

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک منطقه معدن متروکه سرب - روی آی‌قلعه‌سی، جنوب خاور تکاب

بهناز دهر آزما^۱، آمنه آذریپکان^۲، سروش مدبری^۳ و علیرضا سیاره^۴

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۳ استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۴ کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۲۳

چکیده

خاک یکی از مهم‌ترین اجزای لیتوسفر بوده و به عنوان بخشی از اکوسیستم نقش بسیار مهمی در چرخه حیات ایفا می‌کند. هدف از این تحقیق ارزیابی تأثیر کانه‌زایی و معدن متروکه سرب-روی آی‌قلعه‌سی بر نحوه توزیع فلزات سنگین و آلودگی خاک منطقه است. در این راستا ۴ نمونه از خاک حاصل از باطله‌های رها شده در اطراف معدن متروکه و ۲۳ نمونه خاک برجا در کل حوضه آبریز مورد مطالعه، از عمق ۵ تا ۲۵ سانتی‌متری با در نظر گرفتن چینه‌شناسی منطقه و فاصله از معدن متروکه، برداشت شد. نمونه‌های خاک حاصل از باطله و خاک برجای منطقه توسط پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) برای تعیین غلظت فلزات سنگین (Ag, Cu, Cd, As, Zn, Pb) آنالیز شدند. نتایج نشان می‌دهند که متوسط غلظت فلزات Pb (۹۱۸۷/۲)، Zn (۹۳۹۲/۳)، As (۶۳۰/۸)، Cd (۰/۲)، Cu (۱۰۰۵/۹) و Ag (۶۱/۱)، برحسب mg/kg در نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها نسبت به متوسط خاک جهانی، به‌جز Cd و نسبت به استاندارد خاک هلند به‌جز Ag بالا است. در نمونه‌های خاک اطراف معدن نیز غلظت فلزات بالا است و با دور شدن از رگه معدنی و معدن متروکه از غلظت آنها کاسته می‌شود. در نمونه‌های شاهد غلظت فلزات Ag, As, Zn, Pb نسبت به متوسط خاک جهانی و استاندارد کشور هلند بالا است که این امر نشان دهنده بالا بودن غلظت زمینه این عناصر در منطقه می‌باشد. خاک منطقه از نظر شاخص‌های زمین‌انباشت، ضریب غنی‌شدگی، ضریب آلودگی و درجه آلودگی و شاخص بار آلودگی برای عناصر Zn و Pb در اطراف محدوده معدنی دارای آلودگی بالا تا بی‌نهایت است. بر اساس ضریب همبستگی، عناصر Cu, Zn, Pb و Ag دارای همبستگی بالایی هستند.

کلیدواژه‌ها: فلزات سنگین، آلودگی، معدن متروکه، سرب و روی، آی‌قلعه‌سی
***نویسنده مسئول:** بهناز دهر آزما

E_mail: Behnaz_dahrazma@shahroodut.ac

۱- پیش‌گفتار

انسان می‌گردند. بعضی از فلزات سنگین مثل آرسنیک، کادمیم، سرب، کروم و جیوه بسیار سمی بوده و باعث آسیب جدی به سلامت انسان می‌شوند. با توجه به اینکه منابع معدنی خصوصاً کانسارهای فلزی حاوی مقادیر قابل توجه فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمی هستند، تماس آب‌های سطحی و زیرزمینی با سنگ میزبان و توده‌ها و رگه‌های معدنی، و هوازگی سنگ‌ها در کانسارها باعث آزادسازی عناصر مختلف شده و مقدار زیادی از فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمی را در رسوبات پایین دست و خاک‌های مجاور برجای می‌گذارد.

مطالعات زیادی در ارتباط با ورود فلزات سنگین به محیط خاک در مناطق کانه‌زایی و معدنکاری کانسارهای فلزی انجام گرفته است. برای نمونه، در مطالعه‌ای که جهت ارزیابی بار آلودگی در آب، خاک و رسوبات متأثر شده از معدن سرب و روی Kongjujeil در جمهوری کره صورت گرفته کانی‌های موجود در خاک و رسوبات شامل، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، مالاکیت و گوتیت می‌باشند. در این مطالعه فلزات سنگین As, Cu, Cd, Pb, Sb, Zn در خاک‌های سطحی اطراف محدوده معدنی دارای غلظت بالایی هستند (Lee, 2003). در معادن قدیمی به علت استفاده از روش‌های ساده و ناکارآمد، مواد باطله تولیدی دارای غلظت فلزی بالایی بوده که با قرارگیری در معرض عوامل جوی شرایط رهاسازی فلزات به محیط خاک و آب فراهم می‌شود (Johnson et al., 1994). در مطالعه‌ای که جهت ارزیابی آلودگی خاک کشاورزی و باطله‌ها به فلزات سنگین در معدن متروکه سرب و روی در منطقه Kirki در شمال خاور یونان انجام شد، نمونه‌های باطله غلظت بسیار بالایی از عناصر Zn, Pb, Cd, Cu و As را نشان دادند. نمونه خاک‌های نزدیک به محدوده معدن نیز دارای غلظت فلزات سنگین بالایی بودند که نشان دهنده وابستگی آلودگی خاک به فعالیت‌های معدنکاری است (Nikolaidis et al., 2010).

فلزات سنگین می‌توانند از منابع انسان‌زاد و زمین‌زاد وارد محیط زیست شوند. منابع طبیعی فلزات سنگین را می‌توان سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی، دگرگونی و هوازگی تشکیلات خاک در نظر گرفت و منابع غیر طبیعی این فلزات را می‌توان متأثر از فعالیت‌های انسان همچون معدنکاری، کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی دانست (Bradl, 2005). معدنکاری مواد لازم برای حیات و پیشرفت بشر را فراهم کرده و فعالیت‌های انسان‌زاد از طرفی با افزایش آلودگی‌ها امکان حیات و استفاده از محیط زیست سالم را از بشر می‌گیرد. به همین جهت در بسیاری از کشورها، تأثیرات زیست‌محیطی عملیات معدنکاری مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت استانداردهایی در زمینه آلودگی خاک ناشی از فعالیت‌های معدنی و حدود آلودگی‌های آب، خاک و گیاه حاصل از این صنعت در نظر گرفته شده است. مهمترین خطرات مناطق کانه‌زایی و معادن متروکه سولفیدی، زهاب اسیدی معدن و باطله‌های رها شده در منطقه می‌باشد. باطله‌ها دارای غلظت بالایی از عناصر بوده که تحت شرایط ویژه محیطی، این عناصر رها شده و وارد منابع آب و خاک می‌شوند، لذا غلظت زمینه عناصر در خاک‌های مناطق معدنی و زون‌های کانه‌زایی شده، بالا است.

عناصر کمیاب یا جزئی موجود در خاک عناصری هستند که در غلظت‌های کمتر از ۱۰۰ mg/kg وجود دارند. عناصر جزئی مهم در محیط زیست، انسان و حیوان شامل فلزات (Cd, Pb, Zn, Cr, Hg, ...)، شبه فلزات (As, Sb, B)، غیر فلزات (Se)، اکتینوئیدها (U) و هالوژن‌ها (I و F) هستند. این عناصر با عناوین مختلفی همچون فلزات سمی، فلزات جزئی یا کمیاب و فلزات سنگین خوانده می‌شوند (Hooda, 2010). فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمی از جمله آلاینده‌های پایدار در خاک بوده و چون توسط موجودات خاک تجزیه نمی‌شوند، از خاک به گیاه، محصولات کشاورزی و در نتیجه فرآورده‌های دامی منتقل شده و وارد چرخه غذایی

درصد سیلت، رس و ماسه)، و ارزیابی نحوه توزیع غلظت فلزات سنگین در خاک منطقه پرداخته می‌شود.

۲- محدوده مورد بررسی

کانه‌زایی چند فلزی آی‌قلعه‌سی در فاصله ۳۰ کیلومتری شهرستان تکاب، در منطقه‌ای کوهستانی و صعب‌العبور و در طول جغرافیایی $21^{\circ} 47'$ و $24^{\circ} 47'$ خاوری و عرض جغرافیایی $17^{\circ} 36'$ و $21^{\circ} 36'$ شمالی قرار دارد. مساحت منطقه مورد مطالعه حدود ۲۰ کیلومتر مربع است که در بخش جنوب خاوری شهرستان تکاب و بین استان‌های آذربایجان غربی، کردستان و زنجان واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۴۰۰ میلی‌متر و متوسط رطوبت نسبی هوا $56/31$ درصد گزارش شده است (عزیزی، ۱۳۸۶). بطور کلی اقلیم منطقه سرد و خشک است. منطقه تکاب به دلیل قرارگیری بر روی زون ارومیه- دختر یا سه‌د- بزمان یکی از مناطق مهم متالوژنی در ایران است که می‌توان به معادن فلزی و غیر فلزی متعددی در این منطقه اشاره کرد. یکی از مسائل مهم در این منطقه غلظت زمینه بالای فلزات سنگین در خاک و همچنین کانه‌زایی سرب- روی در منطقه و نیز معدنکاری قدیمی می‌باشد که می‌تواند دلیل عمده آلودگی منابع آب، خاک و گیاهان باشد.

۳- زمین‌شناسی

منطقه تکاب از نظر جایگاه زمین‌ساختی، محل برخورد زون‌های سندج- سیرجان و البرز- آذربایجان (نبوی، ۱۳۵۵) بوده و کانه‌زایی روی- سرب آی‌قلعه‌سی در شمال باختری زون ارومیه- دختر (Stocklin, 1968) یا سه‌د- بزمان (آقاناتی، ۱۳۸۳) قرار دارد. این زون عمدتاً از مجموعه‌های ولکانیک- پلوتونیک تشکیل شده است که در فاز پس از ائوسن (الیگوموسن) مورد هجوم توده‌های نفوذی عمدتاً گرانیتوئیدی قرار گرفته‌اند. نقشه زمین‌شناسی منطقه (فئودی و حریری، ۱۳۷۹) در شکل ۱ آورده شده است. عمده سازندهای منطقه از قدیم به جدید شامل سنگ‌های دگرگون شده کرتاسه، سنگ‌های رسوبی ائوسن، واحد آهکی، واحد مارنی- آهکی، واحد سیلینی ماسه‌ای میوسن که کانه‌زایی در آن اتفاق افتاده و توده نیمه عمیق داسیتی هستند.

کانسار پلی‌متال آی‌قلعه‌سی از نوع اپی‌ترمال با سولفیداسیون حدواسط است که مهمترین کانی‌های موجود در آن، سولفیدهایی از قبیل پیریت (FeS_2)، بورنیت (Cu_3FeS_4)، کالکوپیریت ($CuFeS_2$)، گالن (PbS) و اسفالریت (ZnS) فقیر از آهن بوده و تنها سولفوسالت موجود در این کانه‌زایی تتراهدردیت ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$) است، که این کانی‌ها با توجه به مطالعات کانی‌شناسی مشابه صورت گرفته شاخص مناطق با کانه‌زایی سرب و روی هستند (صالحی و همکاران، ۱۳۸۹; Detra, 1977; Srivastava, 2011). سنگ میزبان این کانسار سنگ‌های رسوبی الیگوموسن (سیلتستون، ماسه‌سنگ و مارن) و گنبد‌های نیمه عمیق داسیتی می‌باشد. بر اساس مقایسه‌ای که بین سن کانسار اپی‌ترمال با سولفیداسیون حدواسط آی‌قلعه‌سی و کانسارهای مشابه در مکزیک صورت گرفته اکثر کانسارها دارای سن الیگوموسن تا پلیوسن هستند. از آنجایی که کانه‌زایی در منطقه آی‌قلعه‌سی، همزمان با نفوذ گنبد داسیتی به درون سکانس رسوبی الیگوموسن صورت گرفته، بنابراین سن کانه‌زایی همزمان با نفوذ گنبد و مربوط به زمان پلیوسن در نظر گرفته می‌شود (شیرخانی، ۱۳۸۶).

بر اساس مطالعاتی که صورت گرفته، ذخیره این کانسار ۱۰۰ تا ۱۵۰ هزار تن برآورد شده است (قربانی، ۱۳۸۱). بر پایه آنالیزهای انجام شده غلظت عناصر Pb و Zn در رگه اصلی معدن آی‌قلعه‌سی به ترتیب ۴۷۷۰۰ و 75600 mg/kg است (شرکت معدنکاران انگوران، ۱۳۹۱). بافت و ساخت کانسار سرب- روی آی‌قلعه‌سی رگه‌ای، پرکننده فضای خالی، شانه‌ای، برشی و توده‌ای تعیین شده است (شیرخانی، ۱۳۸۶). در نمونه سنگ‌های اخذ شده از دیوپی باطله‌های معدن، به ترتیب غلظت عناصر Pb و Zn بیشتر از 10000 mg/kg و Cu و As به ترتیب $830/19$ و $600/4$ می‌باشند.

خاک‌های اطراف معدن متروکه سرب و روی که در دره Alcudia، جنوب اسپانیای مرکزی واقع شده‌اند جهت تعیین میزان فلزات سنگین مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. غلظت کل فلزات در ۶۰ نمونه خاک مزروعی، مرتعی و معدنی تعیین شد که مقادیر بالایی از فلزات Pb (98510 mg/kg)، Zn (20912 mg/kg) و Cd (61 mg/kg) را نشان می‌دهند (Ruiz et al., 2009).

در مطالعه‌ای دیگر که بر روی آلودگی فلزات سنگین در اطراف معدن فعال سرب- روی و مس Koyulhisar که ترکیه انجام شد، نشان داده شد که اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی باعث تولید آب‌های اسیدی با مقادیر بالای SO_4^{2-} و Fe می‌شوند. این آب‌های اسیدی مسئول انحلال فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمی Al، Fe، Mn، Pb و Zn و ورود آنها به آب‌های سطحی و زیرزمینی هستند. زباله‌های حاصل از معدنکاری نیز بر غلظت بالای فلزات در آب رودخانه و آب زیرزمینی اثر می‌گذارند. غلظت Al، Fe و Mn در زهاب اسیدی به ترتیب 8829 ، 19084 و 1708 ppb بوده است (Keskin & Toptaş, 2012).

در محدوده معدن سرب و روی Arufu در نیجریه خاک کشاورزی نزدیک معدن و خاک جنگلی (به عنوان شاهد) جهت ارزیابی فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه غلظت فلزات Pb، Zn و Cd در خاک‌های کشاورزی نزدیک معدن بالاتر از غلظت این فلزات در خاک شاهد بوده که نشان دهنده تأثیر معدنکاری و فعالیت کشاورزی بر غلظت این فلزات در این خاک‌ها می‌باشد (Nganje et al., 2010).

آلودگی خاک و رسوبات به فلزات سنگین در زامبیا نیز مورد بررسی قرار گرفت، که در این مطالعه بر اساس آنالیز خوشه‌ای ۳ منشأ برای آلودگی فلزات سنگین در زامبیا پیدا شد. در گروه اول غلظت Zn، Pb، As و Cd به طور قابل توجهی بالا بوده که نشان دهنده تأثیر معدنکاری و کارخانه ذوب سرب و روی در منطقه Kabwe (مرکز زامبیا) می‌باشد. در رسوبات آبراهه Mushishima که از مناطق کانه‌زایی سولفیدی غنی در مس و کبالت (شمال غرب زامبیا) منشأ گرفته‌اند نیز غلظت بالای Cu و Co مشاهده شد که در تلاقی با رودخانه Kafue و به طرف پایین دست از غلظت آنها کاسته می‌شود (Ikenaka et al., 2010).

ژئوشیمی زیست محیطی کانسار و معدن متروکه Webbs Consols در نیو ساوت ولز استرالیا توسط Ashley et al. (2004) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه معدنکاری و بهره‌برداری کانی‌ها در مقیاس کوچک در این کانسار چند فلزی Pb-Ag-Zn صورت گرفته، اما مقادیر بالایی از فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمی Pb، Zn، Cu، Cd، As، Fe و Sb وارد محیط خاک شده است. باطله‌های رها شده در اطراف معدن حاوی مقادیر بالای سولفیدهای آرسنوپیریت، گالن و اسفالریت و اکسیدهای تولید شده اسکرودیت، آنگلنزیت و اکسی هیدروکسیدهای آهن می‌باشند که مقادیر بسیار بالای As و Pb و مقادیر بالای Ag، Cu، Cd، Zn را دارا هستند. از جمله معادن سرب و روی فعال در ایران، می‌توان به معادن انگوران، آهنگران، ایرانکوه، کوشک و ... اشاره کرد، که با توجه به نوع کانی‌های همراه و فعالیت‌های صورت گرفته، مطالعات کانی‌شناسی و زیست محیطی گسترده‌ای بر روی آنها صورت گرفته است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی خاک محدوده معدنی سرب و روی آهنگران در همدان، غلظت میانگین عناصر Cu، Ni، Pb، Zn و Cd در خاک به ترتیب 404 ، 81 ، 7192 و 1346 و $18/5$ mg/kg اندازه‌گیری شد (وهابزاده کبریا و همکاران، ۱۳۸۴).

با توجه به عدم وجود تحقیقات زیست محیطی در ارتباط با تأثیرگذاری کانسار سرب و روی آی‌قلعه‌سی بر آلودگی خاک در منطقه آی‌قلعه‌سی، در این پژوهش به بررسی آلودگی خاک منطقه به فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی شامل ضریب زمین‌ناشت (I_{geo})، ضریب غنی‌شدگی (EF)، ضریب آلودگی (Cf)، درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) و شاخص بار آلودگی (PLI) و همچنین بررسی همبستگی فلزات سنگین با یکدیگر و پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک (pH، OM)،

در خاک جهانی (جدول ۴) نشان می‌دهد که غلظت عناصر Ag و Cu، As، Zn، Pb در تمام نمونه‌های خاک برجا، بالاتر از مقادیر متوسط خاک جهانی می‌باشد. غلظت این عناصر نیز به‌جز Ag نسبت به استاندارد کشور هلند (جدول ۴) بالاتر است. بر اساس مقایسه‌ای که بین غلظت عناصر در سنگ باطله‌ها با متوسط غلظت در خاک حاصل از باطله‌ها صورت گرفته، عناصر Ag و Cu در سنگ باطله نسبت به خاک حاصل از باطله‌ها به ترتیب بیشتر از ۸ و ۲ برابر افزایش غلظت نشان می‌دهند.

مقادیر متوسط غلظت این عناصر در نمونه خاک‌های حاصل از باطله‌ها، اختلاف بسیار زیاد غلظت عناصر در خاک حاصل از باطله‌ها در مقایسه با خاک بر جای منطقه را بیان می‌کند. این اختلاف در برخی از عناصر مانند Zn، Pb، As و Cu به بیش از ۱۰۰ برابر می‌رسد. مقایسه خاک حاصل از باطله‌ها با خاک پایین دست منطقه و نمونه‌های شاهد نشان دهنده تأثیر بسزای کانسار سرب و روی و باطله‌های آن در توزیع غلظت این فلزات در خاک منطقه می‌باشد. شایان ذکر می‌باشد که اختلاف چندانی بین غلظت Cd در خاک حاصل از باطله‌ها در مقایسه با خاک بر جای منطقه دیده نمی‌شود که این امر عدم تأثیرگذاری کانسار در توزیع غلظت این عنصر در خاک منطقه را روشن می‌سازد.

فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های خاک برداشت شده از بالادست به سمت پایین دست منطقه، تغییرات متفاوتی را نشان می‌دهند (جدول ۳). نمونه S₂ که از امتداد رگه معدنی و معدن متروکه برداشت شده دارای بالاترین غلظت فلزات سنگین Ag، Cu، As، Zn، Pb بوده که نسبت به متوسط خاک جهانی و استاندارد خاک هلند به ترتیب بیشتر از ۱۰۰ و ۱۰ برابر افزایش غلظت نشان می‌دهند. Ag و Cu نیز بر اساس استانداردهای مورد نظر افزایش غلظت بیش از ۱۰ برابر را نشان می‌دهند. نمونه‌های S₁، S₃ و S₄ که از خاک‌های نزدیک معدن متروکه برداشت شده‌اند نیز، غلظت‌های بالایی از این عناصر به‌جز Cd را نسبت به استانداردهای مورد نظر نشان می‌دهند. با توجه به فاصله نمونه S₁₆ از معدن متروکه که حدود ۷ کیلومتر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که حضور کانسار و معدنکاری قدیمی تا حدود بیش از ۷ کیلومتر بر خاک منطقه تأثیرگذار بوده است. کاهش غلظت عناصر Zn، Pb، As و Cu از بالادست (منطقه معدن متروکه) تا پایین دست منطقه، نشان از تأثیر کانسار بر نحوه توزیع این عناصر در خاک منطقه دارد. در بقیه نمونه‌ها غلظت برخی از فلزات نسبت به استانداردهای مورد نظر بالا است. تغییرات منظمی در پراکنش غلظت Ag در خاک برجا، از بالادست به سمت پایین دست دیده نمی‌شود.

همانطور که پیشتر بیان شد اختلافی بین غلظت Cd در خاک حاصل از باطله‌ها با خاک برجا، و همچنین بین خاک بالادست با خاک پایین دست منطقه دیده نمی‌شود، که این مطلب عدم تأثیرگذاری کانسار بر نحوه پراکنش این عنصر در خاک منطقه را روشن می‌سازد. در نمونه‌های S₂₂ و S₂₃ که نمونه‌های شاهد بوده و به ترتیب از بالادست معدن و خارج از محدوده کانه‌زایی برداشت شده‌اند، غلظت برخی از فلزات همچون Zn، Pb، As و Ag نسبت به استانداردهای مورد نظر (جدول ۴) بالا بوده که نشان دهنده آلوده بودن خاک منطقه به این عناصر و غلظت زمینه بالای عناصر در منطقه می‌باشد. شایان ذکر است که غلظت این عناصر در نمونه‌های شاهد در مقایسه با دیگر نمونه‌ها مقادیر کمتری را نشان می‌دهند که می‌تواند بیان کننده تأثیر کانه‌زایی سرب و روی بر توزیع این عناصر در خاک منطقه باشد.

۱-۲. ماتریس همبستگی

داده‌های ماتریس همبستگی پیرسون فلزات سنگین (Ag، Cu، Cd، As، Zn، Pb) با پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک (pH، OM، درصد رس، سیلت و ماسه) در جدول ۵ آورده شده‌اند. با توجه به این نتایج، همبستگی بالایی بین فلزات Zn، Pb و Cu و Ag به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۶ و ۰/۸۵ دیده می‌شود که این امر به دلیل رفتار مشابه ژئوشیمیایی آنها و هم منشأ بودن آنها می‌باشد. همبستگی پایین بین Cd با Zn، Pb و Ag به دلیل عدم ارتباط ژئوشیمیایی این عنصر با کانه‌زایی در منطقه است. مواد آلی و مقدار رس

در محدوده مورد مطالعه گسل‌ها مهمترین کنترل کننده‌های ساختاری کانه‌زایی بوده و کانه‌زایی در طول گسل نرمال اصلی مجاور معدن متروکه آی‌قلعه‌سی با روند شمال خاوری- جنوب باختری، به طول بیش از ۱ کیلومتر و عرض ۲ تا ۱۰ متر صورت پذیرفته است (شیرخانی، ۱۳۸۶). گسل‌های فرعی با روند شمال باختری- جنوب خاوری نیز گزارش شده‌اند که در امتداد یکی از آنها که عمود بر زون کانه‌زایی می‌باشد عمده کارهای معدنی صورت گرفته است (شیرخانی، ۱۳۸۶).

۴- مواد و روش‌ها

۴ نمونه از خاک حاصل از باطله‌های اطراف معدن (نمونه‌های MWS₁-MWS₄) و نیز ۲۳ نمونه خاک بر جای منطقه (S₁-S₂₃) با در نظر گرفتن موقعیت معدن و جنس سازندهای زمین‌شناسی جهت ارزیابی کیفیت خاک در منطقه کانه‌زایی شده با منطقه غیر کانه‌زایی از بالادست تا پایین دست منطقه مورد مطالعه برداشت شد (شکل ۲ و جدول ۱).

همه نمونه‌ها با وزن حدود ۱ تا ۱/۵ کیلوگرم و با کنار زدن خاک سطحی از عمق ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر توسط بیلچه فلزی بدون رنگ جمع‌آوری شدند. هر نمونه خاک شامل سه زیر نمونه می‌باشد که با فاصله ۲ متر از هم برداشت و در محل روی کاغذی تمیز با هم مخلوط شد. قلوه سنگ‌ها جدا و به اندازه مورد نظر از هر نمونه در کیسه‌های نایلونی با مقاومت بالا ریخته و در محل کدگذاری شدند. سپس نمونه‌ها در هوای آزاد به مدت ۲ روز خشک و از الک ۲ mm عبور داده شدند. در ادامه، از هر نمونه ۳۰۰ گرم، در هاون عقیق تا عبور کل ذرات از الک ۲۳۰ مش خرد و نمونه‌ها برای تعیین غلظت فلزات سنگین توسط پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) و pH در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی کشور تجزیه شدند. برای تعیین درصد مواد آلی خاک از روش احتراق خشک (کوره) استفاده شد (Standard Methods 209f, APHA, 1995). فرمول زیر روش محاسبه مواد آلی را در خاک نشان می‌دهد:

$$L.O.I_{550} = (DW_{105} - DW_{550} / DW_{105}) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه L.O.I کاهش وزن خاک در اثر احتراق، DW₁₀₅ کاهش وزن در دمای ۱۰۵°، DW₅₅₀ کاهش وزن در دمای ۵۵۰° را معلوم می‌سازد. جهت اندازه‌گیری ذرات و تعیین بافت خاک از طبقه‌بندی استاندارد کشاورزی امریکا (USDA, 1951) استفاده شد.

۵- بحث و نتایج

۱-۱. غلظت فلزات سنگین در خاک منطقه

در این مطالعه با توجه به نوع کانسار و تغییرات غلظت عناصر در خاک منطقه، فلزات Zn، Pb، As، Cd، Cu و Ag جهت ارزیابی انتخاب گردیدند، موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که متوسط pH خاک حاصل از باطله‌ها و خاک‌های منطقه به ترتیب ۴/۲۵ و ۷/۶۲ می‌باشند که با توجه به طبقه‌بندی خاک بر اساس pH (Soil Science Society of America, 1997) به ترتیب در محدوده شدیداً اسیدی و کمی قلیایی قرار می‌گیرند (جدول ۲). با توجه به مقادیر مواد آلی، خاک باطله‌ها و خاک منطقه دارای مواد آلی کم می‌باشند (جدول ۲). کمبود مواد آلی در این خاک‌ها با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه هیچ فعالیت کشاورزی صورت نمی‌گیرد و منطقه از پوشش گیاهی فقیر بوده قابل توجه می‌باشد. ارزیابی بافت خاک بر جای منطقه، با استفاده از طبقه‌بندی استاندارد بافت خاک کشاورزی آمریکا در شکل ۳ آورده شده، که نشان می‌دهد خاک منطقه دارای بافت ماسه‌ای و ماسه‌ای لومی می‌باشد. با توجه به اینکه خاک حاصل از باطله‌ها در اثر فعالیت‌های معدنکاری گذشته در اطراف معدن ریخته شده‌اند، بنابراین این نمونه‌ها تعیین بافت نشده‌اند.

مقایسه غلظت عناصر در خاک حاصل از باطله‌ها (جدول ۲) با میانگین غلظت آنها

در چهار رده شرح داده است: $C_f < 1$ آلودگی پایین، $1 < C_f < 3$ آلودگی متوسط، $3 < C_f < 6$ آلودگی قابل توجه و $C_f \geq 6$ آلودگی بسیار بالا. با توجه به نتایج بدست آمده، میانگین ضریب آلودگی عناصر Pb, Zn, As, Cu و Ag در خاک باطله‌ها بالاتر از 6 بوده و آلودگی بسیار بالا را نشان می‌دهند. میانگین ضریب آلودگی در خاک باطله‌ها برای Cd در محدوده آلودگی پایین قرار دارد. با توجه به میانگین ضریب آلودگی عناصر مورد بررسی در خاک برجای منطقه، خاک منطقه نسبت به Pb, Zn و Ag دارای آلودگی بسیار بالا بوده و نسبت به فلزات As, Cu و Cd به ترتیب آلودگی قابل توجه، آلودگی متوسط و آلودگی پایین را نشان می‌دهد (شکل 6).

درجه آلودگی اصلاح شده توسط (Abraham, 2005) به شرح زیر بیان شده است:

$$mC_h = -\sum C_f / n \quad (5)$$

n تعداد عناصر آنالیز شده و C_f ضریب آلودگی می‌باشد. جدول 8 رده‌بندی پیشنهاد شده برای mC_h در خاک را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 7 نشان داده شده، نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها نسبت به تمام عناصر مورد نظر درجه آلودگی اصلاح شده بی‌نهایت را نشان می‌دهند. نمونه‌های نزدیک به کانه‌زایی و معدن نسبت به تمام عناصر، درجه آلودگی بی‌نهایت داشته که بیان کننده غلظت بالای این عناصر در خاک اطراف زون کانه‌زایی است. نمونه‌های شاهد که مقادیر کمتر عناصر را دارا هستند درجه آلودگی کم را نشان می‌دهند.

۴-۶. شاخص بار آلودگی

شاخص بار آلودگی (Pollution Load Index) معیاری جهت تعیین بار آلودگی در خاک منطقه است (Thomilson et al., 1980)، که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PLI = (C_{f1} \times C_{f2} \times \dots \times C_{fn})^{1/n} \quad (6)$$

n تعداد فلزات مورد مطالعه (۶ فلز)، C_f ضریب آلودگی محاسبه شده در رابطه ۴ است. در این حالت $PLI < 1$ نشان دهنده کیفیت خوب خاک منطقه، $PLI = 1$ آلودگی نزدیک به زمینه و $PLI > 1$ نشان دهنده کیفیت نامناسب خاک منطقه است. با توجه به محاسبات PLI نمونه‌های خاک منطقه و خاک حاصل از باطله‌ها که در شکل 8 نشان داده شده است، تمام نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها کیفیت نامناسب آنها را بیان می‌کنند. از طرف دیگر، نمونه‌های خاک اطراف معدن نیز از نظر غلظت فلزات سنگین کیفیت نامناسب دارند.

۷- نتیجه‌گیری

بررسی غلظت عناصر مورد بررسی در باطله‌های اطراف معدن متروکه سرب- روی آی‌قلعه‌سی نشان دهنده آلودگی شدید خاک حاصل از باطله‌ها نسبت به فلزات Pb, Zn, As, Cu, Cd می‌باشد. این خاک‌ها حاوی مقادیر بالای کانیهای گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت هستند بنابراین توان آلاینده‌گی بالایی دارند. بر اساس میانگین شاخص زمین‌انباشت، تمام نمونه‌های خاک باطله‌ها نسبت به فلزات Pb, Zn, As, Cu و Ag آلودگی شدید تا بی‌نهایت و نسبت به Cd بدون آلودگی می‌باشند. این خاک‌ها نسبت به عناصر سرب، روی، آرسنیک و نقره نیز غنی‌شدگی بی‌نهایت دارند. شاخص بار آلودگی، کیفیت نامناسب باطله‌های موجود در محدوده معدن متروکه را بیان می‌کند. بنابراین باطله‌های رها شده در اطراف معدن توان آلاینده‌گی بالایی دارند.

غلظت فلزات در نمونه‌های خاک برجای منطقه متفاوت بوده و نمونه‌های در امتداد رگه معدنی و نزدیک به زون کانه‌زایی بالاترین مقادیر را برای تمام عناصر نشان می‌دهند. در بقیه نمونه‌ها با دور شدن از محدوده معدنی غلظت عناصر (به‌جز برای عنصر Cd) کاهش می‌یابد ولی در اکثر نقاط غلظت فلزات در مقایسه با متوسط خاک جهانی بالا می‌باشد که می‌تواند بیان کننده غلظت بالای این فلزات در خاک‌های منطقه باشد. یکنواخت بودن غلظت کادمیوم در تمام نمونه‌های خاک منطقه می‌تواند

خاک با فلزات هیچ رابطه معناداری نشان نمی‌دهند، این امر می‌تواند به دلیل مقادیر خیلی کم این دو پارامتر در خاک منطقه باشد.

۵- شاخص‌های ژئوشیمیایی

۶-۱. شاخص زمین‌انباشت

یکی از فاکتورهای ژئوشیمیایی مهم برای توصیف غلظت فلزات در هر منطقه، شاخص زمین‌انباشت (Geoaccumulation Index) است (Muller, 1969) که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / 1.5 \times B_n \quad (7)$$

در این رابطه، C_n غلظت عنصر مورد مطالعه در نمونه خاک یا رسوب، B_n غلظت عنصر مورد مطالعه در مقدار زمینه (متوسط شیل جهانی) و ضریب 1/5 برای حذف تأثیر سنگ‌شناسی است (Muller, 1969; Luoping et al., 2007; Seshan, 2010). مطابق جدول 6 شاخص زمین‌انباشت به هفت رده تقسیم می‌شود (Muller, 1969; Muller, 1969; Luoping et al., 2007; Nikolaidis et al., 2010). در شکل 4 متوسط شاخص زمین‌انباشت عناصر در نمونه‌های خاک برجای و خاک حاصل از باطله‌ها و در جدول رده‌بندی خاک بر اساس شاخص زمین‌انباشت نشان داده شده است.

با توجه به میانگین شاخص زمین‌انباشت، خاک حاصل از باطله‌ها نسبت به عناصر Pb, Zn, As, Cu آلودگی بی‌نهایت و نسبت به Ag آلودگی شدید تا بی‌نهایت را نشان می‌دهند. این نمونه‌ها نسبت به کادمیم بدون آلودگی می‌باشند. خاک برجای منطقه نسبت به Ag آلودگی متوسط تا شدید، نسبت به Pb آلودگی متوسط و نسبت به Zn بدون آلودگی تا آلودگی متوسط هستند. عناصر As, Cu, Cd با توجه به شاخص زمین‌انباشت در خاک برجای منطقه بدون آلودگی هستند.

۶-۲. ضریب غنی‌شدگی

ضریب غنی‌شدگی (Enrichment Factor) روش مناسبی جهت تعیین منشأ طبیعی و انسان‌زاد آلودگی است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Loska et al., 1995):

$$EF = [C_x / C_{ref}]_{Sample} / [C_x / C_{ref}]_{Background} \quad (8)$$

در رابطه فوق، EF ضریب غنی‌شدگی، C_x غلظت عنصر مورد بررسی، C_{ref} غلظت عنصر مرجع در پوسته می‌باشد. عنصر مرجع عنصری است که تغییرات اندکی در محیط داشته و غلظت آن در محیط متأثر از فعالیت‌های انسان نباشد. در این مطالعه Sc به عنوان عنصر مرجع در نظر گرفته شده است (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۰، Hernandez et al., 2003; Bergamaschi et al., 2002). متوسط غنی‌شدگی عناصر در شکل 5 و رده‌بندی خاک بر اساس ضریب غنی‌شدگی، در جدول 7 آورده شده است.

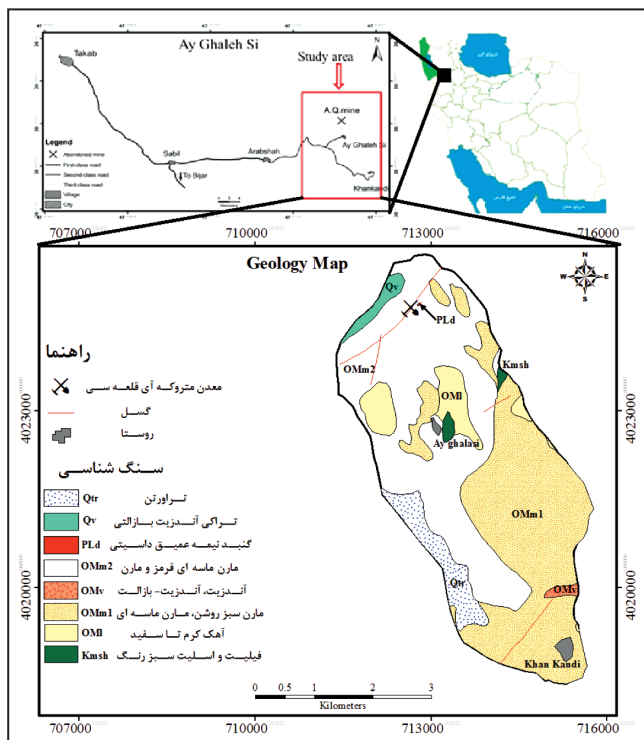
نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها نسبت به عناصر Pb, Zn, As و Ag غنی‌شدگی بی‌نهایت و نسبت به Cu غنی‌شدگی قابل توجه دارند. این نمونه‌ها نسبت به Cd در محدوده بدون غنی‌شدگی قرار می‌گیرند. نمونه‌های خاک برجای منطقه نسبت به As غنی‌شدگی بسیار بالا و نسبت به Pb, Zn و Ag غنی‌شدگی قابل توجه داشته و نسبت به Cu و Cd در محدوده بدون غنی‌شدگی تا غنی‌شدگی اندک قرار می‌گیرند.

۶-۳. ضریب آلودگی و درجه آلودگی اصلاح شده

به منظور بیان وضعیت آلودگی محیط نسبت به یک عنصر خاص، از ضریب آلودگی (Contamination Factor) و درجه آلودگی اصلاح شده (modify Contamination Degree) می‌توان استفاده نمود (Shakeri et al., 2010; Abraham & Parker., 2008). برای محاسبه ضریب آلودگی از روش Hakanson (1980) استفاده شده که مطابق با رابطه زیر است:

$$C_f = C_i / C_n \quad (9)$$

در این رابطه C_f ضریب آلودگی، C_0 غلظت فلز در نمونه مورد بررسی و C_n غلظت فلز در شیل میانگین به عنوان مرجع می‌باشد. هاکنسون ضریب آلودگی را

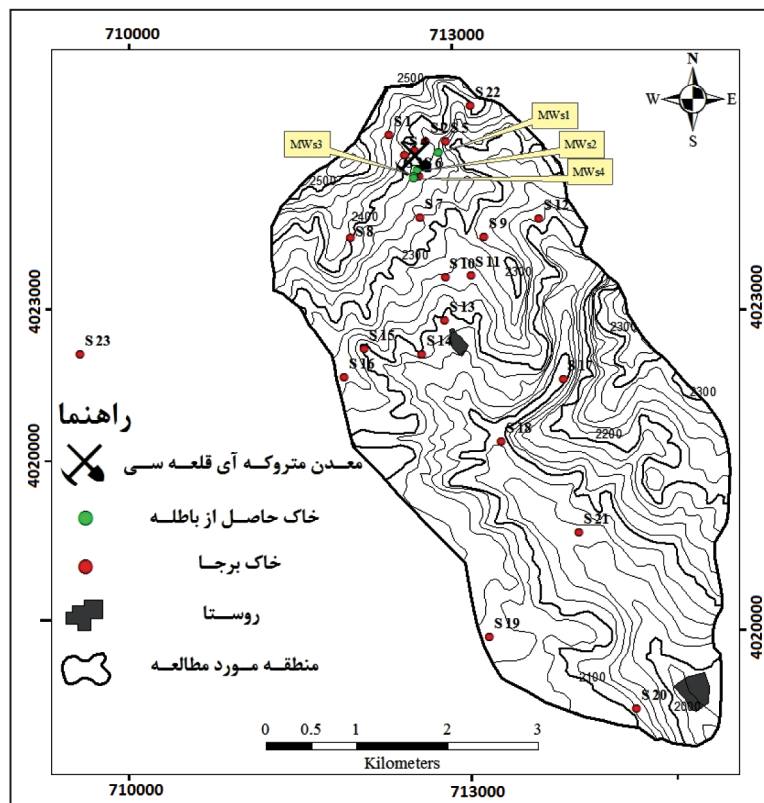


مربوط به نوع کانه‌زایی و تأثیر گذار نبودن کانه‌زایی رخ داده بر افزایش غلظت این عنصر باشد. در خاور روستای آی‌قلعه‌سی که احتمالاً آتومالی دیگر سرب و روی در منطقه است (S_{18} و S_{17}) غلظت‌های بالای Pb ، Zn ، As و Cu نسبت به متوسط خاک جهانی قابل مشاهده است. بر اساس متوسط شاخص زمین‌انباشت خاک‌های منطقه نسبت به نقره آلودگی متوسط تا شدید داشته و بر اساس متوسط ضریب غنی‌شدگی، نسبت به آرسنیک غنی‌شدگی بسیار بالا دارند. شاخص بار آلودگی نیز در بیشتر نمونه‌های خاک برجای منطقه به ویژه نمونه‌های نزدیک به محدوده معدنی کیفیت نامناسب خاک را نسبت به عناصر مورد نظر بیان می‌کند. بطور کلی نتایج نشان می‌دهند که حضور کانسار سرب- روی آی‌قلعه‌سی و معدن متروکه در منطقه تأثیر بسزایی بر نحوه پراکنش و افزایش غلظت عناصر Pb ، Zn ، As و Cu در خاک منطقه داشته و بر غلظت و توزیع کادمیم در خاک برجای منطقه تأثیر گذار نبوده است. بالا بودن ضریب آلودگی و درجه آلودگی اصلاح شده و دیگر شاخص‌های ژئوشیمیایی در منطقه در برخی از نمونه‌های خاک برای عناصر As ، Cd و Ag مقادیر زمینه بالای این عناصر را در منطقه مشخص می‌سازد.

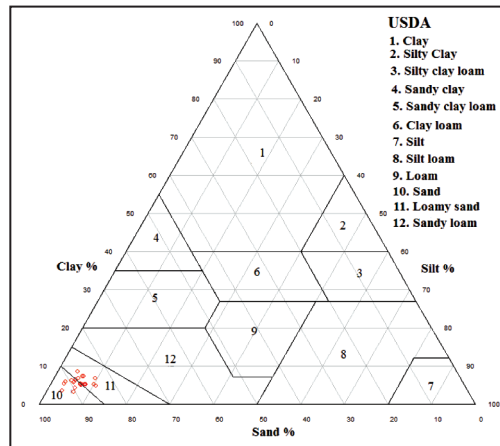
سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های مالی و همکاری‌های همه‌جانبه صورت پذیرفته از سوی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و دانشگاه صنعتی شاهرود تشکر و قدردانی نمایند.

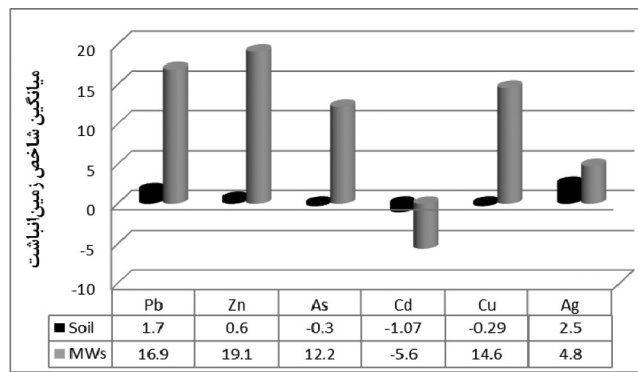
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه آی‌قلعه‌سی (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی تکاب؛ فنودی و حریری، ۱۳۷۹).



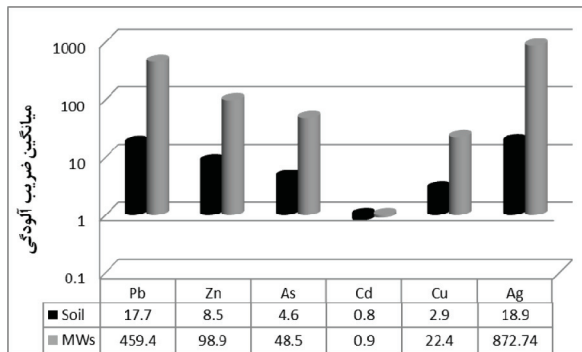
شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک حاصل از باطله‌ها و خاک برجای منطقه بر روی نقشه ۱:۵۰۰۰۰ توپوگرافی (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۳۴).



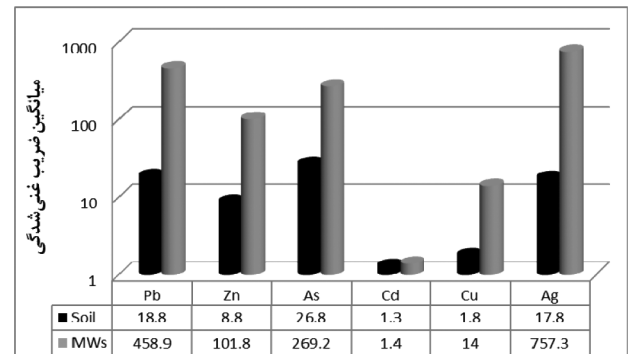
شکل ۳- رده‌بندی بافت خاک منطقه بر مبنای (USDA, 1951).



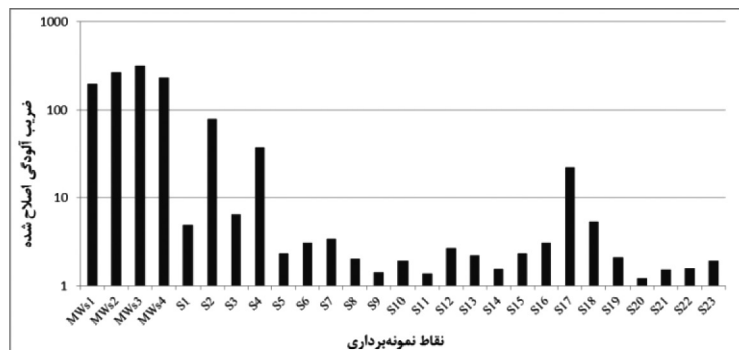
شکل ۴- میانگین شاخص زمین‌انباشت خاک حاصل از باطله‌ها و خاک برجای منطقه.



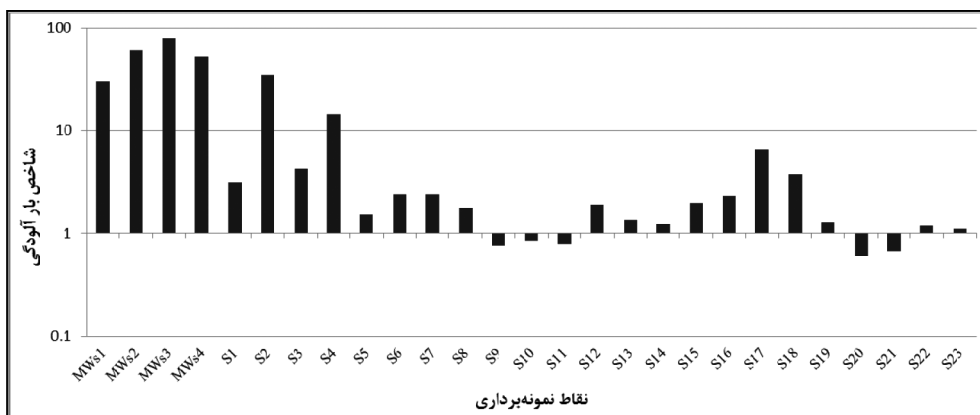
شکل ۶- متوسط ضریب آلودگی در نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها (MW_{S1}-MW_{S4}) و خاک برجای منطقه (S₁-S₂₃).



شکل ۵- میانگین ضریب غنی‌شدگی خاک حاصل از باطله‌ها و خاک برجای منطقه.



شکل ۷- درجه آلودگی اصلاح شده نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها (MW_{S1}-MW_{S4}) و خاک برجای منطقه (S₁-S₂₃).


 شکل ۸- شاخص بار آلودگی نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها (MWs₁-MWs₄) و خاک برجای منطقه (S₁-S₂₃).

جدول ۲ - مقادیر پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک باطله (MWs₁-MWs₄) و خاک برجای منطقه (S₁-S₂₃).

نمونه	pH	مواد آلی (%)	رس (%)	سیلت (%)	ماسه (%)
MWs ₁	۴/۳۷	۰/۹۵	-	-	-
MWs ₂	۴/۴	۱/۵۱	-	-	-
MWs ₃	۳/۸۹	۱/۸۶	-	-	-
MWs ₄	۴/۳۶	۱/۶۱	-	-	-
S ₁	۷/۱۶	۱/۰۵	۸/۵۲	۴/۵۸	۸۶/۹۰
S ₂	۸/۰۲	۰/۸۹	۵/۱۴	۷/۰۳	۸۷/۸۳
S ₃	۷/۷۵	۰/۷۸	۵/۰۶	۷/۲۵	۸۷/۶۹
S ₄	۷/۸۵	۰/۴۲	۵/۲۴	۶/۹۶	۸۷/۸۰
S ₅	۸/۵۴	۰/۶۴	۴/۸۹	۷/۲۱	۸۷/۹۰
S ₆	۸/۴۴	۰/۷۶	۳/۵۳	۳/۵۳	۹۲/۹۴
S ₇	۷/۷۹	۰/۸۱	۴/۲۱	۶/۱۳	۸۹/۶۶
S ₈	۷/۸۰	۰/۴۴	۳/۲۰	۶/۳۸	۹۰/۴۲
S ₉	۸/۸۰	۰/۵۹	۵/۰۲	۸/۱۲	۸۶/۸۶
S ₁₀	۶/۸۲	۰/۸۲	۷/۳۲	۶/۳۸	۸۶/۳۰
S ₁₁	۸/۴۵	۱/۲۱	۶/۴۳	۵/۲۱	۸۸/۳۶
S ₁₂	۷/۷۸	۱/۳۳	۵/۱۴	۱۰/۰۶	۸۴/۸۰
S ₁₃	۶/۳۵	۱/۰۸	۵/۱۸	۷/۹۴	۸۶/۸۸
S ₁₄	۷/۵۴	۰/۸۹	۷/۱۸	۶/۷۸	۸۶/۰۴
S ₁₅	۷/۰۰	۱/۰۲	۶/۲۷	۴/۳۹	۸۹/۳۴
S ₁₆	۶/۹۸	۱/۱۵	۵/۳۱	۳/۲۱	۹۱/۴۸
S ₁₇	۷/۶۰	۱/۰۶	۵/۷۸	۳/۲	۹۱/۰۲
S ₁₈	۷/۷۹	۱/۴۷	۵/۱۳	۸/۱۴	۸۶/۷۳
S ₁₉	۸/۱۶	۱/۲۱	۶/۶۸	۹/۵۴	۸۳/۷۸
S ₂₀	۷/۰۳	۰/۸۰	۴/۷۶	۱۰/۶۸	۸۴/۵۶
S ₂₁	۷/۴۵	۰/۶۸	۲/۷۸	۴/۲۲	۹۳/۰۰
S ₂₂	۷/۵۸	۱/۱۸	۲/۶۳	۵/۱۸	۹۲/۱۹
S ₂₃	۶/۵۱	۰/۸۶	۶/۷۰	۵/۷۸	۸۷/۵۲

جدول ۱- مشخصات محل‌های نمونه‌برداری خاک برجا (S) و خاک حاصل از باطله (MWs).

کد نمونه‌ها	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	توضیحات
S ₁	۷۱۲۴۱۸	۴۰۲۵۰۰۳	بالادست معدن متروکه
S ₂	۷۱۲۷۴۸	۴۰۲۴۹۳۲	امتداد رگه اصلی معدنی
S ₃	۷۱۲۶۵۰	۴۰۲۴۸۳۳	شمال خاور معدن متروکه
S ₄	۷۱۲۵۶۵	۴۰۲۴۷۸۴	شمال ترانشه افقی معدن متروکه
S ₅	۷۱۲۹۲۷	۴۰۲۴۹۴۵	خاک‌های پشت معدن، روبروی باطله
S ₆	۷۱۲۶۹۷	۴۰۲۴۵۵۴	روبروی رگه اصلی معدنی
S ₇	۷۱۲۷۱۶	۴۰۲۴۱۰۴	مسیر معدن تا آی‌قلعه‌سی
S ₈	۷۱۲۱۰۸	۴۰۲۳۸۶۶	۷۰۰ متری گسل اصلی
S ₉	۷۱۳۲۹۱	۴۰۲۳۹۰۲	نرسیده به آبراهه زهاب از آی‌قلعه‌سی
S ₁₀	۷۱۲۹۶۶	۴۰۲۳۴۴۹	۵۰۰ متری روستای آی‌قلعه‌سی
S ₁₁	۷۱۳۱۹۰	۴۰۲۳۴۸۱	واحد آهکی نزدیک آی‌قلعه‌سی
S ₁₂	۷۱۳۷۷۸	۴۰۲۴۱۲۱	آبراهه نرسیده به آبراهه شاهد
S ₁₃	۷۱۲۹۷۱	۴۰۲۲۹۷۷	نزدیک جاده روستای آی‌قلعه‌سی
S ₁₄	۷۱۲۷۶۹	۴۰۲۲۵۹۸	غرب روستای آی‌قلعه‌سی
S ₁₅	۷۱۲۲۶۰	۴۰۲۲۶۴۸	واحد آهکی غرب آی‌قلعه‌سی
S ₁₆	۷۱۲۰۸۴	۴۰۲۲۳۳۴	یک کیلومتری غرب آی‌قلعه‌سی
S ₁₇	۷۱۴۰۳۹	۴۰۲۲۳۵۲	مسیر آبراهه اصلی خاور آی‌قلعه‌سی
S ₁₈	۷۱۳۵۰۸	۴۰۲۱۶۵۷	جنوب روستای آی‌قلعه‌سی
S ₁₉	۷۱۳۴۵۲	۴۰۱۹۵۰۹	واحد تراورتنی مسیر روستای خان‌کندی
S ₂₀	۷۱۴۷۸۴	۴۰۱۸۷۵۶	غرب روستای خان‌کندی
S ₂₁	۷۱۴۲۲۱	۴۰۲۰۶۷۸	۲ کیلومتری شمال روستای خان‌کندی
S ₂₂	۷۱۰۲۵۸	۴۰۲۲۰۱۴	نمونه شاهد شمال خاور معدن
S ₂₃	۷۰۹۷۲۴	۴۰۲۲۵۲۵	نمونه شاهد غرب روستای آی‌قلعه‌سی
MWs ₁	۷۱۲۸۶۱	۴۰۲۴۸۱۷	خاک باطله پشت معدن
MWs ₂	۷۱۲۶۸۳	۴۰۲۴۶۱۹	خاک باطله روبروی رگه اصلی
MWs ₃	۷۱۲۶۵۲	۴۰۲۴۵۵۰	خاک باطله کنار رگه اصلی
MWs ₄	۷۱۲۶۵۴	۴۰۲۴۵۳۱	خاک باطله کنار رگه اصلی

جدول ۳- غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک حاصل از باطله‌ها (MWS₁-MWS₄) و خاک برجا (S₁-S₂₃) بر حسب mg/kg.

نمونه	Pb	Zn	As	Cd	Cu	Ag
MWS ₁	۶۴۰۴/۷	۴۲۳۱/۹	۲۰۹/۲	۰/۱	۲۷۲/۰	۵۶/۲
MWS ₂	۱۰۲۳۰/۰	۱۰۴۱۶/۹	۵۱۵/۱	۰/۲	۱۲۷۷/۹	۶۲/۵
MWS ₃	۱۰۰۱۴	۱۱۱۵۴/۴	۱۰۳۷/۰	۰/۳	۱۷۳۱/۲	۷۹/۷
MWS ₄	۱۰۱۰۰	۱۱۷۶۶/۰	۷۶۲/۱	۰/۱	۷۴۲/۵	۴۶/۰
S ₁	۱۴۴/۰	۴۵۴/۸	۲۳/۱	۰/۲	۵۴/۹	۰/۹
S ₂	۲۹۱۴/۹	۱۱۱۴۰/۹	۴۸۱/۹	۰/۱	۱۵۱۶/۲	۹/۷
S ₃	۳۳۰/۹	۶۹۶/۰	۳۴/۹	۰/۲	۹۰/۱	۰/۷
S ₄	۲۱۹۶/۵	۲۱۴۷/۸	۹۶/۳	۰/۲	۳۱۷/۳	۵/۳
S ₅	۵۱/۸	۱۴۰/۶	۹/۱	۰/۲	۳۲/۹	۰/۵
S ₆	۱۰۶/۲	۲۵۱/۴	۴۰/۷	۰/۱	۵۱/۵	۰/۴
S ₇	۵۴/۰	۱۵۸/۶	۱۲۹/۲	۰/۲	۴۲/۳	۰/۳
S ₈	۴۷/۵	۱۴۴/۴	۲۵/۷	۰/۲	۶۴/۱	۰/۳
S ₉	۱۲/۸	۳۲/۰	۷/۷	۰/۲	۱۱/۳	۰/۴
S ₁₀	۵۶/۳	۱۱۷/۵	۰/۵	۰/۱	۴۵/۸	۰/۴
S ₁₁	۲۵/۱	۴۶/۱	۲/۴	۰/۱	۳۲/۲	۰/۴
S ₁₂	۲۹/۷	۱۴۷/۹	۲۵/۰	۰/۲	۵۵/۹	۰/۶
S ₁₃	۲۷/۲	۶۳/۲	۱۳/۷	۰/۲	۳۵/۱	۰/۶
S ₁₄	۴۰/۸	۱۷۹/۵	۴/۹	۰/۲	۴۱/۹	۰/۲
S ₁₅	۵۸/۱	۱۶۳/۷	۱۵/۹	۰/۳	۶۸/۴	۰/۴
S ₁₆	۹۹/۳	۲۹۳/۰	۵۰/۸	۰/۱	۴۱/۱	۰/۳
S ₁₇	۸۹۹/۴	۱۶۴/۰	۱۷۳/۱	۰/۱	۷۱/۷	۴/۹
S ₁₈	۱۵۶/۰	۱۹۰/۳	۱۲۰/۴	۰/۲	۱۲۲/۷	۰/۷
S ₁₉	۹۵/۱	۱۶۵/۴	۶/۰	۰/۱	۲۲/۳	۰/۳
S ₂₀	۵۱/۶	۱۵۳/۸	۰/۵	۰/۱	۲۳/۸	۰/۲
S ₂₁	۳۱/۲	۱۴۵/۰	۰/۵	۰/۱	۲۸/۳	۰/۴
S ₂₂	۲۷/۰	۸۶/۳	۱۸/۷	۰/۱	۳۳/۴	۰/۳
S ₂₃	۱۹/۵	۴۷/۳	۳۰/۵	۰/۱	۱۹/۸	۰/۵

جدول ۴- حداکثر مقدار مجاز عناصر در خاک هلند و تعدادی از استانداردهای خاک (بر حسب mg/kg).

عناصر	هلند ^a (۲۰۰۳) مقادیر نرمال	میانگین خاک جهانی ^b	میانگین پوسته‌ای ^b	میانگین شیل ^c
Pb	۸۵	۲۷	۱۵	۲۰
Zn	۱۴۰	۷۰	۷۰	۹۵
As	۲۹	۶/۸۳	۱/۸	۱۳
Cd	۰/۸	۰/۴۱	۰/۱	۰/۲۲
Cu	۳۶	۳۸/۹	۵۵	۴۵
Ag	-	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۷

a) VROM (2003) b) Kabata-Pendias (2011) c) Turekian and Wedepohl (1961)

جدول ۵- ماتریس همبستگی فلزات سنگین Pb، Zn، As، Cd، Cu و Ag و پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک.

	Pb	Zn	As	Cd	Cu	Ag	pH	OM	Clay	Silt	Sand
Pb	۱										
Zn	۰/۸۸۳**	۱									
As	۰/۶۰۱**	۰/۵۱۰**	۱								
Cd	۰/۰۹۰	۰/۰۸۲	۰/۵۳۳**	۱							
Cu	۰/۸۶۱**	۰/۹۰۵**	۰/۶۱۴**	۰/۱۸۸**	۱						
Ag	۰/۸۵۳**	۰/۷۰۲**	۰/۶۲۶**	۰/۱۹۸	۰/۷۹۹**	۱					
pH	۰/۱۴۳	۰/۱۲۳	۰/۱۶۲	۰/۱۶۶	۰/۰۹۶	۰/۱۲۳	۱				
OM	-۰/۱۳۴	-۰/۱۷۹	۰/۰۷۷	-۰/۱۲۵	-۰/۰۵۱	-۰/۰۹۶	-۰/۲۲۴	۱			
Clay	۰/۲۲۶	۰/۱۰۱	۰/۱۷۷	۰/۱۵۴	۰/۰۵۰	۰/۱۰۴	-۰/۲۱۷	۰/۳۷۳	۱		
Silt	۰/۰۵۸	۰/۰۳۰	۰/۱۶۱	۰/۳۶۹	۰/۱۱۶	۰/۱۷۳	-۰/۰۴۵	۰/۰۷۱	۰/۲۲۲	۱	
Sand	-۰/۱۵۲	-۰/۰۰۵	-۰/۱۳۲	-۰/۲۳۹	-۰/۰۳۷	-۰/۰۷۸	۰/۰۹۸	-۰/۳۶۶	-۰/۹۰۸**	-۰/۴۴۶*	۱

*ارتباط معنی‌داری در سطح ۱ درصد *ارتباط معنی‌داری در سطح ۵ درصد

جدول ۶ - شاخص زمین انباشت بر اساس (Muller, 1969).

گروه	محدوده I_{geo}	شدت آلودگی
۰	$0 > I_{geo}$	بدون آلودگی
۱	$1 < I_{geo} < 0$	بدون آلودگی تا آلودگی متوسط
۲	$2 < I_{geo} < 1$	آلودگی متوسط
۳	$3 < I_{geo} < 2$	آلودگی متوسط تا شدید
۴	$4 < I_{geo} < 3$	آلودگی شدید
۵	$5 < I_{geo} < 4$	آلودگی شدید تا بی نهایت
۶	$5 < I_{geo}$	آلودگی بی نهایت

جدول ۷ - رده بندی مقادیر ضریب غنی شدگی (Sutherland, 2000).

EF	شدت غنی شدگی
$EF < 2$	بدون غنی شدگی تا غنی شدگی اندک
$EF = 2 - 5$	غنی شدگی متوسط
$5EF = - 20$	غنی شدگی قابل توجه
$20EF = - 40$	غنی شدگی بسیار بالا
$EF > 40$	غنی شدگی بینهایت

جدول ۸ - رده بندی درجه آلودگی اصلاح شده (Abraham and Parker., 2008).

mC_d	درجه آلودگی
$1/5 > mCd$	بدون آلودگی تا آلودگی کم
$1/ < mCd < 5/2$	درجه آلودگی کم
$< mCd < 2/4$	درجه آلودگی متوسط
$< mCd < 4/8$	درجه آلودگی بالا
$< mCd < 8/16$	درجه آلودگی خیلی بالا
$< mCd < 16/32$	درجه آلودگی بشدت بالا
$32 < mCd$	درجه آلودگی بی نهایت

کتابنگاری

- آفانباتی، س. ع.، ۱۳۸۳ - زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۳۴ - نقشه توپوگرافی عربشاه ۱:۵۰۰۰۰ (۲۱۶۱).
- شرکت معدنکاران انگوران، ۱۳۹۱ - آنالیز سه نمونه مختلف کانسنگ معدن سرب و روی آی قلعہ سی، آزمایشگاه شرکت معدنکاران انگوران.
- شیرخانی، م.، ۱۳۸۶ - کانی شناسی، ژئوشیمی و ژئزکانه زایی روی - سرب و عناصر همراه در کانسار آی قلعہ سی، جنوب خاوری تکاب، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۶۱.
- صالحی، ط. قادری، م. و رشیدنژاد عمران، ن. ا.، ۱۳۸۹ - کانی شناسی و ژئوشیمی عناصر نادر خاکی در کانسار روی - سرب - مس (نقره) گمیش تپه، جنوب غرب زنجان، مجله زمین شناسی اقتصادی، شماره ۲، جلد ۲، ص. ۲۳۵-۲۵۴.
- عزیزی، پ.، ۱۳۸۶ - گزارش فعالیت های اکتشافی محدوده آی قلعہ سی، شرکت معدنکاران انگوران، ۱۲۲.
- فنودی، م. و حریری، ع.، ۱۳۷۹ - نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تکاب، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- قربانی، م.، ۱۳۸۱ - دیباچه ای بر زمین شناسی اقتصادی ایران، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پایگاه ملی داده های علوم زمین کشور، تهران، ص. ۶۵۹.
- مهرابی، ب.، مهربانی، ش.، رفیعی، ب.، یعقوبی، ب. و دانشور، ن.، ۱۳۹۰ - بررسی غلظت فلزات سنگین (Cr و Cu, Pb, Zn, Ni) در خاک های محدوده معدن انگوران، سی امین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵ - دیباچه ای بر زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- وهابزاده کبری، ق.، براتی، م.، عشقی ملایری، ب. و میرغفاری، ن. ا.، ۱۳۸۴ - اثرات زیست محیطی فرایندهای استخراج و فراوری معدن سرب و روی آهنگران، پژوهشنامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر، شماره سوم، ص ۵۲-۶۳.

References

- Abraham, G. M. S., 2005- Holocene sediments of Tamaki Estuary: Characterisation and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand, Ph.D. thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 361 pp.
- Abraham, G. M. S. & Parker, R. J., 2008- Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand, Environ Monit Assess 136, 227- 238.

- Ashley, P. M., Lottermoser, B. G., Collins A. J. & Grant C. D., 2004- Environmental geochemistry of the derelict Webbs Consols mine, New South Wales, Australia, *Environmental geology* 46, 591-604.
- Bergamaschi, L., Rizzio, E., Valcuvia, M. G., Verza, G., Profumo, A. & Gallorini, M, 2002- Determination of trace elements and evaluation of their enrichment factors in Himalayan lichens, *Environmental Pollution* 120, 137-144.
- Bradl, H. B., 2005- Heavy elements in environment, Elsevier Ltd, 283 pp.
- Detra, D. E., 1977- Delineation of an anomalous lead- zinc in the Philip Smith Mountain A-2 quadrangle, Alaska, Report U. S. Geological Survey.
- Habes, G. & Nigem, Y., 2006- Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan. *Chemosphere* 65, 2114–2121.
- Hakanson, L., 1980- An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach, *Water Research*, 14, 8, 975-1001.
- Hernandez, L., Probst, A., Probst, J. L. & Ulrich, E., 2003- Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *The Science of the Total Environment* 312, 195–219.
- Hooda, P. S., 2010- Trace elements in soil, Blackwell Publishing Ltd, London, 618 pp.
- Ikenaka, Y., Nakayama, S. M. M., Muzandu, K., Choongo, K., Teraoka, H., Mizuno, N. & Ishizuka, M., 2010- Heavy metal contamination of soil and sediment in Zambia, *Africa Journal of Environmental Science and Technology* 4, 11, 729-739.
- Johnson, M. S., Cook, J. A. & Stevenson, J. K. W., 1994- Revegetation of metalliferous wastes and land after metal mining. In: R. E. Hester and R. M. Harrison, Editors, *Mining and its Environmental Impact, Issues in Environmental Science and Technology*, Royal Society of Chemistry, London, 31-48.
- Kabata-Pendias, A., 2011- Trace elements in soils and plants, CRC Press Taylor & Francis Group, 534.
- Keskin, T. & Toptaş, E., 2012- Heavy metal pollution in the surrounding ore deposits and mining activity: a case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) *Environ Earth Science* 67, 859-866.
- Lee, Ch. H., 2003- Assessment of contamination load on water, soil and sediment affected by the Kongjujeil mine drainage, Republic o Korea, *Environmental Geology* 44, 501-515.
- Loska, K., Chebual, J., Pleczar, J., Wiechla, D. & Kwapulinski, J., 1995- Use of environment and contamination factors togheder with geoaccumulation indexes to elevate the content of Cd, Cu and Ni in the Rybink water reservoir in Poland, *Water, Air and Soil pollution*, 93, 347-365.
- Luoping Zhang, X, Y., Huan Feng, Y, J., Tong Ouyang, X, Y., Rongyuan Liang, C, G. & Weiqi, C., 2007- Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China, *Marine Pollution Bulletin* 54, 974–982.
- Muller, G. 1969- Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2, 108–118.
- Nganje, T. N., Adamu, C. I. & Ukpong, E. E., 2010- Heavy metal concentrations in soils and plants in the vicinity of Arufu lead- zinc mine, middle benue Trough, Nigeria 29, 167-174.
- Nikolaidis, Ch., Zafiriadis, I., Mathioudakis, V. & Constantinidis, Th., 2010- Heavy metal pollution Associated with an abandoned Lead-Zinc mine in the Kirki Region, NE Greece, *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 85, 3, 307-312.
- Ruiz, E., Azcarate, J. A., Rodriguez, L. & Rincon, J., 2009- Assessment of metal availability in soil from a Pb- Zn Mine site of south-Central Spain, *Soil and Sediment Contamination* 18, 619-641.
- Seshan, B, R, R., Natesan, U. & Deepthi, K., 2010- Geochemical and statistical approach for evaluation of heavy metal pollution in core sediments in southeast coast of India. *Int. J. Environ. Sci. Tech* 7, 291-306.
- Shakeri, A., Moor, F. & Razikordmahalleh, L., 2010- Distribution of soil heavy metal contamination around industrial complex zone, Shiraz, Iran, 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia.
- Soil Science Society of America., 1997- Glossary of soil science terms. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, WI.
- Srivastava, V., 2011- Structural control of lead and zinc mineralisation in a part of Tons river valley, Uttarakhand- Himachal lesser Himalaya, *Journal of Scientific Research* 55, 1-10.
- Stocklin, G., 1968- Structural history and tectonic of Iran: A review, *Amer. Assoc. Petrol. Geologists Bull.*, K 52, 7, 1229-1258.
- Thomilson, D. C., Wilson, D. J., Harris, C. R. & Jeffrey, D. W., 1980- Problem in heavy metals in estuaries and the formation of pollution index. *Helgol. Wiss. Meeresunlter* 33(1–4), 566–575.
- Turekian, K. K. & Wedepohl, K. H, 1961- Distribution of elements in some major units of the earths crust, *Geol. Soc. Of American Bull* 72, 175-192.
- USDA (U. S. Dept. of Agriculture), 1951- Soil Conservation Service. Soil Survey Staff., *Soil Survey Manual*. U.S. Dept. of Agric. Handb. 18. U.S. Govt. Print. Off. Washington, DC. P. 503 , illus.
- VROM., 2003- ANNEX A: target values, soil remediation intervention values and indicative levels for serious contamination. Nether land ministry of housing, spatial planning and the environment.