Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2021.313579.668800 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۲، اردیبهشت ۱۴۰۰ (ص ۴۳۷-۴۲۱)

Investigation of Quantitative Status and Pollution Indices of Some Pollutants in Surface Soils as Affected by Tailings Dam (Case study: Chahar Gonbad copper mine)

MAHBOUB SAFFARI[1*], SEYED MORTEZA MOOSAVIRAD[1], MOHAMMAD JAVAD HASSANI[1], MOHAMMAD SADEGH GHAZANFARI MOGHADAM[1], MARJAN SHAKERI[2], NAJMEH NAZARI[2]

1. Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
2. Environmental Protection Organization of Kerman Province, Kerman, Iran.
(Receieved: Nov. 14, 2020- Revised: Jan. 10, 2021- Accepted: Jan. 18, 2021)

ABSTRACT

Mine tailings dams, as one of the important and unavoidable parts of any mine, are considered as a sources of environmental pollution in the areas adjacent to each mine, which has received less attention from an environmental point of view. The present study was conducted to investigate the environmental effects of the tailings dam of Chahar Gonbad copper mine on changes in quantities of some soil pollutants adjacent to the tailings dam of this mine. In this study, according to the location of the region, six samples of sediment from the tailing dam and nine samples of topsoil were collected and the amounts of Pb, Sb, Zn, Cd, As and Cu; as well as soil pollution indices of each element (enrichment factor (EF), Geo-accumulation factor (Igeo), and contamination factor (CF)) were measured and compared with the environmental protection standard. The results of pollutants in sediments showed significant enrichment of Cu and Sb elements in tailings dam sediment samples. Based on the standard values of soil pollution, with the exception of high levels of Cu (38-135 mg kg^{-1}) and As (7.2-17.8 mg kg^{-1}) in some samples, the observed levels of Pb, Zn, Cd and Sb in all soil samples were lower than the environmental protection standards. According to the results of soil pollution indices, the two elements Sb and As had higher EF and Igeo than the other elements, which shows the effect of anthropogenic factors (tailings dam) on amounts of these elements. The results of this study showed, despite the high amounts of Cu in the soil surface samples (due to the nature of the Cu vein deposit in the region), the area adjacent to the dam is not contaminated with other pollutants, although EF of As (4-15.3) and Sb (3-5.9) can be a serious alarm to pollute the area with these elements in the coming years. Based on the obtained results, it is suggested that changes in the pollution of tailings dams as one of the sources of environmental pollution in the areas adjacent to the mines, be continuously assessed and appropriate management measures be applied.

Keywords: Mining Operations, Enrichment Factor, Geo-Accumulation, Pollution, Environmental Standard.

*Corresponding Author's Email: mahboobsaffari@gmail.com
www.SID.ir

Archive of SID

بررسی وضعیت کمی و شاخص‌های آلودگی برخی عناصر آلاینده در خاک‌های سطحی، متأثر از سد باطله معدن (مطالعه موردی: معدن مس چهارگنبد)

محبوب صفاری[1*]، سید مرتضی موسوی راد[1]، محمد جواد حسنی[1]، محمدصادق غضنفری مقدم[1]، مرجان شاکری[2]، نجمه نظری[2]

۱. پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۲. اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان کرمان، کرمان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۴- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹)

چکیده

سدهای باطله معادن به عنوان یکی از ارکان مهم و غیرقابل اجتناب هر معدن، به عنوان یکی از منابع آلوده کننده محیط زیست نواحی مجاور هر معدن محسوب می‌شوند که از دیدگاه زیست‌محیطی توجه کمتری به آن شده است. پژوهش حاضر به منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی سد باطله معدن مس چهارگنبد سیرجان، بر تغییرات مقادیر کمّی برخی آلاینده‌های خاک‌های مجاور سد باطله این معدن انجام گرفت. در این پژوهش، با توجه به موقعیت منطقه، شش نمونه رسوب از سد باطله و نه نمونه خاک سطحی برداشت و مقادیر کمّی آلاینده‌های سرب، آنتیموان، روی، کادمیم، آرسنیک و مس اندازه گیری و شاخص‌های آلودگی هر عنصر (فاکتور غنی‌شدگی،فاکتور زمین انباشت و فاکتور آلودگی) انجام شد و مقادیر کمّی هر عنصر در خاک با استاندارد حفاظت محیط زیست مقایسه گردید. نتایج مقادیر آلاینده‌ها در رسوبات، نشان از غنی‌شدگی قابل توجه عناصر مس و آنتیموان در نمونه‌های رسوبات سد باطله داشت. بر اساس مقادیر استاندارد آلایندگی خاک، به استثنا مقادیر بالای مس (۳۸-۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و آرسنیک (۷/۲-۱۷/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در برخی نمونه‌ها، مقادیر مشاهده شده سرب، روی، کادمیم و آنتیموان در همه نمونه‌های خاک، پایین‌تر از حد استاندارد حفاظت محیط زیست مشاهده شد. با توجه به نتایج شاخص‌های آلودگی خاک، دو عنصر آنتیموان و آرسنیک دارای غنی‌شدگی و انباشتگی بالاتری نسبت به سایر عناصر بودند که دخالت عوامل انسان‌زا (سد باطله) بر مقادیر کمّی این عناصر را نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد، علی‌رغم مقادیر بالای مس در نمونه‌های خاک‌های سطحی (با توجه به ماهیت کانسار رگه‌ای مس منطقه)، منطقه مجاور سد، آلوده به سایر عناصر بالقوه آلاینده نمی‌باشد، هرچند که غنی‌شدگی دو عنصر آرسنیک (۴-۱۵/۳) و آنتیموان (۳-۵/۹) می‌تواند زنگ خطری جدی برای آلودگی منطقه به این عناصر در سال‌های آتی باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، پیشنهاد می‌گردد که تغییرات آلودگی سدهای باطله به عنوان یکی از منابع آلاینده محیط زیست نواحی مجاور معادن، به صورت مستمر بررسی و تمهیدات مدیریتی مناسبی اعمال گردد.

واژه‌های کلیدی: عملیات معدنی، فاکتور غنی‌شدگی، زمین انباشت، آلودگی، استاندارد محیط‌زیست.

مقدمه

امروزه با توجه به رویکرد خاص کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به مسئله حفاظت از محیط زیست، مطالعات بسیاری در زمینه‌های مختلف شناسایی، ارزیابی و مدیریت اثرات عوامل تخریب‌زا بر محیط زیست انجام گرفته است، که بررسی چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از صنایع معدنی در رأس این پژوهش‌ها قرار دارد. در طی عملیات‌های استخراج و فرآوری هر معدن، به همراه استحصال مواد معدنی (سنگ‌ها و تخریب آن‌ها) ارزشمند، مقادیر زیادی مواد زائد، حاوی غلظت بالایی از عناصر بالقوه آلاینده، تولید می‌شود که این مواد تحت عنوان باطله معدن شناخته می‌شوند (Kossoff *et al.*, 2014). مواد باطله در هر معدن به مکانی در ظاهر امن، به نام سد باطله منتقل می‌شوند که علاوه بر نگهداری مواد باطله جامد، نگهدارنده زه‌آب‌های حاصل از فرآیندهای تغلیظ در کارخانه های فرآوری مواد معدنی می‌باشند. بر اساس تحقیقات انجام شده، ترکیبات متنوع مواد باطله و زه‌آب‌های ناشی از آن‌ها می‌تواند بر کیفیت آبهای منطقه (سطحی و زیرزمینی) و خصوصیات فیزیکو-شیمیایی خاک‌های مناطق مجاور، اثرات نامطلوبی بگذارد (Wang *et al.*, 2017; Uugwanga and Kgabi, 2020). وجود مقادیر بالا از عناصر با پتانسیل آلایندگی بالا (با توجه به نوع مواد مادری سنگ‌ها و فرایندهای ثانویه اثرگذار بر آن‌ها) در رسوبات سد باطله می‌تواند در طولانی مدت، به دلیل فرایندهای ناشی از فرسایش آبی و بادی

* نویسنده مسئول: mahboobsaffari@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

(به صورت گرد و غبار) و همچنین نفوذ زه‌آب‌های سد باطله تحت نیروهای موئینگی افقی و عمودی، سبب آلودگی خاک‌های نزدیک به سد باطله و مناطق مجاور معادن شوند (García-Giménez and Jiménez-Ballesta, 2017; Mileusnić *et al.*, 2014). گسترش و پراکندگی عناصر بالقوه آلاینده در منابع خاک، علاوه بر آلوده نمودن منابع آبی، می‌تواند با ورود به چرخه غذایی دام و انسان، سبب ایجاد برخی بیماری‌های خاص در نزدیک مناطق مجاور معدنی شود (Rashed, 2010). بر اساس استانداردهای کیفیت منابع خاک و راهنمای آن (سازمان حفاظت محیط زیست، معاونت محیط زیست انسانی، دفتر آب و خاک)، حد مجاز هر آلاینده در سطح خاک به منظور جلوگیری از هرگونه آلودگی مد نظر قرار گرفته شده است، که بر این اساس مقادیر بالاتر از حد مجاز تعیین شده، می‌تواند سبب ایجاد اثرات سوء بر سلامت انسان و موجودات زنده شود و غلظت های پایین‌تر از حد مجاز، قابل قبول بوده و اثرات منفی بر محیط زیست ندارد. بررسی شاخص‌های آلودگی خاک (از جمله فاکتورهای غنی‌شدگی و زمین انباشت)، به عنوان الگوی پراکندگی عناصر آلاینده در خاک به‌وسیله فرایندهای خاکزاد و یا عوامل انسان‌زا نیز از اولویت‌های مهم مطالعات زیست‌محیطی خاک می‌باشد که واکاوی این شاخص‌ها در مناطق آلوده به عناصر آلاینده بسیار ضروری می‌باشد (Dung *et al.*, 2013). Bhuiyan *et al.* (2010)، اثرات فلزات سنگین ناشی از فعالیت معادن زغال سنگ بر آلودگی خاک های کشاورزی در بخش شمالی بنگلادش را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، ارزیابی آلودگی خاک با استفاده از فاکتور غنی‌سازی و شاخص بار آلودگی انجام گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، متوسط غلظت عناصر تیتانیوم، منگنز، روی، سرب، آرسنیک، آهن، روبیدیوم، استرانسیوم، نیوبیوم و زیرکونیم بیش از میانگین نرمال جهانی بود و در برخی موارد، منگنز، روی، آرسنیک و سرب بیش از حد استاندارد سمیت فلزات مربوطه گزارش داده شد. همچنین بر اساس شاخص بار آلودگی، قسمت انتهایی معدن، آلوده‌ترین منطقه معدن شناسایی شد. سد باطله معدن مس کومبات (Kombat) در کشور نامیبیا، که در محاصره اراضی کشاورزی قرار دارد، برای مدت زمان بسیار طولانی در معرض فرسایش آب و باد قرار دارد. با توجه به این شرایط Mileusnić *et al.* (2014) به بررسی خصوصیات باطله ها و خاکهای کشاورزی اطراف آن و عوامل آلاینده در آن ها پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده، در بین هفت عنصر مورد بررسی، مس و سرب غلظت قابل توجه بالایی را در نمونه‌های سد باطله، به ویژه در فصل خشک (به ترتیب حداکثر ۹۰۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۵۵۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نشان داد. به تبع این نتایج، خاک‌های قابل کشت مجاور نیز دارای غلظت بالای مس و سرب (به ترتیب حداکثر ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۱۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بودند. بررسی فاکتور غنی‌شدگی برای عناصر سرب و مس حاکی از آلودگی شدید بود، اما شاخص زمین انباشت نشان از آلودگی متوسط تا قوی این عناصر داشت. همچنین شاخص آلودگی ترکیبی، آلودگی بالایی را از این عناصر نشان داد. بر اساس نتایج این محققان، اگرچه خاکهای کشاورزی موردمطالعه، آلوده به سرب و مس بودند، اما این فلزات نسبتاً به اجزای خاک متصل بوده و ریسک متوسطی از نظر تحرک در خاک داشتند. Kargar *et al.* (2012) در بررسی مقادیر کمی عناصر آرسنیک، کادمیم، مولیبدن و مس در خاک‌های اطراف سد باطله میدوک نشان دادند که غنی‌سازی قابل‌توجهی از عناصر کادمیم و مس در اطراف سد باطله وجود دارد. همچنین در بررسی اثر جهت باد غالب بر مقادیر عناصر مذکور نشان داده شد که آلودگی خاک در بخش جنوب غربی سد باطله ناشی از اثرات سد باطله بوده و آلودگی در بخش شمال شرقی سد، ناشی از عملیات انفجاری در معدن می‌باشد.

معدن مس روباز چهارگنبد (با ذخیره ۳۰۱۷۴۱۹ تن عنصر مس؛ حاوی کانی‌های کالکوپیریت، پیریت و مقداری بورنیت، کوولیت، کالکوسیت و به مقدار خیلی کم گالن، تترائدرایت، اسفالریت؛ با عیار متوسط ۱/۱ ٪ مس) در ۸۰ کیلومتری شرق سیرجان و ۳۲ کیلومتری شمال بلورد قرار داشته و از طریق جاده سیرجان-بلورد-چهارگنبد قابل دسترس می‌باشد. بر اساس جایگاه حوضه آبریز محل احداث معدن و سد باطله موجود در آن، برآورد اولیه از محدوده تحت تاثیر فرایندهای آلاینده معدنکاری در این معدن، در حدود ۱۴/۳ کیلومتر مربع تخمین زده می‌شود. بر اساس مشاهدات میدانی و تصاویر ماهواره ای در بالا دست این معدن، سدهای باطله این معدن شامل دو سد اصلی بوده که در بخش جنوبی مرکز معدن، سد رسوب‌گیر با مساحت بالغ بر ۹۹۷۰۰ متر مربع (بر اساس تصاویر ماهواره ای) و در بخش شمالی مرکز معدن، سد آبگیر با مساحت بالغ بر ۳۲۵۰۰ متر مربع (که برای مهار زهاب سد جنوبی احداث گردیده است)، واقع شده اند. علی‌رغم فعالیت محدود و اندک معدن مس چهارگنبد در سال‌های اخیر و عمر پایین این معدن در فرآیند استخراج و فناوری، این فرضیه وجود داشت که سد باطله معدن مذکور، می‌تواند سبب آلودگی‌هایی در منابع خاک‌های مجاور این معدن گردد. لذا در این پژوهش، تلاش شد، با توجه به موقعیت سد باطله در منطقه معدنی مس چهارگنبد، آلودگی برخی عناصر آلاینده متأثر از سد باطله مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. همچنین ضمن مقایسه مقادیر عناصر با حدود مجاز استاندارد حفاظت محیط زیست ایران، برخی شاخص های آلودگی اعم از شاخص زمین

www.SID.ir

Archive of SID

انباشتگی، شاخص غنی‌شدگی و فاکتور آلودگی هر عنصر بررسی شد.

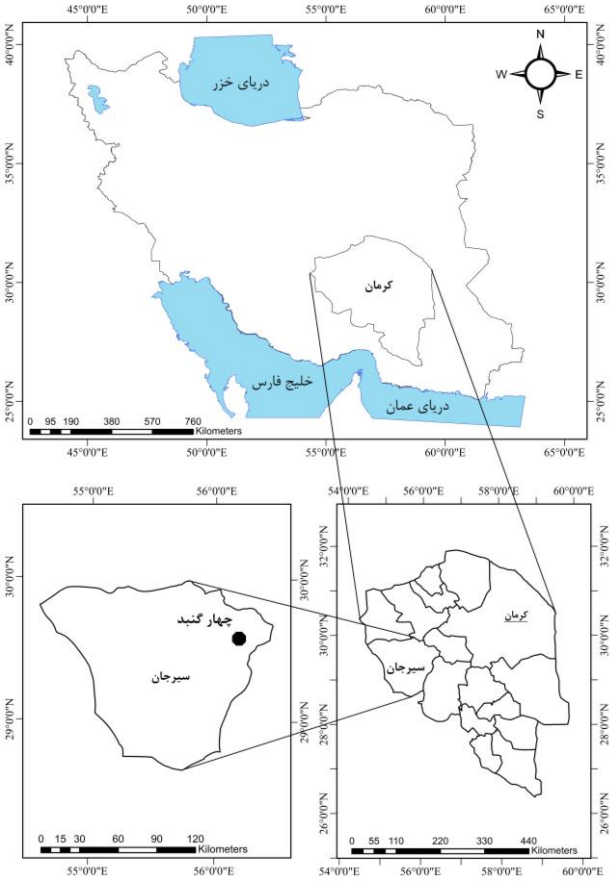
مواد و روش‌ها

محدوده موردمطالعه

کانسار مس رگه‌ای چهارگنبد به عنوان منطقه مورد مطالعاتی در پژوهش حاضر، در جنوب شرقی ایران و در شمال شرق سیرجان در استان کرمان و فاصله ۸۰ کیلومتری سیرجان، با مختصات جغرافیایی ۰۵ ´ ۵۶ °۵۶ و ۲۵ ´ ۵۶ °۵۶ طول شرقی، ۵۰ ´ ۲۹ °۲۹ و ۶۵ ´ ۲۹ °۲۹ عرض شمالی واقع شده است. این محدوده در منطقه کوهستانی چهار گنبد (جنوب شرقی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر) که بخشی از نوار کوهستانی دهج-ساردوئیه می‌باشد، را شامل می‌شود. شکل (۱)، موقعیت محدوده معدن مس چهار گنبد در شمال شرقی سیرجان و بخش غربی شهرستان کرمان را نشان می‌دهد.

از دیدگاه زمین ریخت شناسی این محدوده در ارتفاعات قرار داشته و کمینه ارتفاع آن از سطح دریا ۲۳۷۰ متر و بیشینه آن در محدوده تحت پوشش معدن ۲۷۰۱ متر می‌باشد (شکل ۲ الف و ب).

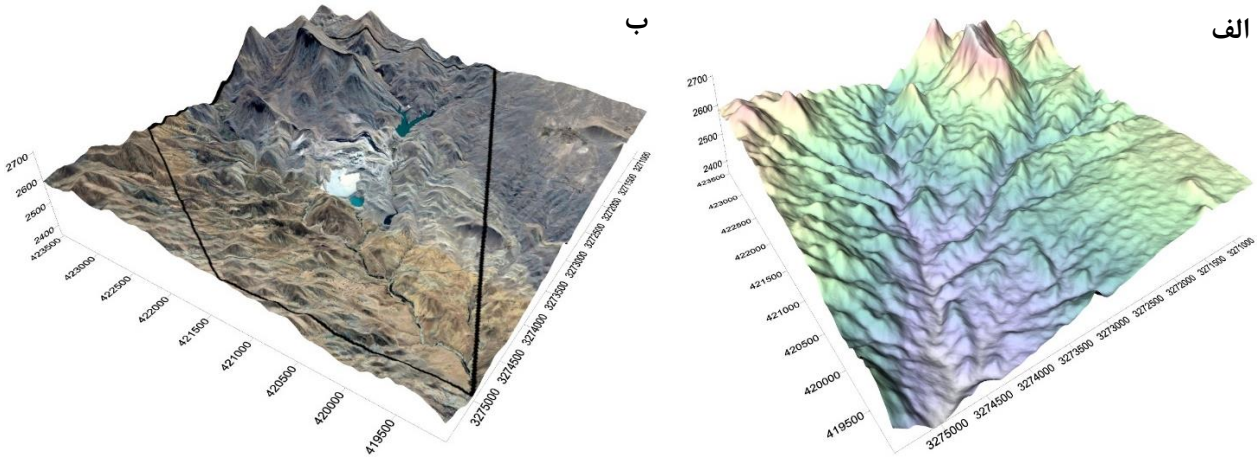
این محدوده دارای آب و هوای کوهستانی و سرد و معتدل بوده و متوسط تغییرات دمای هوا در زمستان در محدوده ۷- تا ۱۵ درجه سلسیوس و در تابستان در محدوده ۱۸ تا ۳۷ درجه سلسیوس متغیر می‌باشد. همچنین، این معدن از نظر تقسیمات اقلیمی در اقلیم نیمه خشک میانه واقع گردیده و متوسط میزان بارندگی در این محدوده بر اساس داده‌های موجود در آمارهای وزارت نیرو ۲۹۶ میلی‌متر، متوسط رطوبت سالیانه ۴۷ ٪ و تعداد روزهای یخبندان بطور متوسط ۵۳ روز در سال است. پوشش گیاهی محدوده در گروه مرتع متوسط تا جنگل تنک قرار گرفته و عمده محدوده شامل درختان بنه، بادام کوهی و ارژن به همراه بوته های قیچ، درمنه و گون می‌باشد. همچنین، با توجه به وضعیت گلباد پنج ساله (۲۰۱۵-۲۰۲۰) ایستگاه سیرجان (نماینده وضعیت باد منطقه در معدن مس چهار گنبد)، بیشترین بادها از سمت جنوب شرقی به سمت شمال غربی می‌وزد (شکل ۳).



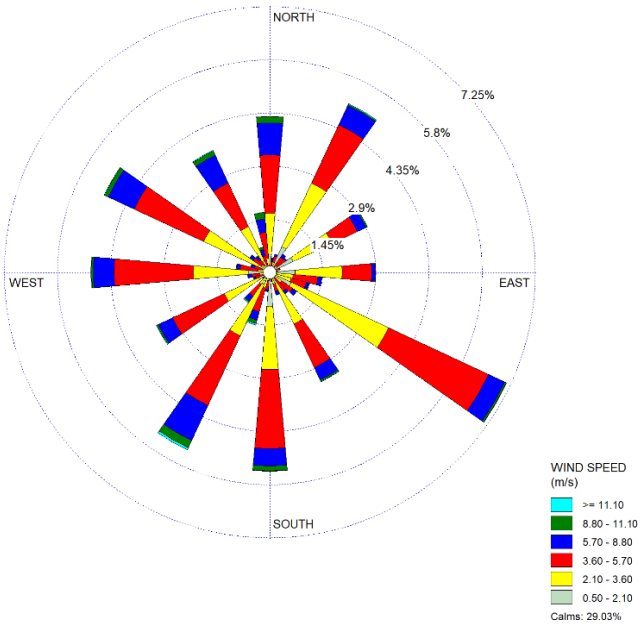
شکل ۱- محدوده معدن مس چهار گنبد

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۲- سیمای ژئومورفولوژیکی (الف) و سیمای سه بعدی (ب) از محل فعالیت معدنکاری و سدهای باطله محدوده معدن چهارگنبد



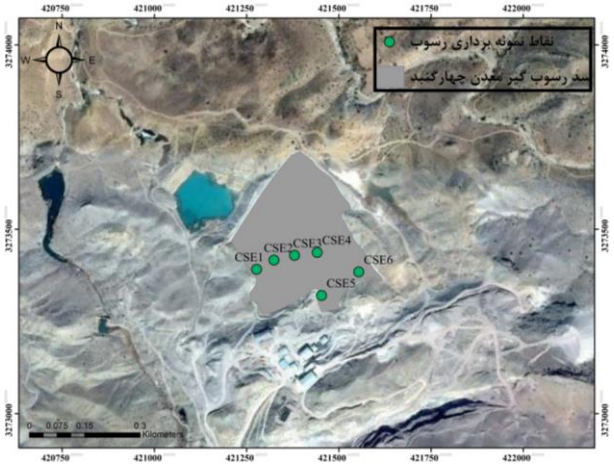
شکل ۳- گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک سیرجان در دوره آماری ۵ ساله (۲۰۱۵- ۲۰۲۰)

نمونه‌برداری رسوبات سد باطله و آنالیز شیمیایی عناصر آلاینده در آن‌ها

با توجه هدف اصلی (بررسی سطوح آلودگی خاک‌ها، متاثر از رسوبات سد باطله) پژوهش حاضر، بررسی مقادیر کمی عناصر آلاینده در رسوبات سد باطله، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بدین منظور، شش نمونه رسوب از عمق سطحی سد باطله، با توجه به انواع مختلف رسوبات موجود در سد باطله (رسوبات جدید و قدیم)، از مکان‌های مختلف سد برداشت شد و به آزمایشگاه زرآزما ماهان (واقع در شهر کرمان) ارسال گردید. شکل (۴)، نمای کلی از محیط سد باطله و موقعیت نقاط نمونه‌برداری رسوب در سد رسوب‌گیر را نشان می‌دهد. با پیشروی از سمت بخش ورودی رسوبات باطله (نزدیک به نمونه CSE5، جنوب و جنوب غرب سد باطله) به انتهای بخش سد رسوبگیر (شمال و شمال غرب سد باطله، نزدیک سد آبگیر)، منطقه به صورت باتلاقی با آب عمیق بوده، که محدودیت برداشت نمونه‌های رسوب را سبب شد. بدین ترتیب، تلاش شد در بخش عرضی سد باطله با فواصل مختلف که امکان نمونه‌برداری فراهم بود، نمونه‌های رسوب برداشت شود. به منظور بررسی مقدار کمّی عناصر بالقوه آلاینده در نمونه‌های رسوب از روش هضم چهار اسید (Multi Acid Digest) شامل اسید هیدروکلریدریک، اسید هیدروفلوریک، اسید پرکلریک اسید و اسید نیتریک) استفاده و مقادیر عناصر آنتیموان، آرسنیک، کادمیم، مس، سرب و روی توسط دستگاه ICP-MS اندازه گیری شدند. حد تشخیص دستگاه برای عناصر آرسنیک و کادمیم برابر ۰/۱، برای مس، سرب و روی برابر ۱، و برای آنتیموان برابر ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- نمای کلی از محیط سد باطله و موقعیت نقاط نمونه‌برداری رسوبات در سد رسوب‌گیر معدن مس چهارگنبد

نمونه‌برداری خاک اطراف سد باطله و آنالیز شیمیایی عناصر آلاینده در آن‌ها

به منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی سد باطله موردمطالعه بر مقادیر برخی عناصر آلاینده در خاک‌های اطراف سد باطله، در ابتدای امر، بازدیدهای میدانی از بخش های مختلف معدن از جمله پیت معدن، تیکنرها و محدوده سد رسوبگیر و سد آبگیر صورت گرفت. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و وجود رده های خاکی با تکامل پایین (انتی سول و اینسپتی سول)، تلاش گردید که در مناطق و جهات مختلف منطقه (با مرکزیت سد باطله) نمونه‌برداری خاک انجام گیرد که نمایندگان مناسبی برای وضعیت خاک منطقه موردمطالعه، متأثر از سد باطله باشند. در بیشتر نقاط منطقه، جدا از کوهستانی بودن و عدم وجود خاکرخ در منطقه، خاک موجود در منطقه به منظور راهسازی و یا سایر عملیات های معدنی دست خورده بوده و سبب شد که نمونه‌های برداشت شده در این منطقه از فراونی زیادی برخوردار نباشند (۹ نمونه). نمونه‌برداری خاک با توجه به هدف مطالعه، به صورت غیر سیستماتیک و در جهات مختلف (پایین دست و بالادست سد باطله و همچنین در جهت موافق و مخالف باد غالب منطقه) انجام گرفت. بدین منظور در هر نقطه مد نظر، یک پلات ۵ در ۵ متر در نظر گرفته شده و از مرکز هر خط اصلی پلات (۴ نمونه) و درون پلات (۴ نمونه) از عمق سطحی خاک (۰-۳۰ سانتی‌متر) برداشت شده و پس از مخلوط کردن آن ها، یک نمونه مرکب به وزن ۱ کیلوگرم برداشت و به آزمایشگاه زرآزما ماهان (واقع در شهر کرمان) ارسال گردید. مقادیر کمی عناصر آلاینده، به مانند روش ذکر شده در خصوص رسوبات سد باطله (روش هضم چهار اسید)، با استفاده از دستگاه ICP-MS اندازه گیری شد. از آنجا که حد استاندارد آلایندگی خاک‌ها برای آلاینده های مختلف در خاک‌های قلیایی و اسیدی متفاوت می‌باشد، لذا مقادیر pH هر نمونه خاک در نمونه گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر قرائت گردید که در همه نمونه‌های خاک موردمطالعه، pH بیشتر از ۷ مشاهده شد. شکل (۵)، موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک، موقعیت سد رسوب‌گیر و آبگیر را نشان داده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نقاط C5، C6 و C7 در فاصله دور از منطقه معدنکاری محدوده مورد مطالعاتی می‌باشند که به عنوان نمونه های شاهد در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند.

شاخص‌های آلودگی

فاکتور غنی‌شدگی[۱]

تشخیص منشاء طبیعی فلزات سنگین که از هوازدگی سنگها حاصل می‌شوند و تفکیک آن از عناصری که منشاء انسان زاد دارند بخشی ضروری در مطالعات ژئوشیمی زیست‌محیطی خاک و رسوب است. فاکتور غنی‌شدگی که جهت ارزیابی آلودگی خاک و رسوبات استفاده می‌شود، بیانگر شدت تأثیر عامل خارجی (انسان زاد) نیز می‌باشد. رابطه ۱، فاکتور غنی‌شدگی را نشان می‌دهد.

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

در این فرمول Sample (C/R)، نسبت غلظت عنصر موردمطالعه در خاک یا رسوب منطقه به غلظت عنصر زمینه (که در این مطالعه آهن مورد استفاده قرار گرفت) در خاک یا رسوب منطقه و Background (C/R)، نسبت غلظت عنصر موردمطالعه

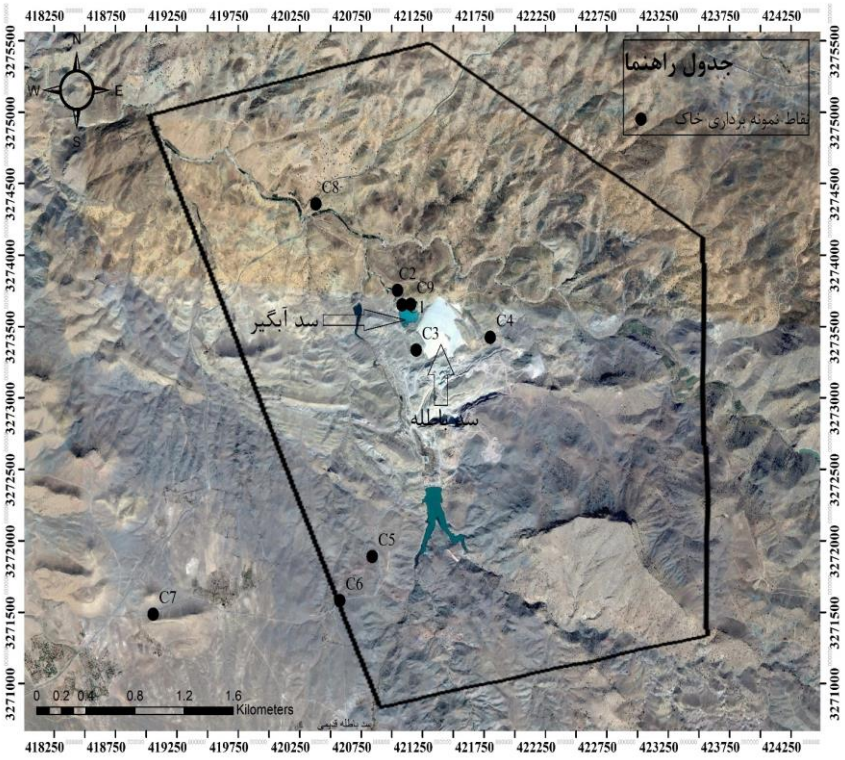
[۱] EF: Enrichment Factor

www.SID.ir

Archive of SID

در پوسته سطحی زمین به غلظت عنصر زمینه (که در این مطالعه آهن مورد استفاده قرار گرفت) در پوسته سطحی زمین می‌باشند. مقادیر عناصر در پوسته زمین از اطلاعات چاپ شده Taylor McLennan and (1982) استفاده گردید. پژوهشگران مختلفی عناصر مرجع متفاوتی مانند آهن، آلومینیوم، اسکاندیوم، زیرکونیوم و تیتانیوم را برای تعیین میزان غنی‌شدگی مورد استفاده قرار داده‌اند. در منطقه موردمطالعه، عنصر آهن به دلیل ماهیت ژئوشیمیایی، تغییرات بسیار ناچیز و تحرک کمی که در محیط ژئوشیمیایی از خود نشان می‌دهد به عنوان فلز مرجع استفاده شد.

براساس شاخص غنی‌شدگی، خاک‌ها و رسوبات از نظر آلودگی به ۵ رده (جدول ۱) تقسیم می‌شوند.



شکل ۵- موقعیت مکانی نمونه‌های خاک موردمطالعه، سد رسوب‌گیر و سد آبگیر در منطقه معدنی چهارگنبد

جدول ۱- طبقه‌بندی ضریب غنی‌شدگی (نشان دهنده احتمال ایجاد آلودگی)

فاکتور غنی‌شدگی	دسته‌بندی آلاینده
EF<2	حداقل غنی‌شدگی
2<EF<5	غنی‌شدگی کم
5<EF<20	غنی‌شدگی قابل توجه
20<EF<40	غنی‌شدگی زیاد
EF>40	غنی‌شدگی بسیار زیاد

شاخص زمین انباشت[۱]

یکی‌دیگر از روش‌های ارزیابی آلودگی‌خاک یا رسوب، استفاده از شاخص زمین‌انباشت است. شاخص زمین‌انباشت (Igeo) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\text{Igeo} = Log_2(\frac{Cn}{1.5Bn}) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در این رابطه، C_n غلظت کل هر فلز در خاک یا رسوب و Bn غلظت زمینه برای هر فلز است. ضریب ۱/۵ به منظور کاهش تغییرات احتمالی در مقدار زمینه ناشی از ناپایداری های لیتولوژیک رسوبات خاک اعمال می‌شود. بر اساس شاخص زمین انباشت سطح آلودگی به ۷ دسته طبقه‌بندی می‌شود (جدول۲) .

جدول ۲- طبقه‌بندی زمین انباشت (نشان‌دهنده احتمال ایجاد آلودگی)

شاخص زمین انباشت	کلاس	وضعیت آلودگی
۰≥Igeo	۰	غیرآلوده
۰>Igeo>۱	۱	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
۱>Igeo>۲	۲	آلودگی متوسط
۲>Igeo>۳	۳	آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد
۳>Igeo>۴	۴	آلودگی زیاد
۴>Igeo>۵	۵	آلودگی زیاد تا آلودگی شدید
Igeo>۵	۶	آلودگی شدید

فاکتور آلودگی[۲]

فاکتور آلودگی از محاسبه میانگین غلظت فلز مورد نظر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در منطقه مطالعاتی بر میانگین فلز مورد نظر در ماده مرجع (پوسته سطحی زمین) محاسبه شد.

[۱] Igeo: Geoaccumulation index

[۲] CF: Contamination factor

www.SID.ir

Archive of SID

محاسبات آماری

به منظور بررسی پارامترهای معمول آماری هر عنصر، از برنامه آماری Minitab19 و به منظور محاسبه شاخص‌های آلودگی و رسم نمودارها از نرم افزار Excel2016 استفاده شد.

نتایج و بحث

وضعیت کمی و شاخص‌های آلودگی برخی آلاینده‌ها در رسوبات سد باطله معدن مس چهارگنبد

جدول (۳)، توصیف آماری از مقادیر کمی عناصر موردمطالعه در نمونه‌های رسوب برداشت شده از بخش‌های مختلف سد باطله معدن مس چهارگنبد را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آماری، مقادیر متوسط آرسنیک، کادمیم، مس، سرب، آنتیموان و روی در نمونه‌های رسوب (میانگین شش نمونه) موردمطالعه به ترتیب ۵/۳۵، ۰/۲۷، ۷۵۲/۱، ۱۵/۳۳، ۱/۳۳ و ۶۵/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد، که بر این اساس مقادیر کمی عناصر در رسوبات سد باطله به ترتیب مس> روی> سرب> آرسنیک> آنتیموان> کادمیم مشاهده شد.

به منظور بررسی بهتر از اثرات زیست‌محیطی عناصر آلاینده در رسوبات سد باطله بر محیط اطراف، دانستن زمینه طبیعی هر عنصر برای رسوبات منطقه و میزان افزودگی و کاهیدگی در رسوبات سد باطله برای هر عنصر ضروری می‌باشد. در مطالعات بررسی تغییرات ژئوشیمیایی رسوبات هر منطقه، استفاده از داده‌های زمینه‌ای مطالعات گذشت مرسوم و رایج می‌باشد. لذا به منظور مقایسه وضعیت مقادیر عناصر در رسوبات سد باطله با رسوبات (غیر آلوده) خارج از منطقه سد باطله، از مقادیر عناصر در زمینه طبیعی رسوبات منطقه چهارگنبد؛ گزارش شده توسط Yousefi *et al*. (2012) استفاده شد (جدول ۴).

جدول ۳- توصیف آماری مقادیر عناصر سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نمونه‌های رسوب سد باطله منطقه معدن مس چهارگنبد

عنصر	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
As	۵/۳۵۰	۲	۱۲/۷۰	۴/۲۵۲	۱۲۵/۸۱۱	۱/۲۸۷	۰/۷۱۸
Cd	۰/۲۷۲	۰/۲۳	۰/۳۲	۰/۰۳۳	۸۳۵/۷۳۳	۰/۰۹۲	-۰/۲۹۹
Cu	۷۵۲/۱۶۷	۲۰۱	۱۱۱۰	۳۶۹/۲۷۲	۲۰۳/۶۸۹	-۰/۶۸۸	-۱/۲۳۱
Pb	۱۵/۳۳۳	۱۱	۱۹	۳/۴۴۵	۴۴۵/۱۱۵	-۰/۲۴۶	-۲/۴۶۷
Sb	۱/۳۲۲	۱/۲۳	۱/۴۳	۰/۰۸۲	۱۶۱۵/۰۷۵	۰/۲۳۴	-۱/۷۱۲
Zn	۶۵/۸۳۳	۵۶	۸۴	۱۰/۰۲۸	۶۵۶/۴۷۶	۱/۳۷۶	۲/۱۲۶

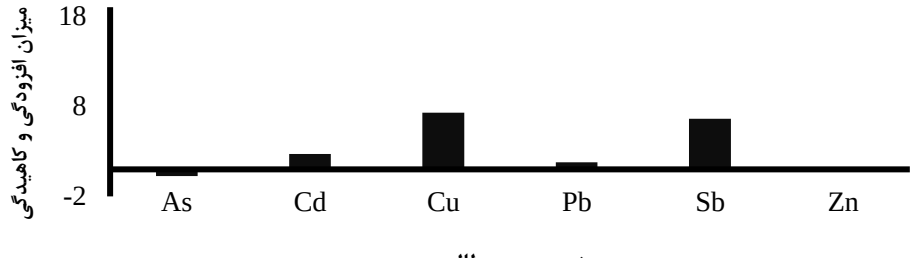
جدول ۴- مقایسه مقادیر آلاینده‌ها (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نمونه‌های رسوب سد باطله منطقه معدن مس چهارگنبد و مقادیر عناصر در زمینه طبیعی رسوبات منطقه (Yousefi Sharik Abad *et al*. (2012))

عنصر	میانگین عناصر در رسوبات سد باطله مطالعه حاضر	مقادیر عناصر در زمینه طبیعی رسوبات منطقه*
As	۵/۳۵۰	۲۱/۶
Cd	۰/۲۷۲	۰/۱
Cu	۷۵۲/۱۶۷	۱۰۳/۳
Pb	۱۵/۳۳۳	۸/۶
Sb	۱/۳۲۲	۰/۲
Zn	۶۵/۸۳۳	۶۷/۲

شکل (۶)، مقادیر افزودگی و کاهیدگی عناصر رسوبات سد باطله نسبت به زمینه طبیعی رسوبات منطقه را نشان می‌دهد. بر این اساس، عناصر آنتیموان، سرب، مس و کادمیم در نمونه‌های رسوبات سد باطله معدن چهار گنبد نسبت به زمینه طبیعی رسوبات منطقه، دارای افزودگی می‌باشند، که این امر ناشی از غنی شدگی آنها در سنگ‌های کانه‌زا نسبت به دیگر عناصر می‌باشد (Esmaeili and Moore, 2013). در طرف مقابل، شبه عنصر آرسنیک در نمونه‌های رسوبات سد باطله نسبت به زمینه طبیعی رسوبات منطقه، روند کاهیدگی را نشان دادند. بر اساس نتایج، همانطور که مشاهده می‌شود، مس با افزودگی ۷/۲ برابری نسبت به زمینه طبیعی بیشترین افزودگی را نشان داده است. کاهش مقادیر آرسنیک در رسوب سد باطله می‌تواند نشان از بالاتر بودن مقادیر این عناصر در سنگ‌های طبیعی منطقه در مقایسه با زونهای کانه‌زا باشد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶- نمودار افزودگی و کاهیدگی عناصر رسوبات سد باطله نسبت به زمینه طبیعی رسوبات منطقه

جدول (۵)، مقادیر فاکتور غنی‌شدگی و زمین انباشت هر نمونه رسوب برای عناصر موردمطالعه را نشان داده است. با توجه به نتایج بدست آمده، عناصر روی، سرب و کادمیم و در برخی نمونه‌ها، آرسنیک، حداقل غنی‌شدگی (بدون آلودگی) را دارا بودند. در طرف مقابل عنصر آنتیموان دارای شدت غنی‌شدگی متوسط و مس دارای شدت غنی‌شدگی متوسط تا شدید بود. تفاوت در مقادیر فاکتور غنی شدگی می‌تواند ناشی از اختلاف در میزان ورودی هر فلز در رسوبات و یا اختلاف در میزان انتقال فلز در رسوبات باشد (Yousefi *et al*. 2012). محیط ژئومورفولوژی منطقه نیز بر شرایط و مسائل زیست محیطی منطقه مؤثر می‌باشد. محیط ژئومورفولوژی منطقه، آب باران را به صورت جریانهای سطحی و زیرزمینی به سمت معدن و سد باطله و داخل سرباره‌های معدنی هدایت می‌کند، لذا امکان آلوده شدن رسوبات سد باطله و محیط اطراف را فراهم می‌کند. بر اساس نتایج مقادیر زمین انباشت عناصر موجود در رسوبات سد باطله (جدول ۵)، مقادیر شاخص زمین انباشتگی عناصر روی و سرب دارای وضعیت غیرآلوده بودند. در طرف مقابل به استثنا مس با شاخص زمین انباشت با آلودگی شدید، عناصر کادمیم، آنتیموان و و آرسنیک دارای آلودگی متوسط تا زیادی بودند. خرد کردن سنگ برای جداسازی کانسار، سطح تماس سنگ با آب را افزایش داده و امکان هوازدگی شیمیایی را بالا برده است، که شکل مهم آن اکسید شدن سولفیدها و تولید اسید سولفوریک در سنگ است. از آنجایی که در اثر نفوذ آبهای زیرزمینی به سطح و همچنین فرسایش سطحی زمین و به دنبال آن فرسایش شیمیایی باعث به جریان در آمدن فلزات می‌شود، لذا با توجه به عمل اکسیداسیون پیریت و در نتیجه به وجود آمدن شرایط اسیدی Eh-pH جدیدی حاکم خواهد بود که متعاقباً سبب غنی شدگی و پایداری غلظت فلزات آلاینده خواهد شد (Yousefi *et al*. 2012) که می‌تواند یکی از مهمترین دلایل زمین انباشت عناصر مس، کادمیم، آنتیموان و آرسنیک باشد.

جدول ۵- مقادیر فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین انباشتگی فلزات موردمطالعه در رسوبات منطقه معدنی چهارگنبد

شماره نمونه	فاکتور غنی‌شدگی						شاخص زمین انباشت					
	As	Cu	Cd	Pb	Sb	Zn	As	Cu	Cd	Pb	Sb	Zn
CSE۱	۲/۶۰	۲۱/۳۷	۱/۳۸	۰/۴۳	۲/۹۶	۰/۵۷	۱/۸۵	۴/۸۹	۰/۹۳	-۰/۷۴	۲/۰۴	-۰/۳۴
CSE۲	۴/۳۷	۱۵/۷۶	۱/۴۷	۰/۳۶	۳/۳۵	۰/۴۹	۲/۵۰	۴/۳۵	۰/۹۳	-۱/۱۰	۲/۱۲	-۰/۶۵
CSE۳	۱/۰۰	۶/۰۶	۰/۸۸	۰/۲۰	۲/۵۶	۰/۳۰	۰/۹۰	۳/۵۰	۰/۷۱	-۱/۴۵	۲/۲۵	-۰/۸۵
CSE۴	۰/۹۵	۱۹/۸۲	۱/۵۰	۰/۴۴	۲/۸۴	۰/۴۳	۰/۴۶	۴/۸۵	۱/۱۲	-۰/۶۶	۲/۰۵	-۰/۶۷
CSE۵	۰/۶۳	۱۷/۷۳	۱/۱۱	۰/۴۳	۳/۳۳	۰/۳۷	-۰/۱۷	۴/۶۴	۰/۶۵	-۰/۷۴	۲/۲۲	-۰/۹۳
CSE۶	۰/۵۶	۳/۴۰	۱/۲۱	۰/۲۵	۲/۸۱	۰/۳۶	-۰/۱۷	۲/۴۲	۰/۹۳	-۱/۳۲	۲/۱۵	-۰/۸۰
متوسط	۱/۵۹	۱۳/۴۱	۱/۲۴	۰/۳۴	۲/۹۴	۰/۴۱	۱/۲۵	۴/۳۳	۰/۸۹	-۰/۹۷	۲/۱۴	-۰/۶۹

با توجه به نتایج تغییرات آلایندهای رسوبات منطقه، عناصر آنتیموان (به میزان کم) و مس (به میزان زیاد)، قابلیت آلودگی محیط زیست منطقه را دارا می‌باشند، که نیازمند بررسی‌های زمانی در سال‌های آتی و انجام آزمون‌های قابلیت تحرک (سمیت قابل نشت (TCLP) و عصاره گیری متوالی) در نمونه‌های رسوب، می‌باشند.

وضعیت کمی و شاخص‌های آلودگی برخی آلاینده‌های خاک‌های اطراف سد باطله معدن مس چهارگنبد

جدول (۶)، موقعیت جغرافیایی نمونه‌های خاک موردمطالعه در محیط اطراف سد باطله معدن چهار گنبد را نشان می‌دهد. در این جدول، علاوه بر موقعیت جغرافیایی، موقعیت هر نمونه نسبت به سد باطله و همچنین فاصله نسبی هر نمونه با سد باطله (نزدیک

www.SID.ir

Archive of SID

ترین نقطه به مرز سد باطله) آورده شده است.

جدول ۶- موقعیت و مشخصات نقاط نمونه‌برداری خاک در معدن مس چهارگنبد

شماره نمونه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	موقعیت نسبت به سد باطله	فاصله نسبی تا سد باطله (متر)
C۱	۴۲۱۰۸۵	۳۲۷۳۶۵۱	پایین دست سد باطله (شمال غرب سد)	۲۰۵
C۲	۴۲۱۰۴۷	۳۲۷۳۷۵۳	پایین دست سد باطله (شمال غرب سد)	۲۹۵
C۳	۴۲۱۱۹۹	۳۲۷۳۳۳۵	جنوب غرب سد باطله	۸۵
C۴	۴۲۱۸۰۳	۳۲۷۳۴۲۴	بالادست سد باطله (شرق سد باطله)	۲۴۵
C۵	۴۲۰۸۴۱	۳۲۷۱۸۹۰	بیرون از منطقه مطالعاتی (نمونه شاهد- جنوب غربی سد باطله)	۱۵۰۰
C۶	۴۲۰۵۷۷	۳۲۷۱۵۸۲	بیرون از منطقه مطالعاتی (نمونه شاهد- جنوب غربی سد باطله)	۱۸۲۰
C۷	۴۱۹۰۵۸	۳۲۷۱۴۸۶	بیرون از منطقه مطالعاتی (نمونه شاهد- جنوب غربی سد باطله)	۲۸۵۰
C۸	۴۲۰۳۸۳	۳۲۷۴۳۵۸	پایین دست سد باطله (شمال غربی سد باطله)	۱۱۶۰
C۹	۴۲۱۱۵۵	۳۲۷۳۶۵۵	پایین دست سد باطله (شمال غربی سد باطله)	۱۴۳

جدول (۷)، خلاصه آماری از مقادیر کمی عناصر موردمطالعه در نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده در فواصل مختلف از سد باطله را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین متوسط آرسنیک، کادمیم، مس، سرب، آنتیموان و روی در نمونه‌های موردمطالعه به ترتیب ۱۲/۸، ۰/۲۸، ۷۶/۸، ۹/۵۴، ۱/۰۲ و ۶۲/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد، که بر این اساس مقادیر کمی عناصر در خاک‌های منطقه به ترتیب مس> روی> آرسنیک> سرب> آنتیموان> کادمیم مشاهده شد. مقایسه ترتیب مقادیر کمی عناصر آلاینده در نمونه خاک‌ها با رسوبات سد باطله (مس> روی> سرب> آرسنیک> آنتیموان> کادمیم)، نشان از مقادیر بیشتر آرسنیک در زون‌های کانه زا منطقه در مقایسه با سنگ‌های طبیعی منطقه دارد. Kargar *et al*. (2012) در بررسی مقادیر کمی عناصر آلاینده در خاک‌های اطراف سد باطله معدن مس میدوک، ترتیب؛ مس> آرسنیک> مولیبدن> کبالت را مشاهده کردند. Olobatoke and Mathuthu (2016) در مطالعه خود ترتیب کمی عناصر کروم> روی> آرسنیک> منگنز> مس> سرب> نیکل> استرانسیوم> جیوه را در خاک های حوضه سد باطله یک معدن طلای قدیمی در ژوهانسبورگ آفریقای جنوبی، مشاهده کردند. بر اساس نتایج پژوهش حاضر و تحقیقات پیشین، تغییرات کمی عناصر سنگین با توجه به نوع معدن و زون کانسارساز در هر منطقه متفاوت می‌باشد. بر طبق نتایج، بیشترین و کمترین ضریب تغییرات مقادیر کمی عناصر موردمطالعه به ترتیب در عناصر سرب و آنتیموان مشاهده شد. ضریب تغییرات کم (کمتر از ۱۵٪)، متوسط (۱۵٪ تا ۵۰٪) و زیاد (بیشتر از ۵۰٪)، به ترتیب نشان دهنده پراکنش همگن، نیمه همگن و ناهمگن جامعه آماری هدف (عناصر موردمطالعه) می‌باشد (Warrick, 1998). به عبارت دیگر، مقادیر بالای ضریب تغییرات نشان دهنده این است که غلظت این عناصر به میزان قابل‌توجهی در مکان‌های مختلف نمونه‌برداری متفاوت است و تغییر جهت و فاصله از منبع آلوده کننده سد باطله می‌تواند بر افزایش یا کاهش غلظت آلاینده‌ها موثر باشد. همچنین بر اساس مطالعات انجام گرفته، مقادیر عناصر با ضریب تغییرات بالا می‌تواند نشان دهنده اثرات انسان‌زا بر افزایش مقادیر کمی آن عنصر باشد (Zhang et al., 2007). میانگین غلظت جهانی برای خاک‌های غیرآلوده (Ure and Berrow, 1982) نشان می‌دهد (جدول ۷)، در نمونه‌های خاک موردمطالعه، به استثنا کادمیم، سرب و آنتیموان، سایر عناصر آرسنیک، مس و روی دارای میانگین بالاتر (هرچند بسیار کم) از غلظت متوسط جهانی می‌باشند.

Rastmanesh *et al*. (2010) در بررسی اثرات آلودگی ناشی از کارخانه ذوب مس سرچشمه بر میزان غلظت عناصر آلاینده (روی، کادمیم، مولیبدن، سرب، آرسنیک و مس) در خاک‌های منطقه، غلظت این عناصر را در منطقه بیشتر از میانگین استاندارد جهانی و نمونه‌های شاهد (نمونه‌های خارج از محدوده آلودگی) گزارش نمودند.

شکل (۷) روند تغییرات مقادیر کمی عناصر موردمطالعه در نمونه‌های خارج از محدوده (شاهد) و نمونه‌های نزدیک به بستر سد باطله را نشان می‌دهد. در هر شکل، حد مجاز استاندارد حفاظت محیط زیست (خط مشکی افقی در هر نمودار) آورده شده است که بخوبی نشان می‌دهد در بین عناصر موردمطالعه، عنصر مس بیشترین انحراف از حد استاندارد را در نمونه‌های نزدیک به بستر سد باطله را دارد. مقادیر آرسنیک بالاتر از حد استاندارد در نمونه‌های شاهد، هرچند که خارج از محدوده می‌باشد، اما نیازمند بررسی مقدار کمی این عنصر در نمونه‌های سنگ مادر و همچنین بررسی شاخص‌های آلودگی دارد. مقادیر بیشتر آرسنیک در خاک شاهد می‌تواند ناشی از عدم انحلال

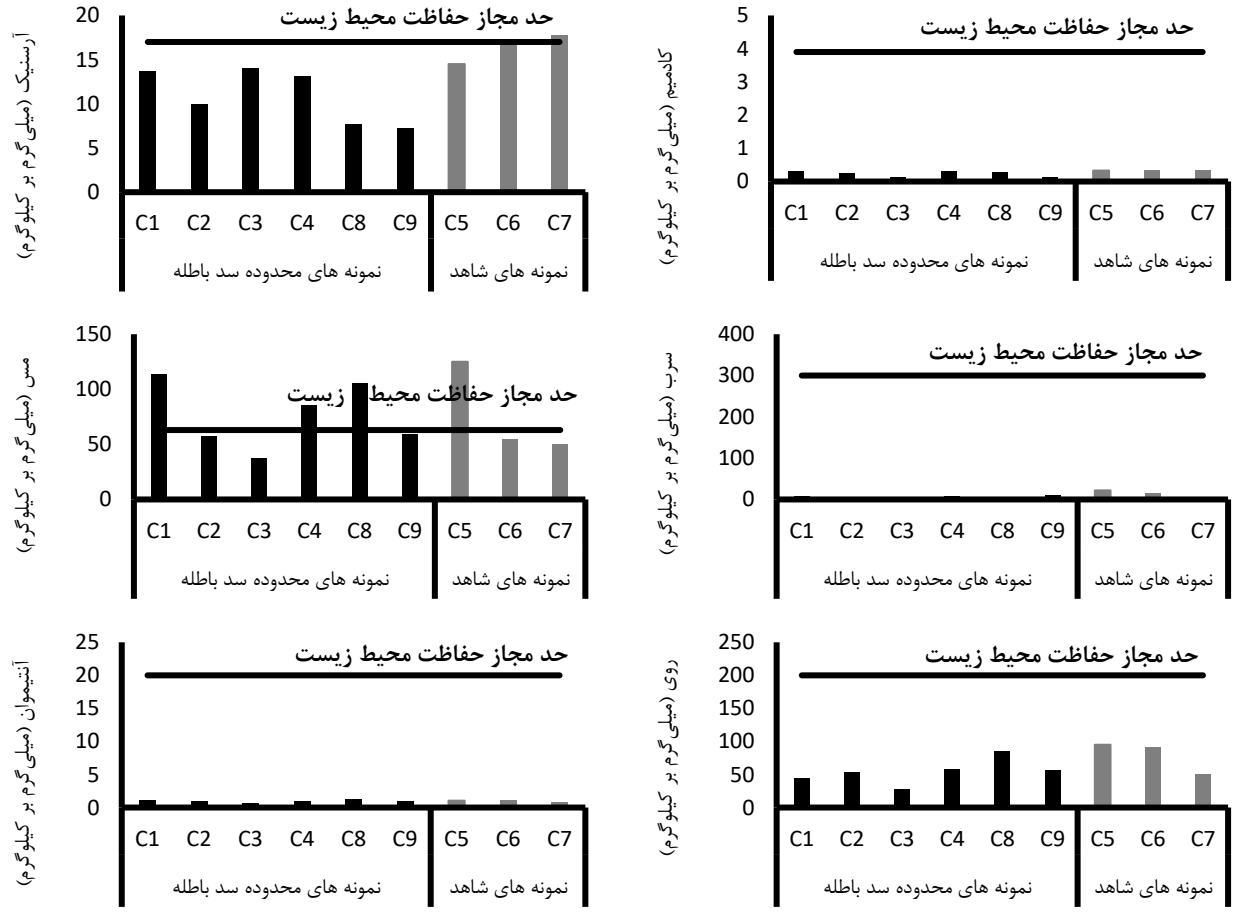
www.SID.ir

Archive of SID

آرسنیک در محیط غیر اسیدی دگرسانی فیلیک و منشا ناشی از سنگ‌های اتشفشانی (توف‌های بلوری ریولیتی- ریوداسیتی با رنگ روشن، توف و برش‌های تراکیتی و آندزیتی با میان لایه‌هایی از گدازه‌های آندزیتی) محدوده اطراف معدن در مقایسه با دگرسانی گوسان (محیط اطراف سد باطله) باشد که سبب تمرکز بیشتر آرسنیک در خاک شده است. بررسی مقادیر کمی سایر عناصر کادمیم، سرب، روی و آنتیموان نشان از پایین بودن مقادیر آن‌ها نسبت به استاندارد حفاظت محیط زیست دارد.

جدول ۷- توصیف آماری مقادیر کمی برخی عناصر سنگین در نمونه‌های خاک سطحی منطقه معدنی چهارگنبد

عنصر موردمطالعه	میانگین جهانی	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	حداقل	حداکثر	چولگی	کشیدگی
As	۱۱/۳	۱۲/۸۰	۳/۷۹	۲۹/۵۹	۷/۲۰	۱۷/۸۰	-۰/۳۳	-۱/۰۲
Cd	۰/۶۲	۰/۲۸	۰/۰۸	۲۹/۷۳	۰/۱۳	۰/۳۶	-۱/۲۲	۰/۱۳
Cu	۶۰-۲۵	۷۶/۸۰	۳۱/۶۰	۴۱/۱۹	۳۸/۰۰	۱۲۵/۰۰	۰/۴۵	-۱/۵۶
Pb	۲۹/۲	۹/۵۴	۵/۶۶	۵۹/۲۹	۴/۸۰	۲۲/۰۰	۱/۶۰	۲/۲۷
Sb	۱/۹	۱/۰۲	۰/۱۶	۱۵/۹۹	۰/۷۲	۱/۳۰	-۰/۲۸	۱/۱۹
Zn	۵۹/۸	۶۲/۶۷	۲۲/۹۶	۳۶/۶۴	۲۸/۰۰	۹۵/۰۰	۰/۲۴	-۱/۰۸



شکل ۷- مقادیر کمی هر عنصر در نمونه‌های خاک موردمطالعه و حد مجاز آن‌ها در خاک‌های قلیایی

رسم نمودار مقادیر هر عنصر در فواصل مختلف از سد باطله و همچنین مقادیر کمی از هر عنصر در جهت و خلاف باد غالب منطقه می‌تواند در شناخت هر چه بهتر این جز محیطی و اثرات سد باطله بر آن، مؤثر باشد. بر اساس نتایج مطالعات گذشته، در صورتی که منبع آلوده کننده دارای آلودگی معنی داری بر محیط اطراف باشد، در فواصل نزدیک آلودگی زیاد و با فاصله گرفتن از منبع آلاینده، آلودگی کاهش می‌یابد (Azeez et al., 2014 و Kabir *et al*, 2012). بر اساس نتایج مقادیر کمی عناصر موردمطالعه نسبت به فواصل مختلف از سد باطله (شکل ۸)، مقادیر پایین‌تر همه عناصر، به استثنا آرسنیک، در نزدیکترین فاصله به سد باطله نسبت به فواصل دورتر از سد باطله نشان از عدم اثرات مستقیم سدباطله بر محیط خاک اطراف داشته است.

www.SID.ir

Archive of SID

مقادیر بیشتر عناصر در فواصل دور می‌تواند ناشی از نشر آن‌ها از کارخانه فراوری و ذوب (خارج شده از دودکش‌ها) باشد که خارج از حیطه اهداف این مطالعه می‌باشد. Olobatoke and Mathuthu (2016) در بررسی مقادیر کمی ۹ عنصر سنگین در خاک‌های اطراف سد باطله معدن طلا نشان دادند که مقادیر کمی عناصر آرسنیک، جیوه، کروم و منگنز با افزایش فاصله از سد باطله، کاهش نشان داده اند، که نشان از اثربخشی سد باطله بر آلودگی خاک‌های موردمطالعه مجاور داشت. Jung (2001) و El Khalil *et al*. (2008) نیز در نتایج مشابهی نشان دادند که مقادیر کمی عناصر سنگین با فاصله از سد، کاهش داشته اند. در طرف مقابل، Weissenstein and Sinkala (2011) گزارش کردند که با افزایش فاصله از سد باطله، مقادیر کمی عناصر سنگین، دارای روند افزایشی بودند که این افزایش را به جایجایی آلاینده‌ها توسط عوامل فرساینده آب و باد نسبت دادند. بررسی تغییرات مقادیر عناصر نسبت به جهت باد غالب منطقه (شکل ۹)، نشان از عدم اثرات باد موافق در منطقه بر میزان کمی همه عناصر موردمطالعه، به استثنا مس دارد، به نحوی که در جهت باد موافق منطقه، میانگین این عناصر به طور متوسط کمتر از خلاف باد موافق در منطقه می‌باشد. وجود مقادیر پایین تر از عناصر در نزدیک سد باطله در پژوهش حاضر، شاید این فرضیه را به وجود آورد که عوامل فرساینده آب و باد سبب ایجاد مقادیر بیشتر این عناصر در فواصل دورتر شده است که عدم وجود باد فرساینده به دلیل وجود منطقه محصور کوهستانی در این منطقه و عدم وجود نشانه‌های فرسایش آبی در منطقه نشان از رد شدن فرضیه موجود در منطقه را دارد.

در بررسی خاک‌های اطراف سد باطله یک معدن مس در شیلی، مقادیر فلزات سنگین آرسنیک، روی، مس، سرب و منگنز اندازه گیری شد، که بر این اساس در برخی از نمونه‌های خاک، غنی‌شدگی مس در جهت باد غالب و در مجاورت سد باطله مشاهده گردید (Kelm *et al*., 2009). Kříbek *et al*. (2014) در بررسی آلودگی خاک متاثر از گرد و غبار ناشی از سد باطله روی در منطقه "روش پیناه" (Rosh Pinah) کشور نامیبیا نشان دادند که در راستای جهت باد غالب، آلودگی خاک به برخی عناصر سنگین، به ویژه سرب در قسمت‌های شرقی و شمال شرقی منطقه موردمطالعه، مشهود بوده است.

Jiménez-Ballesta and García-Giménez (2017) در بررسی اثر آلودگی کنندگی سد باطله یک معدن نقره-آرسنیک بر خاک منطقه‌ای در اسپانیا، ۱۷ نمونه خاک سطحی از دو بخش باطله‌های معدنی سولفیدی و بخش غیر معدنی در درون فاصله شعاعی ۱۹۰۰ متر از ورودی معدن را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بر اساس نتایج، وجود کانی‌های با پایه آرسنوپیریت، ماتیلدیت و اسفالریت سبب تولید باطله هایی با پ‌هاش پایین در حدود ۲/۹ شده بودند. بررسی مقادیر کمی عناصری از جمله آرسنیک، مس، روی، کادمیم، سرب، تنگستن، نقره و آهن نشان از غلظت‌های بسیار بالای این عناصر در خاک (بین ۱۰ تا ۲۰ برابر بیشتر نسبت به خاک‌های غیرمعدنی) داشت. این محققین بیان داشتند، اصلاح استراتژی‌های مدیریت سدهای باطله در این منطقه، یکی از ضروریات بهبود این معدن می‌باشد.

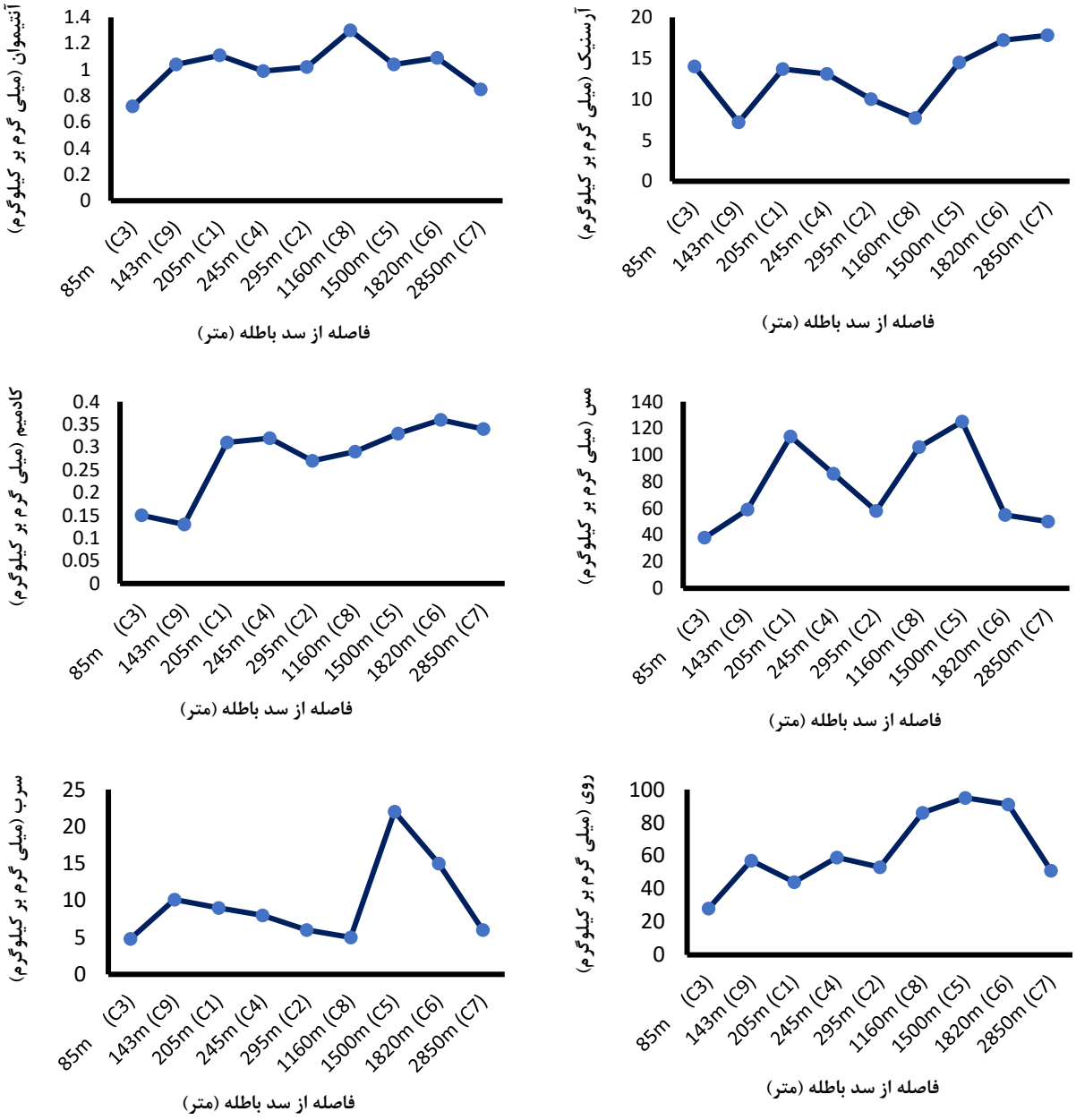
جدول (۸)، مقادیر فاکتور غنی‌شدگی هر نمونه خاک موردمطالعه برای عناصر مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، عناصر سرب و روی در همه نمونه‌های موردمطالعه، حداقل غنی‌شدگی را دارا بودند که نشان از عدم اثرات سد باطله بر این عناصر دارد. فلز کادمیم در اکثریت نمونه‌ها، میزان غنی‌شدگی کم و عنصر مس میزان غنی‌شدگی قابل توجهی را نشان می‌دهد. غنی‌شدگی قابل توجه مس را می‌توان به حضور مس و گوگرد در ارتباط با تشکیل کانی‌های سولفاتی مس و بقایای کانی‌های سولفیدی ارتباط داد. در طرف مقابل، فلز آنتیموان در اکثر نمونه‌ها غنی‌شدگی کم تا غنی‌شدگی قابل توجه و آرسنیک در اکثریت نمونه‌ها غنی‌شدگی زیادی را نشان داد. نکته قابل تامل در خصوص مقادیر فاکتور غنی‌شدگی، بالاتر بودن مقادیر آرسنیک، کادمیم و آنتیموان از این شاخص در یک نمونه از خاک شاهد (C7) در مقایسه با نمونه‌های نزدیک به سد باطله می‌باشد که نشان از بالا بودن این عناصر در سنگ مادر محدوده موردمطالعه دارد. بالا بودن مقادیر آرسنیک و آنتیموان می‌تواند ناشی از حضور این عناصر در سنگ سولفیدی معدن اولیه و تمرکز آنها در گوسان باشد.

Gyamfi *et al*. (2019) در مطالعه‌ای به بررسی پتانسیل آلودگی عناصر سنگین در صنایع معدنی بر منابع آب و خاک در منطقه‌ای از کشور غنا پرداختند. در این مطالعه، بر اساس نقاط آبرسانی در جامعه، نمونه‌های آب برداشت و همچنین نمونه‌برداری خاک از دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی متری انجام گرفت. بر اساس نتایج این مطالعه، آب موردمطالعه اگر چه محدودیتی برای شرب نداشت، اما در بعضی نقاط به دلیل محتوای بالای روی و آرسنیک، قابلیت مصرف نداشت. همچنین بررسی خاک منطقه بر اساس فاکتورهای مخلف آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین انباشتگی و شاخص بارگذاری آلودگی، نشان از آلودگی بالای خاک به عناصر سنگین (به استثنای جیوه) آهن، سرب، منگنز، روی، مس و آرسنیک داشت. این پژوهشگران با توجه به نتایج بدست آمده، معدنکاری فنی با رویکرد منظم را برای محافظت از منابع آب و خاک در برابر آلودگی بیشتر توصیه کردند. Olobatoke and

www.SID.ir

Archive of SID

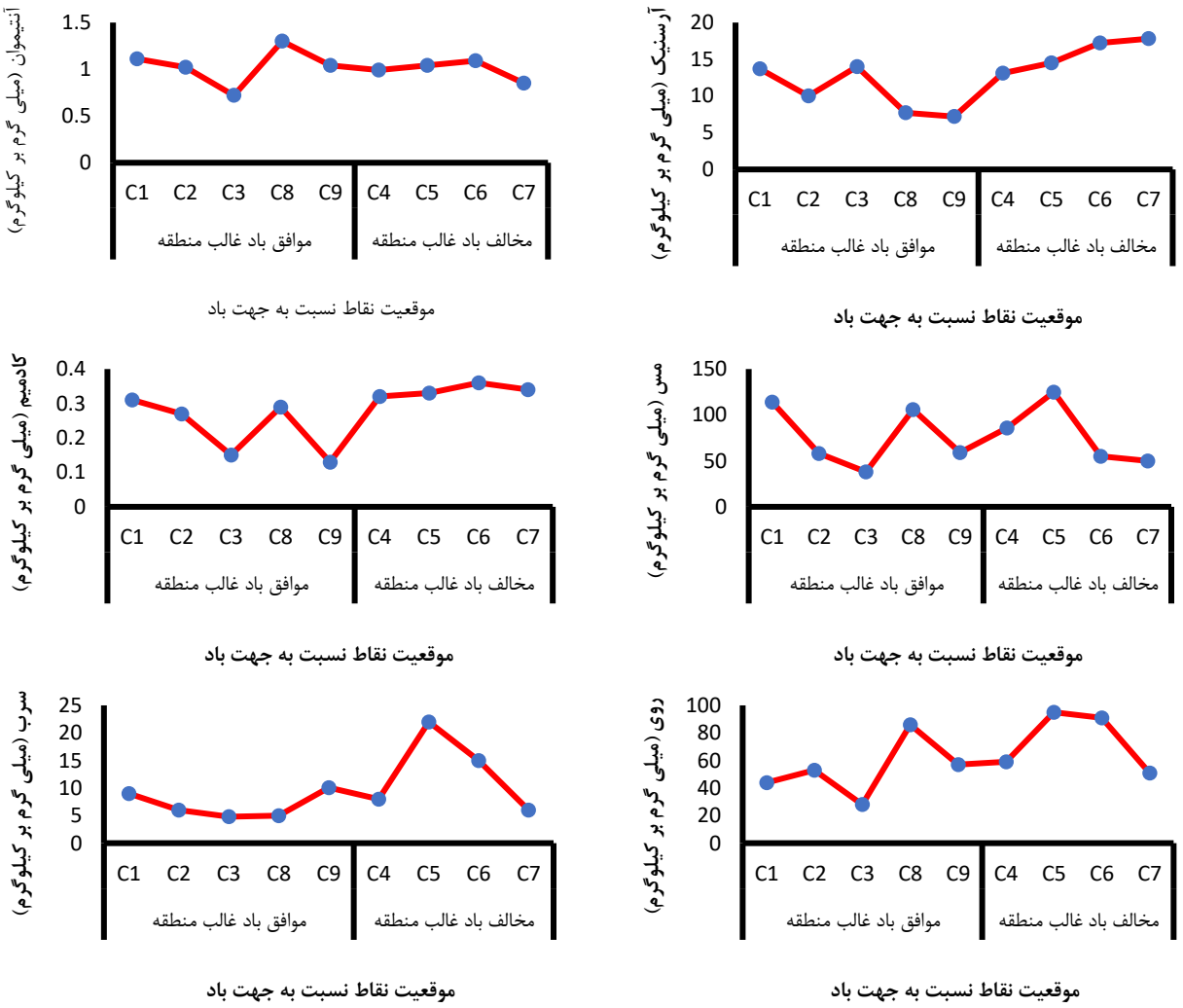
Mathuthu (2016) در بررسی غلظت کمی برخی عناصر سنگین در خاک‌های حوضه سد باطله یک معدن طلای قدیمی در ژوهانسبورگ آفریقای جنوبی، نشان دادند که بسیاری از نمونه های خاک موردمطالعه حاوی غلظت بالایی از شبه عنصر آرسنیک بوده و بر اساس شاخص‌های آلودگی، آرسنیک و کروم به ترتیب دارای آلودگی بسیار زیاد و متوسطی می‌باشند که می‌تواند اثرات جبران ناپذیری زیست‌محیطی را در منطقه سبب شود.



شکل ۸- مقادیر کمی عناصر موردمطالعه نسبت به فواصل مختلف از سد باطله، در نمونه‌های خاک سطحی معدن چهارگنبد

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹- روند تغییرات مقادیر کمی عناصر موردمطالعه نسبت به تغییرات جهت باد موافق و مخالف، در نمونه‌های خاک سطحی معدن چهارگنبد

جدول ۸- فاکتور غنی‌شدگی عناصر موردمطالعه در نمونه‌های خاک

شماره نمونه خاک	موقعیت	Zn	Sb	Pb	Cu	Cd	As
C۱	سد*	۰/۶۶	۵/۹۴	۰/۴۸	۴/۸۸	۳/۳۸	۹/۷۷
C۲	سد	۰/۸۶	۵/۹۰	۰/۳۵	۲/۶۸	۳/۱۹	۷/۷۱
C۳	سد	۰/۵۴	۴/۸۹	۰/۳۳	۲/۰۶	۲/۰۸	۱۲/۶۷
C۴	سد	۰/۸۱	۴/۸۳	۰/۳۹	۳/۳۶	۳/۱۹	۸/۵۲
C۵	شاهد**	۰/۷۶	۲/۹۷	۰/۶۳	۲/۸۵	۱/۹۲	۵/۵۲
C۶	شاهد	۰/۷۶	۳/۲۵	۰/۴۵	۱/۳۱	۲/۱۹	۶/۸۳
C۷	شاهد	۰/۹۳	۵/۵۱	۰/۳۹	۲/۵۹	۴/۵۰	۱۵/۳۸
C۸	سد	۰/۹۸	۵/۲۴	۰/۲۰	۳/۴۲	۲/۳۹	۴/۱۴
C۹	سد	۰/۶۸	۴/۴۱	۰/۴۳	۲/۰۱	۱/۱۲	۴/۰۷
ضریب غنی‌شدگی		†	†††و††††	†	†† و †††	††	†††و††††

† حداقل غنی‌شدگی، †† غنی‌شدگی کم، †††غنی‌شدگی قابل‌توجه، ††††غنی‌شدگی زیاد، †††††غنی‌شدگی بسیار زیاد

*سد: نمونه‌های نزدیک به سد باطله **شاهد: نمونه‌های خارج از منطقه به عنوان شاهد

جدول (۹)، مقادیر شاخص زمین انباشت هر عنصر در نمونه‌های خاک موردمطالعه را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج بدست آمده از طبقه‌بندی شاخص زمین‌انباشت عناصر موردمطالعه، عناصر روی و سرب در کلاس ۰، کادمیم و مس در کلاس ۱ و ۲، و آنتیموان و آرسنیک در کلاس ۲ و ۳ مشاهده شدند. بررسی و مقایسه شاخص زمین انباشت و فاکتور غنی‌شدگی مشابه آرسنیک و آنتیموان نشان از آلودگی بیشتر این عناصر نسبت به سایر عناصر در نمونه‌های خاک دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی مقادیر فاکتور آلودگی محاسبه شده بر اساس غلظت هر عنصر در خاک نسبت به غلظت آن عنصر در پوسته سطحی زمین (جدول ۱۰)، نشان داد که روی و سرب دارای آلودگی کم، کادمیم دارای آلودگی متوسط، مس دارای آلودگی زیاد، و آنتیموان و آرسنیک دارای آلودگی شدیدی می‌باشند.

جدول ۹- شاخص زمین انباشت عناصر موردمطالعه در نمونه‌های خاک

شماره نمونه خاک	Zn	Sb	Pb	Cu	Cd	As
C۱	-۱/۲۸	۱/۸۹	-۱/۷۴	۱/۶۰	۱/۰۸	۲/۶۱
C۲	-۱/۰۱	۱/۷۷	-۲/۳۲	۰/۶۳	۰/۸۸	۲/۱۵
C۳	-۱/۹۳	۱/۲۶	-۲/۶۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۲/۶۴
C۴	-۰/۸۵	۱/۷۲	-۱/۹۱	۱/۲۰	۱/۱۲	۲/۵۴
C۵	-۰/۱۶	۱/۷۹	-۰/۴۵	۱/۷۴	۱/۱۷	۲/۶۹
C۶	-۰/۲۳	۱/۸۶	-۱/۰۰	۰/۵۵	۱/۲۹	۲/۹۳
C۷	-۱/۰۶	۱/۵۰	-۲/۳۲	۰/۴۲	۱/۲۱	۲/۹۸
C۸	-۰/۳۱	۲/۱۲	-۲/۵۸	۱/۵۰	۰/۹۸	۱/۷۷
C۹	-۰/۹۰	۱/۷۹	-۱/۵۷	۰/۶۶	-۰/۱۸	۱/۶۸
کلاس Igeo	۰	۳ ،۲	۰	۲ ،۱	۲ ،۱	۳ ،۲

جدول ۱۰- فاکتور آلودگی عناصر موردمطالعه در نمونه‌های خاک

شماره نمونه خاک	Zn	Sb	Pb	Cu	Cd	As
C۱	۰/۶۲	۵/۵۵	۰/۴۵	۴/۵۶	۳/۱۶	۹/۱۳
C۲	۰/۷۵	۵/۱۰	۰/۳۰	۲/۳۲	۲/۷۶	۶/۶۷
C۳	۰/۳۹	۳/۶۰	۰/۲۴	۱/۵۲	۱/۵۳	۹/۳۳
C۴	۰/۸۳	۴/۹۵	۰/۴۰	۳/۴۴	۳/۲۷	۸/۷۳
C۸	۱/۲۱	۶/۵۰	۰/۲۵	۴/۲۴	۲/۹۶	۵/۱۳
C۹	۰/۸۰	۵/۲۰	۰/۵۱	۲/۳۷	۱/۳۳	۴/۸۰

Sey and Belford (2019) در بررسی مقادیر کمی فلزات سنگین و وضعیت آلودگی یک سد باطله معدن طلای متروکه در کشور غنا نشان دادند که غلظت عناصر سنگین در باطله‌های مذکور پایینتر از محدوده مجاز فائو و سازمان بهداشت جهانی بوده است، اما بررسی شاخص‌های آلودگی نشان از غنی‌شدگی بالای کادمیم در نمونه‌ها داشته است، که خطر آلودگی زیست‌محیطی اطراف سد باطله را سبب خواهد شد.

مقایسه سطوح عناصر موردمطالعه در خاک‌های منطقه با نمونه سنگ‌های طبیعی منطقه

در فرایند تشکیل خاک، سنگ‌های هر منطقه تحت تاثیر فرایندهای هوادیدگی شیمیایی و فیزیکی تبدیل به ذرات کوچک و در نهایت متاثر از فرایندهای خاکسازی (اقلیم، پوشش گیاهی، مواد مادری، زمان، توپوگرافی) تبدیل به خاک می‌شوند. خاک‌های هر منطقه متاثر از سنگ مادر همان منطقه می‌باشند که می‌تواند نشان دهنده افزودگی و کاهندگی هر عنصر در خاک باشد. در مطالعات انجام شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های ماگمایی ایران (۱۳۷۸)، به بررسی خصوصیات سنگ‌های مناطق مختلف ایران پرداخته است (Isfahani and Sharifi, 1999). در منطقه معدنی چهارگنبد، در فاصله نزدیک به این معادن، نمونه‌برداری سنگ انجام و بررسی پارامترهای مختلف اعم از مقادیر اکسیدی و عنصری سنگ (جدول ۱۱) مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه این موارد با میانگین عناصر خاک‌های موردمطالعه می‌تواند تکمیل‌کننده شاخص‌های آلودگی باشد. جدول (۱۲) مقادیر برخی عناصر در نمونه خاک‌های نزدیک سد باطله (میانگین ۶ نمونه)، نمونه‌های شاهد (فواصل دور از سد باطله، میانگین ۳ نمونه) و سنگ‌های نزدیک به منطقه (میانگین ۴ منطقه) را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۱- مقادیر عنصری سنگ‌های موردمطالعه در نزدیک منطقه معدنی چهارگنبد

عنصر	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	S3807*	S3808*	S3809*	S3810*
Pb	۲۹°۵۳′	۵۵°۵۴′	۱۰	۲۵	۴۹	۴۴
Zn	۲۹°۵۳′	۵۵°۵۴′	۸۹	۹۴	۲۱	۶۵
Cd	۲۹°۵۳′	۵۵°۵۴′	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
Sb	۲۹°۵۳′	۵۵°۵۴′	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

* شماره نمونه سنگ مطالعه شده از کتاب ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های ماگمایی ایران (Isfahani and Sharifi, 1999)

جدول ۱۲- مقادیر برخی عناصر در نمونه خاک‌های نزدیک سد باطله (میانگین ۶ نمونه)، نمونه‌های شاهد (فواصل دور از سد باطله، میانگین ۳ نمونه) و سنگ‌های نزدیک به منطقه (میانگین ۴ منطقه)

محل نمونه‌ها	Zn	Sb	Pb	Cu	Cd	As
نمونه‌های سد باطله	۵۴/۵۰	۱/۰۳	۷/۱۵	۷۶/۸۷	۰/۲۵	۱۰/۹۵
نمونه‌های شاهد	۷۹/۰۰	۰/۹۹	۱۴/۳۳	۷۶/۶۷	۰/۳۴	۱۶/۵۰
نمونه‌های سنگ	۶۷/۲۵	۱۰/۰۰	۳۲/۰۰	-	۱۰/۰۰	-

با توجه به نتایج مقایسه مقادیر برخی عناصر در نمونه خاک های نزدیک سد باطله، نمونه‌های شاهد و سنگ‌های نزدیک به منطقه (جدول ۹)، علی‌رغم عدم وجود اطلاعات در خصوص مقادیر مس و آرسنیک سنگ‌های موردمطالعه، مقادیر همه نمونه ها (به استثنا مس و آرسنیک) در خاک‌های نزدیک به سد باطله، از مقادیر عناصر موجود در نمونه‌های سنگ کمتر می‌باشد که نشان از عدم غنی‌شدگی و شسته شدن این عناصر در طی فرایند کانسارسازی توسط محلول‌های گرمابی در منطقه دارد.

نتیجه‌گیری

در مرحله تغلیظ ماده معدنی هر معدن، به منظور جدا کردن کانی‌های اصلی از فرعی (باطله‌ها)، حجم عظیمی از رسوبات تولید می‌گردد که معمولا به درون سدهای باطله هدایت می‌شوند. این رسوبات به دلیل انسان زاد بودن، دارای روند ژئوشیمیایی غیرعادی از آلاینده‌ها می‌باشند که در صورت مدیریت ناصحیح، می‌توانند سبب آلودگی رسوبات طبیعی، خاک و آب شوند. در مطالعه بررسی اثرات سد باطله معدن مس چهارگنبد بر آلودگی برخی آلاینده‌های خاک‌های سطحی اطراف نشان داده شد که رسوبات سد باطله دارای غنی‌شدگی قابل توجهی در عناصر مس و آنتیموان می‌باشند. در بررسی مقادیر کمی عناصر آلاینده در خاک‌های منطقه، مقادیر مشاهده شده آرسنیک (به استثنا یک نمونه شاهد)، مس (به استثنای سه نمونه مجاور سد)، سرب، روی، کادمیم و آنتیموان در همه خاک‌های منطقه پایین‌تر از حد استاندارد حفاظت محیط زیست بودند. با توجه به وضعیت عناصر موجود در منطقه معدن مس چهارگنبد، جدا از مقادیر بسیار بالای مس نسبت به استاندارد حفاظت محیط زیست که در منطقه معدنی با زمینه استخراج مس طبیعی می‌باشد، سایر عناصر مورد بررسی دارای مقادیر پایین‌تر از استاندارد حفاظت محیط زیست می باشند. بر اساس بررسی شاخص‌های آلودگی خاک، دو عنصر آرسنیک و آنتیموان با شدت بالایی (به احتمال بالا) متأثر از سد باطله منطقه قرار گرفته و سبب غنی‌شدگی بیشتر نسبت به حالت طبیعی این عناصر شده اند که احتیاط و بررسی در خصوص این عناصر در سال‌های آتی را طلب می‌کند.

سپاس‌گزاری

این مقاله در قالب طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۴۳/۷۰۴۳-۱۱۰ فی‌مابین دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته (کرمان) و سازمان حفاظت محیط‌زیست استان کرمان صورت پذیرفته است، که نویسندگان این پژوهش به دلیل حمایت های مالی و معنوی انجام گرفته از طرف این سازمان، نهایت قدردانی و تشکر را دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Azeez, J. O., Mesele, S. A., Sarumi, B. O., Ogundele, J. A., Uponi, A. O., & Hassan, A. O. (2014). Soil metal pollution as a function of traffic density and distance from road in emerging cities: a case study of Abeokuta, southwestern Nigeria. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *60*(2), 275-295.

Bhuiyan, M. A., Parvez, L., Islam, M. A., Dampare, S. B., & Suzuki, S. (2010). Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of hazardous materials*, *173*(1-3), 384-392.

Dung, T. T. T., Cappuyns, V., Swennen, R., & Phung, N. K. (2013). From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. *Reviews in Environmental Science and*

www.SID.ir

Archive of SID

Bio/Technology, *12*(4), 335-353.

El Khalil, H., El Hamiani, O., Bitton, G., Ouazzani, N., & Boularbah, A. (2008). Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: monitoring metal content and toxicity of soil runoff and groundwater. *Environmental monitoring and assessment*, *136*(1-3), 147-160.

Esmaeili, K., & Moore, F. (2013). Investigation of Heavy metals Enrichment in Stream Sediments of Sungun Porphyry Copper Deposit. *Iranian Journal of Mining Engineering*, *7*(17), 33-39.

García-Giménez, R., & Jiménez-Ballesta, R. (2017). Mine tailings influencing soil contamination by potentially toxic elements. *Environmental Earth Sciences*, *76*(1), 51.

Gyamfi, E., Appiah-Adjei, E. K., & Adjei, K. A. (2019). Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, *8*, 450-456.

Isfahani, F., & Sharifi, A. (1999). Geochemical characteristics of magmatic rocks of Iran. *Geological Survey of Iran*, *2*, 1470.

Jung, M. C. (2001). Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au–Ag mine, Korea. *Applied geochemistry*, *16*(11-12), 1369-1375.

Kabir, E., Ray, S., Kim, K. H., Yoon, H. O., Jeon, E. C., Kim, Y. S., ... & Brown, R. J. (2012). Current status of trace metal pollution in soils affected by industrial activities. *The Scientific World Journal*, *2012*.

Kargar, M., Khorasani, N. A., Karami, M., Rafiee, G. H., & Naseh, R. (2012). An investigation on As, Cd, Mo and Cu contents of soils surrounding the Meyduk Tailings Dam.

Kelm, U., Helle, S., Matthies, R., & Morales, A. (2009). Distribution of trace elements in soils surrounding the El Teniente porphyry copper deposit, Chile: the influence of smelter emissions and a tailings deposit. *Environmental geology*, *57*(2), 365-376.

Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, *51*, 229-245.

Kříbek, B., Majer, V., Pašava, J., Kamona, F., Mapani, B., Keder, J., & Ettler, V. (2014). Contamination of soils with dust fallout from the tailings dam at the Rosh Pinah area, Namibia: Regional assessment, dust dispersion modeling and environmental consequences. Journal of Geochemical Exploration, 144, 391-408.

McLennan, S. M., & Taylor, S. R. (1982). Geochemical constraints on the growth of the continental crust. *The Journal of Geology*, *90*(4), 347-361.

Mileusnić, M., Mapani, B. S., Kamona, A. F., Ružičić, S., Mapaure, I., & Chimwamurombe, P. M. (2014). Assessment of agricultural soil contamination by potentially toxic metals dispersed from improperly disposed tailings, Kombat mine, Namibia. *Journal of Geochemical Exploration*, *144*, 409-420.

Olobatoke, R. Y., & Mathuthu, M. (2016). Heavy metal concentration in soil in the tailing dam vicinity of an old gold mine in Johannesburg, South Africa. Canadian Journal of Soil Science, 96(3), 299-304.

Rashed, M. N. (2010). Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *Journal of hazardous materials*, *178*(1-3), 739-746.

Rastmanesh, F., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2010). Speciation and phytoavailability of heavy metals in contaminated soils in Sarcheshmeh area, Kerman Province, Iran. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, *85*(5), 515-519.

Sey, E., & Belford, E. J. (2019). Levels of heavy metals and contamination status of a decommissioned tailings dam in Ghana. EQA-International Journal of Environmental Quality, 35, 33-50.

Ure, A. M., & Berrow, M. L. (1982). The elemental constituents of soils. In: Bowen HJM, Berrow MJ, Berrow ML, Cawse PA, Patterson DSP, Statham PJ, Ure AM (eds) Environmental chemistry: a review of the literature published up to mid- 1980. Royal Society of Chemistry, London. 2: 94–204.

Uugwanga, M. N., & Kgabi, N. A. (2020). Assessment of metals pollution in sediments and tailings of Klein Aub and Oamites mine sites, Namibia. *Environmental Advances*, *2*, 100006.

Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, *184*, 594-600.

Warrick, A. W. (1998). Spatial variability. *Environmental soil physics*, 655-675.

Weissenstein, K., & Sinkala, T. (2011). Soil pollution with heavy metals in mine environments, impact areas of mine dumps particularly of gold-and copper mining industries in Southern Africa. *Arid Ecosystems*, *1*(1), 53.

Zhang, X. Y., Yue-Yu, S. U. I., Zhang, X. D., Kai, M. E. N. G., & Herbert, S. J. (2007). Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere*, 17(1), 19-29.

www.SID.ir