در سطح جهانی، با خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی مرتبط با معادن روبه‌رو است. هدف این تحقیق بررسی تأثیرات معادن بر آلودگی خاک با فلزات در سه شهر بزرگ معدن زغال‌سنگ مغولستان (باگانوئر، نالایخ و شارین گول) و همچنین بررسی وضعیت آلودگی خاک و خطرات بهداشتی ناشی از آن در این مناطق بود. نتایج نشان داد که میزان فلزات سنگین مانند کادمیم، مس، سرب و روی در خاک این مناطق معمولاً پایین است و در نتیجه آلودگی شدید و خطرات بهداشتی جدی مشاهده نشد. توزیع آلودگی بیشتر تحت تأثیر طراحی شهری قرار داشت تا وجود معادن. با وجود محدودیت‌های روش‌شناسی در برخی از مطالعات آلودگی خاک در مغولستان، نتایج نشان می‌دهد که تهدید آلودگی در سه شهر بزرگ (اولان‌باتر، دارخان و اردنت) و برخی مناطق معدنی دیگر کم است. در حالی که خطر آرسنیک اغلب به طور غیرطبیعی بزرگ جلوه داده شده است، محتویات کروم در خاک شهری ممکن است تهدیدی نادیده گرفته‌شده باشد [۱۸]. در پژوهشی که Wang و همکاران (۲۰۲۴) انجام دادند، نشان داده شد که این مطالعه به طور خاص بر منطقه معدن هونگلیولین متمرکز بود، جایی که ۴۰ نمونه خاک از شعاع ۱۰۰۰ متر از سد باطله به طور دقیق جمع‌آوری و تحلیل شد. نتایج نشان داد که pH خاک در این محدوده به طور کلی به سمت قلیایی تمایل داشت. در مورد محتوای عناصر مغذی خاک شامل مواد آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر کل، پتاسیم کل، نیتروژن قلیایی، فسفر قابل دسترس و پتاسیم سریع‌العمل، مقادیر بین ۲ تا ۱۴ گرم در کیلوگرم، ۰/۱ تا ۰/۷ گرم در کیلوگرم، ۰/۲ تا ۱/۲ گرم در کیلوگرم، ۱۰ تا ۳۶ گرم در کیلوگرم، ۳ تا ۷ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۳ تا ۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۶ تا ۱۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود که نشان‌دهنده سطوح نسبتاً پایین عناصر مغذی خاک است. در محدوده ۰ تا ۵۰۰ متر از نمونه‌های خاک، مقادیر میانگین کادمیم، جیوه، سرب و آرسنیک به ترتیب ۰/۸، ۰/۲، ۲۵ و ۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بودند که این مقادیر از مقادیر پس‌زمینه خاک استان شانشی بیشتر بود و به عنوان آلاینده‌های اصلی در منطقه مورد مطالعه شناخته شدند. در این محدوده، مقادیر میانگین هشت فلز سمی به ترتیب ۱/۷ (جیوه)، ۱/۴ (آرسنیک)، ۱/۱ (کروم)، ۱/۱ (سرب)، ۰/۶ (روی)، ۰/۵ (کادمیم)، ۰/۳ (مس) و ۰/۳ (نیکل) بودند. به جز جیوه، آرسنیک، کروم و سرب که آلودگی اندکی داشتند، سایر فلزات سمی در محدوده قابل قبول آلودگی برای این نمونه‌ها قرار داشتند که این نتایج با استفاده از روش شاخص تجمعی زمین نیز تأیید شد. شاخص خطر اکولوژیکی پتانسیل میانگین برای هشت فلز سمی در منطقه مطالعه ۱۸۵ بود که نشان‌دهنده سطح آلودگی متوسط است. زمانی که به ارزیابی عناصر جداگانه پرداخته شد، نسبت‌های خطر اکولوژیکی مربوط به جیوه، آرسنیک، سرب و کادمیم به ترتیب ۳۵٪، ۲۷٪، ۲۵٪ و ۲۳٪ بود که این نشان می‌دهد که عناصر اصلی خطر اکولوژیکی در منطقه جیوه و آرسنیک هستند و به دنبال آن کادمیم و سرب قرار دارند. همچنین فلزات سمی جیوه و سرب، به همراه آرسنیک و سرب، همبستگی مثبت معناداری در منطقه نمونه‌گیری نشان دادند که حاکی از منبع مشترک است [۱۹]. بررسی فاکتور غنی‌شدگی عناصر مورد مطالعه نشان می‌دهد (جدول ۱۰) که به‌طور کلی، تمامی این عناصر در محدوده دسته‌بندی عناصر با حداقل غنی‌شدگی قرار می‌گیرند. این نتیجه، به‌جز نمونه C8 از عنصر وانادیم، حاکی از آن است که فعالیت‌های انسانی نقش قابل‌توجهی در افزایش مقادیر این عناصر نداشته‌اند. نمونه C8 که دارای سطح بالاتری از غنی‌شدگی وانادیم است، ممکن است به دلایلی مانند تأثیرات محدود فعالیت‌های انسانی، ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاص منطقه، یا عوامل طبیعی مانند انتقال باد و رسوب‌گذاری غیرمتوازن تحت تأثیر قرار گرفته باشد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، نیاز به تحلیل‌های تکمیلی با استفاده از شاخص‌های دیگری نظیر فاکتور انتقال یا مدل‌سازی‌های ژئوشیمیایی وجود دارد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر پایین غنی‌شدگی در سایر نمونه‌ها تأییدی بر غالب بودن منشأ طبیعی عناصر است، به‌ویژه با توجه به موقعیت منطقه و ساختار زمین‌شناسی آن. این یافته‌ها می‌توانند به درک بهتر تأثیرات متقابل میان فرآیندهای طبیعی و انسانی در تغییرات شیمیایی خاک و رسوبات کمک کرده و به برنامه‌ریزی مناسب برای مدیریت محیط زیستی منطقه یاری رسانند.

جدول ۱۰- فاکتور غنی شدگی عناصر مورد مطالعه در نمونه های خاک

شماره نمونه خاک	موقعیت	وانادیم	نیکل	مولیبدن	کبالت	باریم
C۱	سد*	۱/۶۴	۳/۷۴	۰/۶۴	۱/۵۰	۰/۳۴
C۲	سد	۱/۶۶	۱/۶۲	۰/۵۶	۱/۶۲	۰/۱۹
C۳	سد	۱/۶۳	۰/۹۵	۰/۵۵	۱/۶۳	۰/۵۷
C۴	سد	۱/۷۱	۰/۹۳	۰/۴۹	۱/۳۷	۰/۴۴
C۵	شاهد**	۱/۹۹	۱/۲۰	۰/۲۰	۱/۷۷	۰/۵۲
C۶	شاهد	۱/۸۴	۱/۰۱	۰/۲۲	۱/۶۱	۰/۵۴
C۷	شاهد	۱/۹۷	۲/۴۰	۰/۵۳	۱/۵۵	۰/۵۹
C۸	سد	۲/۳۱	۰/۵۶	۰/۳۴	۱/۳۷	۰/۰۷
C۹	سد	۱/۵۷	۰/۷۶	۰/۲۵	۱/۰۲	۰/۲۵
ضریب غنی شدگی		†	†	†	†	†

† حداقل غنی شدگی، †† غنی شدگی کم، †††غنی شدگی قابل توجه، ††††غنی شدگی زیاد، †††††غنی شدگی بسیار زیاد

*سد: نمونه های نزدیک به سد باطله

**شاهد: نمونه خارج از منطقه به عنوان شاهد

در پژوهشی که Demková و همکاران (۲۰۱۷) انجام دادند، نشان داده شد که سمّیت و ماندگاری فلزات سنگین که به‌عنوان نتیجه فعالیت‌های صنعتی مختلف در محیط انباشته می‌شوند، یک مشکل زیست‌محیطی جدی در سطح جهانی به شمار می‌آید. استخراج معدنی شدید در مناطق معدنی باعث تولید مقادیر زیادی مواد زائد و باطله شده است که فلزات سمی را به محیط آزاد می‌کنند. هدف این مطالعه تعیین میزان فلزات سنگین در دو بازه زمانی (۱۹۹۷ و ۲۰۱۵) در نمونه‌های خاک جمع‌آوری‌شده از ده نقطه نمونه‌برداری واقع در منطقه معدنی سابق در مرکز اسپیش (اسلواکی) بود. برای مقایسه سطح آلودگی، شاخص‌های عامل آلودگی(Cif)، درجه آلودگی (Cd) و شاخص بار آلودگی (PLI) محاسبه شدند. ضریب همبستگی اسپیرمن برای شناسایی روابط بین فلزات سنگین به کار گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده وضعیت جدی برای جیوه، روی و کادمیم بود که مقادیر آنها در تمام سایت‌های نمونه‌برداری در هر دو سال مطالعه از حد مجاز فراتر رفته بود. در سال ۱۹۹۷، مقادیر متوسط شاخص آلودگی نشان‌دهنده آلودگی بسیار بالا با تمامی فلزات سنگین مطالعه‌شده و آلودگی متوسط با کبالت بود. در سال ۲۰۱۵، منطقه مطالعه به‌عنوان ناحیه‌ای با آلودگی بسیار بالا با آرسنیک، جیوه، روی و مس و آلودگی قابل‌توجه با نیکل، کروم، سرب و کادمیم طبقه‌بندی شد، در حالی که آلودگی کبالت شناسایی نشد. از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۵، شاخص بار آلودگی تقریباً ۳۸ درصد کاهش یافت، با این حال، تقریباً تمامی سایت‌های نمونه‌برداری به‌عنوان مناطق آلوده شدید طبقه‌بندی شدند. با وجود این که فعالیت‌های معدنی در اوایل قرن ۲۱ متوقف یا محدود شد، حضور فلزات سنگین در خاک‌ها همچنان در سطح جدی باقی مانده است. سطح بالای آلودگی نتیجه ماندگاری و غیرزیست‌تجزیه‌پذیری فلزات سنگین است [۲۰].

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل شاخص زمین‌انباشت (جدول ۱۱)، عناصر مورد بررسی در طبقات مختلف این شاخص جای گرفته‌اند که بیانگر وضعیت تجمع یا آلودگی احتمالی هر عنصر در محیط خاک منطقه است. مطابق این نتایج، عناصر مولیبدن و باریم به‌طور کامل در کلاس ۰ قرار دارند. این طبقه‌بندی نشان‌دهنده عدم آلودگی این عناصر و غلظت‌های طبیعی آنها در محیط خاک است. قرارگیری این عناصر در کلاس ۰ به وضوح بیان می‌کند که نه تنها فعالیت‌های انسانی، بلکه عوامل محیطی نیز تأثیر محسوسی بر غنی‌سازی آنها نداشته‌اند. عنصر کبالت در دو کلاس ۰ و ۱ شناسایی شد. این وضعیت نشان‌دهنده عدم آلودگی یا آلودگی خفیف این عنصر در برخی نمونه‌هاست. حضور کبالت در کلاس ۱ احتمالاً ناشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی یا تأثیرات جزئی فعالیت‌های انسانی است که نیازمند مطالعه دقیق‌تر برای تبیین منبع این تغییرات می‌باشد. عناصر وانادیم و نیکل، در کلاس‌های ۱ و ۲ طبقه‌بندی شدند که نشانگر آلودگی خفیف تا متوسط این عناصر در برخی نقاط منطقه است. این نتایج به‌ویژه برای این دو عنصر، حاکی از تأثیرات محیطی بیشتری نسبت به سایر عناصر مورد مطالعه بوده و ممکن است به عواملی نظیر نزدیکی به بستر سد باطله، رسوب‌گذاری از فعالیت‌های معدنی یا انتقال ذرات به کمک باد مرتبط باشد. در پژوهش انجام شده توسط Ma و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی منابع، آلودگی و خطرات اکولوژیکی عناصر سمی بالقوه در خاک‌های سطحی حاشیه شمال شرقی فلات تبت پرداخته شد. در این مطالعه،

میزان هفت عنصر سمی بالقوه (کادمیم، مس، سرب، روی، آرسنیک، کروم و نیکل) در ۳۲ نمونه خاک سطحی (۰-۲ سانتیمتر) از مناطق مختلف حوضه قایدام در حاشیه شمال شرقی فلات تبت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت این فلزات سنگین در خاک‌ها متغیر بود، به طوری که مقادیر آرسنیک، کادمیم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی به ترتیب در بازه‌های ۱۰/۴–۲۹/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۰/۰۸–۴/۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۱۹–۶۶ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۸/۲–۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۱۱/۷–۳۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۱۱/۱–۳۱/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۳۲–۲۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم قرار داشتند. تحلیل‌های همبستگی نشان داد که در مناطق بدون سکونت، همبستگی بین سرب و کادمیم ۰/۸۹۶ بود. همچنین، تحلیل‌های مختلف همبستگی در مناطق کشاورزی، دریاچه‌های شور و مناطق مسکونی نشان‌دهنده تاثیرات فعالیت‌های انسانی بر توزیع این فلزات بود. بر اساس نتایج شاخص‌های انباشت ژئوشیمیایی و شاخص آلودگی تک‌عاملی، کادمیم به عنوان مهم‌ترین آلاینده شناخته شد. شاخص آلودگی جامع نمرو نشان داد که ۱۸/۸۹ ٪ و ۱۸/۴۶ ٪ از مناطق به ترتیب دارای آلودگی متوسط و شدید بودند. نتایج شاخص خطر اکولوژیکی نیز نشان داد که ۱۸/۸ ٪ از نقاط دارای خطر اکولوژیکی بسیار بالا و بالا بودند. این نتایج نشان‌دهنده تأثیرات منفی فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست خاک در حوضه قایدام و گسترش این تأثیرات به مناطق بدون سکونت است. بنابراین، ضروری است که به تاثیرات فعالیت‌های انسانی بر کیفیت محیط‌زیست توجه بیشتری شود و اقدامات پیشگیرانه‌ای برای کاهش آلودگی فلزات سمی در فلات تبت اتخاذ گردد [۲۱].

جدول ۱۱- شاخص زمین انباشت عناصر مورد مطالعه در نمونه های خاک

شماره نمونه خاک	وانادیم	نیکل	مولیبدن	کبالت	باریم
C۱	۰/۰۳	۱/۲۲	-۱/۳۲	-۰/۱۰	-۲/۲۳
C۲	-۰/۰۷	-۰/۱۰	-۱/۶۴	-۰/۱۰	-۳/۲۰
C۳	-۰/۳۲	-۱/۱۰	-۱/۸۸	-۰/۳۲	-۱/۸۴
C۴	۰/۲۲	-۰/۶۶	-۱/۵۸	-۰/۱۰	-۱/۷۳
C۵	۱/۲۲	۰/۴۹	-۲/۰۹	۱/۰۵	-۰/۷۲
C۶	۱/۰۴	۰/۱۸	-۲/۰۳	۰/۸۵	-۰/۷۳
C۷	۰/۰۲	۰/۳۰	-۱/۸۸	-۰/۳۲	-۱/۷۲
C۸	۰/۹۳	-۱/۱۰	-۱/۸۴	۰/۱۸	-۴/۲۰
C۹	۰/۳۰	-۰/۷۴	-۲/۳۲	-۰/۳۲	-۲/۳۴
Igeoکلاس	۰، ۱، ۲	۰، ۱، ۲	۰	۰، ۱	۰

در پژوهشی که Akoto و همکاران (۲۰۲۳) انجام دادند، نشان داده شد که استخراج معدن باعث تولید مقادیر زیادی باطله می‌شود که در صورت عدم مدیریت مناسب، می‌تواند فلزات سمی را آزاد کرده و آلودگی محیطی گسترده‌ای ایجاد کند. این مطالعه بر آلودگی فلزات سنگین در لایه‌های سطحی خاک در منطقه معدن نانگودی در شمال غنا متمرکز بود. در این مطالعه، ۲۴ نمونه خاک از منطقه تحقیق و نمونه‌های شاهد جمع‌آوری و برای اندازه‌گیری مقادیر جیوه، سرب، کادمیم، آرسنیک، کروم و آهن با استفاده از اسپکتروسکوپی جذب اتمی تحلیل شدند. نتایج ارزیابی‌های شاخص آلودگی و شاخص تجمعی زمین (Igeo) نمونه‌های خاک را به عنوان آلودگی متوسط تا شدید طبقه‌بندی کردند. نمونه‌های خاک به شدت با آرسنیک غنی شده بودند و به طور متوسط با سرب و جیوه غنی شده بودند. تجزیه و تحلیل‌های چندمتغیره مانند تحلیل عاملی و تحلیل خوشه‌ای برای بررسی رابطه بین فلزات و تمایز تأثیر محتوای طبیعی فلزات از تأثیر فعالیت‌های انسانی به کار گرفته شدند. تحلیل عاملی سه عامل آلوده‌کننده در خاک را شناسایی کرد. کادمیم، آهن، آرسنیک و سرب که با عامل اول همبسته بودند، ناشی از فعالیت‌های انسانی بودند. همبستگی بالای آرسنیک و سرب نشان‌دهنده مشابهت در منابع آنها است. عامل دوم که تحت تأثیر جیوه بود به عنوان یک مؤلفه انسانی در نظر گرفته شد. عامل سوم که با کروم همبسته بود، می‌تواند یک مؤلفه طبیعی باشد. تحلیل همبستگی و تحلیل خوشه‌ای یکدیگر را تأیید کردند [۲۲]. در پژوهش انجام شده توسط He و همکاران (۲۰۲۳)، ویژگی‌های آلودگی فلزات سنگین و ارزیابی خطرات سیستماتیک محیط‌زیست اطراف سایت‌های ذخیره‌سازی باطله‌های معدنی بررسی شد. در این مطالعه، محیط اطراف باطله‌های رهاشده به‌عنوان یک کل مورد بررسی قرار گرفت تا ارزیابی جامعی از آلودگی محیط‌زیست انجام گیرد که اساس کنترل آلودگی و مدیریت دقیق باطله‌ها را فراهم می‌آورد. برای ارزیابی

خطر آلودگی خاک‌های کشاورزی، آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و رسوبات، شاخص‌های آلودگی تک‌عنصری و چندعنصری انتخاب شدند و سپس امتیاز خطر آلودگی جامع هر عنصر در محیط محاسبه گردید. در ادامه، با استفاده از ضرایب وزنی خطرات برای گیرنده‌های مختلف محیط‌زیستی، امتیاز کلی وضعیت آلودگی سایت باطله و محیط‌زیست اطراف آن به‌دست آمد. نتایج نشان داد که میانگین مقادیر فلزات سنگین در خاک‌ها و رسوبات بالاتر از مقادیر متوسط چین و مقادیر پس‌زمینه بود، به‌جز کروم. غلظت متوسط کادمیم، مس، سرب، روی و آرسنیک در آب‌های سطحی و غلظت کادمیم، مس و روی در آب‌های زیرزمینی از مقادیر استاندارد فراتر رفته بود. امتیاز خطر آلودگی جامع هر عنصر در محیط اطراف باطله‌ها به ترتیب شامل کادمیم، مس، آرسنیک، روی، سرب و کروم بود. نتایج نشان داد که کادمیم و مس به‌عنوان مهم‌ترین عوامل آلودگی محیط‌زیست شناخته شدند. امتیاز کلی وضعیت آلودگی محیط اطراف باطله‌ها در این مطالعه برابر با ۵/۳۷ بود که در سطح III قرار گرفت. ترکیب منابع طبیعی و فعالیت‌های معدنی به‌عنوان عامل اصلی آلودگی خاک‌ها و رسوبات شناسایی شد. نتیجه‌گیری نشان‌دهنده وضعیت جدی آلودگی در منطقه است که تهدیدی برای ایمنی محصولات کشاورزی و سلامت انسان محسوب می‌شود، و روش ارزیابی جامع می‌تواند وضعیت فعلی آلودگی محیط اطراف باطله‌ها را به‌طور مؤثر ارزیابی کند [۲۳].

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی وضعیت آلودگی خاک در منطقه معدنی چهارگنبد، به‌ویژه در اطراف سد باطله، پرداخته است. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی غلظت عناصر سنگین مانند وانادیم، نیکل، کبالت، مولیبدن و باریم در نمونه‌های خاک منطقه و تحلیل تأثیر این عناصر بر محیط زیست بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده آن است که مقادیر برخی از عناصر، به‌ویژه وانادیم و نیکل، در نمونه‌های نزدیک به بستر سد باطله از حد مجاز استانداردهای زیست‌محیطی فراتر رفته است. این امر به‌طور واضح نشان‌دهنده آلودگی ناشی از فعالیت‌های معدنی یا فرآیندهای زمین‌شناسی محلی است که به بررسی‌های بیشتر و اقدامات مدیریتی ویژه نیاز دارد. علاوه بر نیکل و وانادیم، غلظت کبالت نیز در برخی نمونه‌ها از حد مجاز بالاتر بوده است، که می‌تواند به‌واسطه تأثیرات ترکیبی عوامل طبیعی و انسانی به‌ویژه در نواحی نزدیک سد باطله باشد. این امر بر لزوم پایش مداوم و دقیق‌تر تأثیرات فعالیت‌های معدنی بر آلودگی خاک و منابع آبی تأکید دارد. در عین حال، مولیبدن و باریم که غلظت‌های آن‌ها در تمامی نمونه‌ها پایین‌تر از حد استاندارد بوده، نگرانی زیست‌محیطی خاصی را ایجاد نمی‌کنند و نشان‌دهنده عدم تأثیرات منفی قابل توجه از این عناصر در منطقه هستند. با توجه به شاخص‌های غنی‌شدگی، نتایج نشان می‌دهد که بیشتر عناصر مورد بررسی در محدوده حداقل غنی‌شدگی قرار دارند، به‌جز وانادیم که در یک نمونه خاص افزایش قابل توجهی داشته است. این افزایش می‌تواند به‌واسطه فعالیت‌های انسانی یا تأثیرات طبیعی مانند فرایندهای ژئوشیمیایی محلی باشد که نیاز به ارزیابی دقیق‌تر دارد. همچنین، تحلیل شاخص زمین‌انباشت نشان‌دهنده عدم آلودگی یا آلودگی خفیف تا متوسط در برخی نمونه‌ها بود که به‌ویژه در مورد وانادیم و نیکل مشاهده شد. مقایسه داده‌های خاک منطقه با ترکیب شیمیایی سنگ‌های مادر نشان داد که فرآیندهای زمین‌شناسی محلی و ساختار ژئوشیمیایی منطقه نقش مهمی در ترکیب شیمیایی خاک دارند. این مقایسه‌ها بر اهمیت بررسی منابع آلودگی در سطح منطقه‌ای و همچنین تأثیرات فرآیندهای طبیعی بر ترکیب خاک تأکید می‌کند. در نهایت، این مطالعه بر اهمیت استفاده از مدل‌سازی‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های تکمیلی برای مدیریت محیط زیستی منطقه تأکید دارد. پایش مستمر و ارزیابی دقیق‌تر منابع آلودگی، به‌ویژه در نواحی نزدیک به سد باطله، برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و سلامت انسان‌ها ضروری است. همچنین، با توجه به نتایج این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی برای کاهش آلودگی خاک و بهبود کیفیت محیط زیست منطقه به‌طور جدی‌تر در دستور کار قرار گیرد.

۵- منابع

1. Singh, S., L. B. Sukla, and S. K. Goyal, Mine Waste & Circular Economy. Materials Today: Proceedings, 2020. 30: p. 332-339.
2. Shengo, L. M., Review of Practices in the Managements of Mineral Wastes: The Case of Waste Rocks and Mine Tailings. Water, Air, & Soil Pollution, 2021. 232(7): p. 273.

3. Kossoff, D., W. E. Dubbin, M. Alfredsson, S. J. Edwards, M. G. Macklin, and K. A. Hudson-Edwards, Mine Tailings Dams: Characteristics, Failure, Environmental Impacts, and Remediation. Applied Geochemistry, 2014. 51: p. 229-245.
4. Saffari, M., S. M. Moosavirad, M. J. Hassani, M. S. Ghazanfari Moghadam, M. Shakeri, and N. Nazari, Investigation of Quantitative Status and Pollution Indices of Some Pollutants in Surface Soils as Affected by Tailings Dam (Case Study: Chahar Gonbad Copper Mine). Iranian Journal of Soil and Water Research, 2021. 52(2): p. 421-437.
5. Hatje, V., R. M. Pedreira, C. E. de Rezende, C. A. F. Schettini, G. C. de Souza, D. C. Marin, and P. C. Hackspacher, The Environmental Impacts of One of the Largest Tailing Dam Failures Worldwide. Scientific Reports, 2017. 7(1): p. 10706.
6. Wang, Q., Cai, J., Gao, F., Li, Z., and Zhang, M, Pollution level, ecological risk assessment and vertical distribution pattern analysis of heavy metals in the tailings dam of an abandoned Lead–Zinc mine. Sustainability, 2023. 15(15): p. 11987.
7. Buch, A. C., Sims, D. B., de Ramos, L. M., Marques, E. D., Ritcher, S., Abdullah, M. M., and Silva-Filho, E. V, Assessment of environmental pollution and human health risks of mine tailings in soil: after dam failure of the Córrego do Feijão Mine (in Brumadinho, Brazil). Environmental Geochemistry and Health, 2024. 46(3): p. 72.
8. McLennan, S. M., and S. R. Taylor, Geochemical Constraints on the Growth of the Continental Crust. The Journal of Geology, 1982. 90(4): p. 347-361.
9. Yousefi Sharik Abad, S. J., A. Aftabi, E. Esmailzadeh, and I. Islami, Application of Multivariate Statistical Methods for Differentiating Sediments and Determining the Source of Toxic Elements in the Chargondeh Copper Mine Area, Sirjan. In Proceedings of the 15th Conference of the Iranian Geological Society, 2012. Tehran.
10. Akter, J., J. Juwon, T. Taesung, J. Gyu, and H. Lee, Contamination Assessment of Pollutants and Sediments of Abandoned Mines Using Integrated Pollution Index (IPI). Desalination and Water Treatment, 2020. 200: p. 383-389.
11. Saadat, S., Evaluating a Sediment Pollution Using Contamination Indices and Risk Assessment in Mineralized Zones, Eastern Iran. Journal of Mining and Environment, 2022. 13(4): p. 1239-1253.
12. Wu, L., W. Yue, J. Wu, C. Cao, H. Liu, and Y. Teng, Metal-Mining-Induced Sediment Pollution Presents a Potential Ecological Risk and Threat to Human Health Across China: A Meta-Analysis. Journal of Environmental Management, 2023. 329: p. 117058.
13. Kırıs, E., and H. Baltas, Assessing Pollution Levels and Health Effects of Heavy Metals in Sediments Around Cayeli Copper Mine Area, Rize, Turkey. Environmental Forensics, 2021. 22(3-4): p. 372-384.
14. Kırıs, E., and H. Baltas, Assessing Pollution Levels and Health Effects of Heavy Metals in Sediments Around Cayeli Copper Mine Area, Rize, Turkey. Environmental Forensics, 2021. 22(3-4): p. 372-384.
15. Bowen, H. J. M., A. M. Ure, and M. L. Berrow, The Elemental Constituents of Soils. 1982.

16. Liu, J., Si, W., Xiao, Z., Tang, R., Niu, P., Fu, Y., and Shen, W, Risks to Human Health of Exposure to Heavy Metals through Wheat Consumption near a Tailings Dam in North China. Polish Journal of Environmental Studies, 2023. 32(4): p. 3195-3207.
17. Konanç, M. U., G. D. Değermenci, İ. A. Kariper, and E. Yavuz, After-Effects of a Closed Copper Mine: Detailed Analysis of Environmental Impacts in Soil and Plant Samples. Environmental Earth Sciences, 2024. 83(13): p. 412.
18. Pecina, V., D. Juřička, J. Hedbávný, M. Klimánek, J. Kynický, M. Brtnický, and R. Komendová, The Impacts of Mining on Soil Pollution with Metal (Loid)s in Resource-Rich Mongolia. Scientific Reports, 2023. 13(1): p. 2763.
19. Wang, N., Z. Liu, Y. Sun, N. Lu, and Y. Luo, Analysis of Soil Fertility and Toxic Metal Characteristics in Open-Pit Mining Areas in Northern Shaanxi. Scientific Reports, 2024. 14(1): p. 2273.
20. Demková, L., T. Jezný, and L. Bobuľská, Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in a Former Mining Area-Before and After the End of Mining Activities. Soil & Water Research, 2017. 12(4).
21. Ma, Y., Wang, Q., Su, W., Cao, G., Fu, G., and Du, W, Potential sources, pollution, and ecological risk assessment of potentially toxic elements in surface soils on the north-eastern margin of the Tibetan Plateau. Toxics, 2022. 10(7): p. 368.
22. Akoto, O., S. Yakubu, L. A. Ofori, N. Bortey-Sam, N. O. Boadi, J. Horgah, and L. N. Sackey, Multivariate Studies and Heavy Metal Pollution in Soil from Gold Mining Area. Heliyon, 2023. 9(1).
23. He, Y., Zhang, Q., Li, H., Wang, W., and Hua, J, Heavy metal pollution characteristics and systemic risk assessment of the environment around the tailings site. Journal of Soils and Sediments, 2024. 24(1): p. 217-229.