

منشأیابی برخی فلزهای سنگین در خاک‌های اطراف نیروگاه همدان با رویکرد پدولوژی

شیوا نصرتی پور^۱ - محسن نائل^{۲*} - محسن شکل آبادی^۳ - علی اصغر سپاهی گرو^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۹

چکیده

به منظور تعیین منشأ فلزهای سنگین، تأثیر عوامل مواد مادری، نحوه پیدایش خاک، و فعالیت‌های انسانی بر مقدار و توزیع فلزهای منتخب در زمین‌های اطراف نیروگاه شهید مفتح در استان همدان بررسی شد. سنگ مادر و مواد مادری انتقال یافته مختلف شامل شیل، شیست، سنگ آهک، آبرفت دامنه‌ای، پادگانه‌ای آبرفت رودخانه‌ای و آبرفت بادبزی شکل شناسایی و نحوه تشکیل خاک در آن‌ها بررسی شد. غلظت کل فلزهای Ni, Mn, Cu, Cd, Zn و Fe در افق‌های پدوژنیک و مواد مادری تعیین و غلظت آنها در چهار بخش شیمیایی، شامل بخش قابل استخراج با اسید استیک، بخش قابل احیا، بخش قابل اکسید و بخش باقیمانده، به روش عصاره‌گیری متوالی چهار مرحله‌ای اندازه‌گیری شد. درجه تحول خاک‌های منطقه اندک است، به طوری که در بسیاری موارد شباهت زیادی بین خاک‌ها و مواد مادری از نظر مقدار فلزهای سنگین مشاهده می‌شود. خاک‌های آهکی و سنگ‌های آهکی نسبت به سایر خاک‌ها و سنگ‌ها دارای کمترین مقادیر فلزهای مس، منگنز، نیکل، روی، سرب و آهن هستند. مستقل از نوع خاک و مواد مادری، بیشترین مقدار فلزهای سنگین، به استثنای منگنز، در بخش باقیمانده اندازه‌گیری شد. غلظت منگنز، در همه خاک‌ها، در بخش قابل احیا بیشتر است. توسعه کم خاک‌ها و نیز حضور بیشتر فلزها در بخش باقیمانده، نشان‌دهنده تأثیر بیشتر ماده مادری در کنترل غلظت فلزها است؛ سهم فرایندهای خاکسازي در مرتبه دوم می‌باشد. سهم فعالیت‌های انسانی در غلظت بیشتر فلزها نامحسوس است؛ با این وجود، حضور قابل توجه سرب و، در مواردی، کادمیوم در بخش قابل استخراج با اسید استیک، بیانگر تأثیر فعالیت‌های انسانی بر غلظت این دو فلز است.

واژه‌های کلیدی: فلزهای سنگین، مواد مادری، بخش‌بندی شیمیایی، تحول خاک، آلودگی، نیروگاه

مقدمه

وضعیت فلزهای سنگین در نتیجه فرایندهای پدوژنیک و انسانی حاکم بر شرایط خاک، متفاوت خواهد شد (۱۲). بسیاری از پژوهش‌ها ضرورت اندازه‌گیری سطوح اولیه (زمینه) فلزهای سنگین را برای تعیین غلظت به ارث رسیده فلزهای سنگین از مواد مادری و نیز تعیین آن بخشی از این فلزها که از منابع انسانی وارد محیط خاک می‌شوند را نشان می‌دهند (۲۸). مقدار و توزیع شیمیایی فلزهای سنگین به طور مشخص وابسته به فرایندهای خاکسازي می‌باشد. تخریب کانی‌های موجود در سنگ‌های مادری از طریق واکنش‌های هیدرولیز، آبگیری، انحلال، اکسیداسیون و احیا، جذب شدن و آزاد شدن کاتیون‌های تبدلی و غیره انجام می‌گیرد. افزون بر آن، تفاوت‌های موجود در درجه پایداری کانی‌ها به هوازگی، و به تبع آن اندازه ذرات، بر شدت تخریب مؤثر هستند. از طرفی، بودن مواد آلی و گیاه در خاک سبب انجام هوازگی بیوشیمیایی می‌گردد؛ این واکنش‌ها در کنار تخریب معدنی، بر شدت رهاسازی فلزها از مواد مادری می‌افزایند (۱). تحقیقات انجام شده نشان داد که الگوهای توزیع فلزهای سنگین در خاک طبیعی، به‌طور اولیه توسط سنگ‌شناسی مواد مادری و بطور

فلزهای سنگین، اجزاء شیمیایی سازنده خاک هستند که از نظر کمی، مقدار ناچیزی را در خاک شامل می‌شوند. اما بسیاری از آن‌ها، از نظر تغذیه گیاه (حاصلخیزی خاک) ضروری می‌باشند. اولین بررسی‌ها در این زمینه مربوط به پژوهشگران علاقه‌مند به بحث تغذیه گیاه می‌باشد (۱۰). در خاک، عامل‌های مختلفی توزیع و غلظت فلزهای سنگین را کنترل می‌کنند. این عوامل را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: عامل وراثتی (ژئوژنیک) و عامل‌های غیر وراثتی (آنتروپوژنیک). این عوامل منجر به غنی شدن یا تهی شدن فلزهای سنگین در خاک می‌شوند. در آغاز، ترکیب فلزهای سنگین در خاک‌ها، از مواد مادری آن خاک به ارث می‌رسد، اما با گذشت زمان،

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و استادیاران گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

* - نویسنده مسئول: (Email: m.nael@basu.ac.ir)

۴ - استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

خورده و به سهولت قادر به جدا شدن نمی‌باشند (۹). محققان در پی بخش‌بندی شیمیایی روی، سرب، کروم و کادمیوم گزارش کردند که زیست‌فراهمی کادمیوم بیشتر از سه فلز دیگر می‌باشد. این پژوهشگران دریافتند که بیشترین مقدار سرب، روی و کروم در بخش باقی‌مانده است، ولی کادمیوم در بخش کربناتی غالب می‌باشد (۵).

با توجه به اینکه در ایران، مطالعات انگشت‌شماری در مورد تعیین منشأ فلزهای سنگین وجود دارد و با فرض اینکه برای این منظور مطالعه مواد مادری، نحوه تشکیل خاک و بخش‌بندی شیمیایی فلزها می‌تواند مؤثر باشد، پژوهش حاضر در منطقه کبودرآهنگ استان همدان، به دلیل وجود مواد مادری متنوع و نیز وجود منابع آلوده‌کننده نقطه‌ای، انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و بازدیدهای صحرایی، منطقه کبودرآهنگ گزینش شد. مساحت منطقه ۶/۲۲۷ کیلومتر مربع و بین طول‌های جغرافیایی $28^{\circ} 22' 48''$ و $29^{\circ} 36' 24''$ و عرض‌های جغرافیایی $50^{\circ} 11' 25''$ و $51^{\circ} 21' 35''$ قرار دارد. ارتفاع نقاط بررسی شده از سطح دریا بین ۱۶۲۰ تا ۱۹۹۵ متر است. میانگین بارش و دمای سالانه منطقه به ترتیب ۳۰۰ میلی‌متر و ۱۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب زیریک و مزیک بوده و خاک‌ها بیشتر دارای واکنش‌های خنثی تا قلیایی هستند.

مواد مادری شیستی (Sch)، مواد مادری با منشأ سنگ‌آهک (Li)، مواد آبرفتی دامنه‌ای (Qa)، مواد مادری شیلی (Sh)، آبرفت‌های بادبزی شکل (Qf) و پادگانه‌ی آبرفت رودخانه‌ای (Qt) انتخاب شدند. در هر یک از این مواد مادری نیمرخ‌های متعددی بررسی شد و با توجه به مشاهده‌های مورفولوژیک صحرایی، خاکرخ‌های نماینده گزینش شدند (برای دشت آبرفتی چهار خاکرخ، برای نهشته مخروط افکنه‌ای در سطح بالا دو خاکرخ و برای سایر مواد مادری سه خاکرخ انتخاب شد). در منطقه دشت آبرفتی، نیروگاه برق شهید مفتح و کارخانه ذوب فلزها در حال فعالیت هستند که نیروگاه از سال ۱۳۷۴ و کارخانه ذوب فلز از سال ۱۳۸۲ فعالیت خود را آغاز کرده‌اند. موقعیت خاکرخ‌های Qa1 و Qa2 در نزدیکی این منابع‌های صنعتی می‌باشد.

پس از بررسی‌های مورفولوژیک صحرایی و تشریح خاکرخ‌ها (۲۶)، از افق‌های خاک و مواد مادری نمونه‌برداری شد. تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی معمول شامل درصد سنگریزه (۳۰)، توزیع اندازه ذرات (۱۰)، واکنش خاک (نسبت آب به خاک: ۵ به ۱) (۳۰)، قابلیت هدایت الکتریکی (۲۲)، کربن آلی (۳۲)، کربنات کلسیم معادل (۲۴) و ظرفیت تبادل کاتیونی (۲۳) برای افق‌های خاک به عمل آمد. از نمونه‌های سنگ آهک و شیست، مقطع‌های نازک آماده شد تا نوع

تانویه توسط فرایندهای خاکسازی کنترل می‌شوند. تخریب کانی‌های موجود در سنگ‌ها یکی از راه‌های طبیعی و مهم ورود فلزهای سنگین به سیستم خاک است، بطوریکه می‌توان غلظت فلزهای سنگین در خاک را با توجه به نوع و فراوانی کانی‌های موجود در مواد مادری پیش‌بینی کرد (۶). در خاک‌هایی که تحت تأثیر فعالیت‌های مستقیم و (یا) غیرمستقیم بشر قرار دارند، وضعیت فلزهای سنگین تحت شرایط آنتروپوژنوپدولوژیک کنترل می‌گردد. در مطالعه‌ای در یک محیط جنگلی در ایران عامل اصلی در غلظت فلزهای سنگین، مواد مادری گزارش شد و سهم فرایندهای خاکسازی در غلظت کل و توزیع دوباره فلزهای سنگین بعد از مواد مادری و در مرتبه دوم اهمیت قرار گرفت (۱۷).

برای داشتن فهم درستی از رفتار فلزهای سنگین در خاک، نباید تنها به مقدار کل فلزها در توده خاک محدود شد بلکه باید غلظت و وضعیت فلزها را در بخش‌های مختلف خاک بررسی کرد (۱۱). اندازه‌گیری غلظت کل فلزهای سنگین در خاک، آگاهی‌هایی را در مورد غنی‌شدگی احتمالی فلزها در خاک در اختیار خواهد گذاشت، اما پتانسیل تحرک و رفتار فلزها در خاک توسط شکل شیمیایی آن‌ها پیش‌بینی خواهد شد (۲۱). بخش‌بندی شیمیایی فلزهای سنگین کمک مؤثری در تعیین پتانسیل انحلال و قابلیت دسترسی این عناصر بازی می‌کند (۱۳). فرایندهای خاکسازی بر مقدار کل و بخش‌بندی بیشتر فلزها تأثیر دارند. با این وجود در خاک‌های جوان، نقش فرایندهای خاکسازی در غلظت کل و توزیع مجدد فلزهای سنگین در مرتبه دوم اهمیت قرار دارد. نتایج مربوط به عصاره‌گیری متوالی در خاک‌های منطقه سیسلی ایتالیا نشان داد که فلزهای سنگین به طور عمده در بخش باقی‌مانده هستند؛ که این بخش شامل ساختمان سیلیکات‌ها و یا جفت‌شده در اکسیدهای آهن متبلور می‌باشد. با این حال، استثنائاتی نیز در این گزارش وجود دارد: به عنوان مثال، در خاک‌های آلفی سول و مالی سول با مواد مادری آهکی، کادمیوم و منگنز در بخش اکسیدهای آهن و منگنز بی‌شکل، به ترتیب ۷۰-۵۵ درصد و ۴۰-۷۰ درصد از مقدار کل آن‌ها را در برمی‌گیرد. هم‌چنین مقدار زیادی از فلزهای مس، نیکل، سرب و روی نیز در این بخش مشاهده شد، اما نه به اندازه آنچه که در مورد کادمیوم و منگنز دیده شد. این نتایج دلالت دارند بر اینکه اکسیدهای منگنز می‌توانند به عنوان مخزنی از فلزهای سنگین به شمار آیند. در این پژوهش، همبستگی‌های مختلفی بین ترکیب‌های مختلف خاک و فلزهای مشخصی گزارش شد. به عنوان مثال کادمیوم، مس و روی میل ترکیبی زیادی برای پیوند با مواد آلی دارند و در مواد آلی غنی می‌شوند. کروم نیز فلزی است که تمایل خود را به رس‌ها و اکسیدهای آهن نشان می‌دهد (۱۹). محققان گزارش کردند که سه فلز مس، روی و سرب تمایل زیادی به پیوند با بخش باقیمانده دارند، بطوریکه این فلزها با قدرت زیادی به شبکه کریستالی کانی‌ها پیوند

شده بر روی این مواد مادری می‌باشد.

میانگین مقدار سنگریزه در کل نمونه‌ها و مستقل از نوع ماده مادری ۹/۳ درصد می‌باشد. در خاک‌های بررسی شده، مقدار سنگریزه بیشتر تحت تأثیر نوع ماده مادری و درجه تحول خاک‌ها می‌باشد. مقدار سنگریزه در آبرفت دامنه‌ای نسبت به سایر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری نشان داد و میان سایر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری دیده نشد، با این وجود، بیشترین مقدار سنگریزه در خاک‌های شیلی مشاهده شد. چرا که کلیه خاک‌های بررسی شده در این ماده مادری، در واحد کوهستان بوده و خاک‌ها کم عمق و با تحول کم می‌باشند. همچنین، در مراحل اولیه تشکیل خاک از سنگ‌های شیلی، تخریب فیزیکی زیادتر بوده و بنابراین مقدار ذرات درشت در این خاک‌ها بیشتر خواهد بود. در کلیه نمونه‌ها دامنه تغییرات مقدار شن از ۱/۵ تا ۷۴/۶ درصد می‌باشد. وجود ناخالصی‌های شن در سنگ آهک، و آزادسازی ذرات شن در مراحل اولیه تخریب و تکامل خاک میزان بالای شن را در این خاک‌ها توجیه می‌کند (جدول ۲). رسی‌ترین خاک‌ها مربوط به آبرفت دامنه‌ای با میانگین ۲۹/۶ درصد رس است. دامنه تغییرات سیلت و رس در کلیه نمونه‌ها به ترتیب ۱۸/۸ تا ۶۹/۶ درصد و ۲/۹ تا ۴۲/۳ درصد تعیین شد. میزان رس و سیلت در آبرفت دامنه‌ای با داشتن میانگین ۶۳/۵ و ۲۹/۶ درصد، بیشترین می‌باشد. مقایسه تغییرات مقدار رس در افق‌های سطحی نسبت به افق‌های زیر سطحی، نشان‌دهنده مقدار رس کمتر در افق‌های سطحی بیشتر خاک‌های مورد بررسی می‌باشد. تشکیل درجای رس در عمق خاک و فرسایش انتخابی ذرات رس از سطح خاک، از جمله عوامل محتمل در بروز این تفاوت‌ها می‌باشد. بیشترین مقدار کربن آلی در خاک‌های آبرفت دامنه‌ای (۰/۷۴ درصد) مشاهده شد. توالی رسوب‌گذاری، رسوبات دانه‌ریز و رس زیاد در این خاک‌ها موجب تمرکز بیشتر کربن آلی در این خاک‌ها می‌شود. کمترین مقدار کربن آلی (۰/۲۲ درصد) در خاک‌های شیلی دیده شد. در بیشتر خاک‌ها مقدار کربن آلی در افق‌های سطحی بیشتر از افق‌های زیرسطحی می‌باشد (به استثنای Sh1 و Qf2) و با افزایش عمق روند نزولی برای آن‌ها دیده شد.

از نظر آماری خاک‌های آهکی و پادگانه‌ای آبرفتی رودخانه‌ای بیشترین مقدار، و خاک‌های شیستی، شیلی و آبرفت بادبزی شکل کمترین مقدار کربنات کلسیم را دارند. مقدار شوری خاک در پادگانه‌ای آبرفتی رودخانه‌ای (۰/۷۶) و آبرفت دامنه‌ای (۰/۳۱) بیشتر از دیگر موقعیت‌هاست. مقدار پی‌اچ نیز از نظر عددی در این موقعیت‌ها (۸/۷ و ۸/۹) بالاست. بالا بودن پی‌اچ و هدایت الکتریکی در این موقعیت‌ها، می‌تواند نشان‌دهنده آبشویی کاتیون‌ها به این منطقه باشد. دامنه تغییرات pH در کل نمونه‌ها از ۸/۰۹ تا ۹/۳۳ در تغییر است (جدول ۲).

کانی‌های سازنده مواد مادری به کمک میکروسکوپ پلاریزان و به روش نیمه کمی تعیین گردد. برای بررسی کانی‌های مواد مادری دیگر (شیل، آبرفت دامنه‌ای، آبرفت بادبزی شکل و پادگانه‌ای آبرفت رودخانه‌ای) از افق C آن‌ها نمونه پودر شده آماده شد و به کمک دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) ترکیب کانی‌ها تعیین شد. غلظت کل فلزهای سنگین کادمیوم، مس، منگنز، نیکل، روی، سرب و آهن در افق‌های خاک و سنگ بستر با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل واریان ۲۰ اندازه‌گیری شد (۲۷).

شکل‌های مختلف فلزهای سنگین برای خاک‌های Sch2، Sch3، Qf1، Qa2، Li1، Sh3 و در همه افق‌ها با استفاده از روش استاندارد عصاره‌گیری متوالی چهار مرحله‌ای اصلاح شده اروپا (BCR¹) و در دو تکرار تعیین گردید (۱۵). این چهار بخش شامل: ۱- بخش تبادل و در پیوند با کربنات‌ها ۲- بخش قابل احیا، شامل اکسیدهای آهن و اکسیدهای منگنز بی‌شکل ۳- بخش قابل اکسید شدن، شامل مواد آلی و سولفیدی ۴- بخش باقیمانده شامل سیلیکات‌ها، اکسیدهای آهن متبلور و کانی‌های مقاوم است. برای سنجش کیفیت آزمایش عصاره‌گیری متوالی، غلظت کل فلز سنگین باید حدوداً با مجموع غلظت فلز در ۴ مرحله برابر باشد.

تحلیل‌های آماری مانند مقایسات میانگین و همبستگی به کمک نرم‌افزار SAS انجام شدند. مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ژئوشیمیایی خاک‌ها بر پایه نوع ماده مادری و به کمک آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های عمومی خاک‌ها

برخی از ویژگی‌های مواد مادری و خاک‌های حاصل از آن‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ خلاصه شده است. توسعه و تکامل خاک‌های پدیده آمده بر روی همه مواد مادری (شیل، شیست، سنگ آهک، آبرفت دامنه‌ای، آبرفت بادبزی شکل و پادگانه‌ای آبرفت رودخانه‌ای)، حداکثر در حد خاک‌های جوان اینسپتی‌سول صورت گرفته است. از جمله مهم‌ترین افق‌های زیرسطحی تشکیل شده در اکثر پروفیل‌ها، افق کمبیک (Bw) است که فرایند حاکم در این افق، تشکیل ساختمان خاک و هیدرولیز می‌باشد. وجود اکسیدهای آهن آزاد و تفاوت رنگ نسبت به افق‌های عمقی‌تر این نکته را تایید می‌کند. مهم‌ترین دلیل تشکیل خاک‌های با توسعه پروفیلی کم در این منطقه، نبود رطوبت کافی برای فرایند هوازدگی، به دلیل اقلیم نیمه‌خشک منطقه می‌باشد. همچنین، در بسیاری نقاط مقاومت نسبی برخی مواد مادری همچون شیل به تخریب، عامل اصلی یکنواختی خاک‌های تشکیل

غلظت کل فلزهای مورد مطالعه

غلظت کل فلزهای کادمیوم، مس، منگنز، نیکل، روی، سرب و آهن در افق‌های مختلف خاک و همچنین در سنگ بستر در منابع دیگر ارائه شده است (۲ و ۳). غلظت کل فلزهای مورد مطالعه به تفکیک مواد مادری در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول، مقایسه آماری بین خاک‌های مختلف از نظر مقدار فلزهای سنگین انجام گرفته است. با توجه به این نتایج، بیشترین مقدار فلزهای روی، مس و نیکل در خاک‌های شیلی دیده شد. حضور کانی‌های رسی (رسوبات دانه‌ریز) در این ماده مادری نشان دهنده جذب فلزهای روی،

مس و نیکل در این ماده مادری و در نتیجه افزایش غلظت آن‌ها در خاک حاصله است (جدول ۱). همچنین، بیشترین مقدار منگنز، سرب و آهن در خاک‌های آبرفت بادبزی شکل اندازه‌گیری شد. خاک‌های آهکی نسبت به سایر خاک‌ها، دارای کمترین مقادیر فلزهای کادمیوم، مس، منگنز، نیکل، روی، سرب و آهن هستند. سنگ‌های کربناته به طور عمده از کلسیت تشکیل می‌شوند و مقدار کمی از اکثر فلزهای سنگین را دارا هستند و بدین ترتیب در خاک‌های منشأ گرفته از آن‌ها نیز کمترین مقادیر فلزها مشاهده شد (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌های کلی خاک‌های بررسی شده

شکل زمین و درصد شیب	گروه بزرگ خاک	افق‌های مشخصه	خاکرخ	کانی‌شناسی سنگ بستر (%)	ماده مادری
	Typic Xerorthents	اکریک	Sch1		
تپه ۲۰-۲۵	Typic Calcixerepts	اکریک، کلسیک	Sch2	کردیریت؛ بیوتیت؛ مسکویت و کوارتز (غیر قابل اندازه‌گیری، به دلیل ریز دانه بودن)	شیست
	Typic Xerorthents	اکریک	Sch3		
کوه کم‌ارتفاع ۲۵-۳۰	Typic Xerorthents	اکریک	Li1		سنگ آهک
	Typic Xerorthents	اکریک	Li2	کلسیت (۹۵) اکسید آهن (۵)	
	Typic Xerorthents	اکریک	Li3		
دشت ۱۷	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qa1		آبرفت دامنه‌ای
	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qa2	کلسیت (۳۸)؛ کوارتز (۲۸)؛ ایلیت و میکا (۲۹)؛ کانی‌های غیر متبلور (۵)	
	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qa3		
	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qa4		
کوه کم‌ارتفاع ۲۵-۳۵	Typic Xerorthents	اکریک	Sh1		شیل
	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Sh2	کوارتز (۴۸)؛ ایلیت (۳۴)؛ آلپیت، کاتولینیت و ورمی‌کولیت (۱۸)	
	Typic Calcixerepts	اکریک، کلسیک	Sh3		
تراس بالایی ۵-۱۵	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qt1		پادگانه‌ی آبرفت رودخانه‌ای
	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qt2	کلسیت (۲۲)؛ کوارتز (۱۹)؛ مونت‌موریلونیت و ایلیت (۱۶)؛ سایر آلومینوسیلیکاتها (۴۳)؛ کانی‌های غیر متبلور (۵)	
	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qt3		
مخروط افکنه ۵-۱۵	Typic Haploxerepts	اکریک، کمبیک	Qf1	کوارتز (۳۵)؛ کلسیت (۳۱)؛ پیروکسن (۱۳)؛ ایلیت و الیونین (۲۱)؛ کانی‌های غیر متبلور (۳)	آبرفت بادبزی شکل
	Typic Xerofluvents	اکریک	Qf2		

جدول ۲- مقایسه میانگین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در کلیه خاک‌های بررسی شده (مقایسه بر پایه نوع ماده مادری)*

CEC	EC	pH	CaCO ₃	OC	رس	سیلت (%)	شن	سنگریزه	N	ماده مادری
۲۶/۰ ^a	۰/۰۷ ^b	۸/۵ ^{bc}	۱۲/۳ ^c	۰/۵۴ ^{ab}	۱۸/۶ ^b	۵۳/۰ ^b	۲۸/۴ ^b	۹/۳ ^b	۷	شیست
۱۳/۴ ^c	۰/۰۹ ^b	۸/۶ ^{bc}	۴۵/۴ ^a	۰/۵۵ ^{ab}	۶/۲ ^c	۵۰/۵ ^b	۴۳/۳ ^a	۱۴/۰ ^{ab}	۵	سنگ‌آهک
۲۳/۹ ^{ab}	۰/۳۱ ^{ab}	۸/۹ ^a	۲۷/۵ ^b	۰/۷۴ ^a	۲۹/۶ ^a	۶۳/۵ ^a	۶/۹ ^c	۰/۰ ^c	۱۲	آبرفت دامنه‌ای
۲۲/۰ ^{ab}	۰/۰۷ ^b	۸/۴ ^c	۹/۹ ^c	۰/۲۲ ^b	۱۳/۰ ^{bc}	۳۴/۹ ^c	۵۲/۱ ^a	۱۶/۵ ^a	۸	شیل
۲۰/۵ ^{ab}	۰/۰۷ ^b	۸/۵ ^{ab}	۱۰/۱ ^c	۰/۵۰ ^{ab}	۹/۰ ^c	۳۷/۳ ^c	۵۲/۹ ^a	۱۳/۲ ^{ab}	۵	آبرفت بادبزی‌شکل
۱۷/۶ ^{bc}	۰/۷۶ ^a	۸/۷ ^{bc}	۳۸/۹ ^a	۰/۶۳ ^a	۱۷/۷ ^b	۵۱/۶ ^b	۳۰/۷ ^b	۱۰/۳ ^b	۱۰	پادگانه‌ی آبرفت رودخانه‌ای

*- میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ هستند.

شکل‌های فلزهای سنگین در فاز جامد

بخش‌بندی شیمیایی فلزهای سنگین در خاک‌های مختلف، مستقل از نوع ماده مادری و افق ژنتیکی، نشان داد که غلظت کلیه فلزهای مورد مطالعه، بجز منگنز، در بخش باقیمانده بیشتر از دیگر بخش‌ها است. همچنین کمترین غلظت فلزها، بجز آهن و نیکل، در بخش قابل اکسید دیده شد. درصد بازیابی فلزهای سنگین در افق‌های خاک‌های برگزیده در مراحل مختلف عصاره‌گیری، در بیشتر موارد بین ۸۵ تا ۱۱۷ درصد تعیین شد که دقت رضایت بخشی را در اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد (جدول ۲) (۴).

کادمیوم: الگوی بخش‌بندی فلز کادمیوم در بخش‌های مختلف میان خاک‌های بررسی شده تقریباً مشابه بود. در طی بخش‌بندی فلز کادمیوم، بخش باقیمانده بیش از ۹۰ درصد از کل کادمیوم را شامل شد و تنها کمتر از ۱۰ درصد از کل کادمیوم در سه بخش دیگر توزیع شد. غلظت کادمیوم در مواد مادری شیل، شیست و سنگ آهک به ترتیب ۰/۷، ۰/۵ و ۲/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. بخش قابل اکسید کمترین سهم را در توزیع کادمیوم نشان داد و تنها در برخی از خاک‌ها در افق‌های سطحی مقدار کمی کادمیوم در این بخش مشاهده شد (شکل ۱ و جدول ۴). کادمیوم و سرب به دلیل

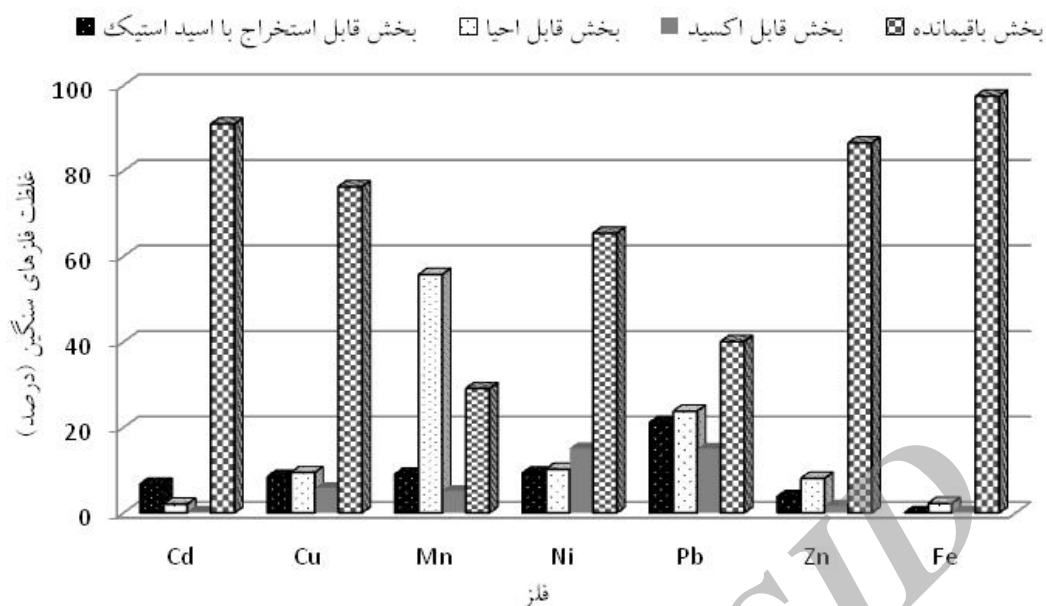
میل ترکیبی بالایشان برای مواد آلی، تمایل دارند در مواد آلی خاک غنی شوند (۱۹). نتایج شیمیایی بدست آمده، هیچ مدرکی را برای پیوند کادمیوم به مواد آلی نشان نمی‌دهد، که احتمالاً به دلیل غلظت کل پایین کادمیوم و همچنین مواد آلی کم در خاک‌های بررسی شده می‌باشد. بسیاری از بررسی‌ها به حضور غالب کادمیوم در بخش باقیمانده اشاره دارند (۱۶ و ۲۰). وجود کربنات در خاک‌های آهکی موجب غیرمتحرک شدن کادمیوم در خاک و حضور آن در بخش قابل استخراج با اسید استیک می‌شود (شکل ۱). غلظت بالای کادمیوم در افق‌های Bk خاک‌هایی که واجد این افق هستند، مانند خاک‌های Sh3، نسبت به افق سطحی و افق زیرین، به دلیل حضور کربنات بیشتر در این افق‌ها می‌باشد (جدول ۴).

مس: مس قابل استخراج در بخش باقیمانده حدود ۷۶/۳ درصد، با میانگین ۲۲/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، از مقدار کل مس را در کلیه خاک‌ها تشکیل داده است (شکل ۱). سهم بخش‌های قابل احیا، قابل اکسید و قابل استخراج با اسید استیک در غلظت کل مس به ترتیب ۹/۴، ۵/۸ و ۸/۵ درصد، اندازه‌گیری شد. غلظت مس در مواد مادری شیل، شیست و سنگ آهک به ترتیب ۳۷/۱، ۱۷/۶ و ۷/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است.

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت کل فلزهای سنگین در همه خاک‌های بررسی شده بر اساس نوع ماده مادری (mg/kg)

Fe (x10 ^{-۳})	Zn	Pb	Ni	Mn	Cu	Cd	n	ماده مادری
۳۸/۵۲ ^a	۱۳۶/۰ ^a	۳۲/۳ ^{ab}	۵۷/۷ ^a	۵۹۴/۳ ^{bc}	۳۱/۳ ^a	۱/۰۳ ^{bc}	۸	شیل
۴۲/۹۸ ^a	۹۵/۰ ^b	۲۸/۶ ^b	۵۵/۰ ^a	۱۱۶۷/۸ ^a	۲۶/۶ ^b	۱/۴۴ ^a	۷	شیست
۱۳/۷۶ ^c	۵۲/۰ ^c	۲۴/۳ ^c	۱۶/۶ ^c	۲۴۷/۷ ^d	۱۹/۰ ^d	۰/۹۶ ^c	۵	سنگ آهک
۳۷/۱۳ ^a	۷۱/۳ ^{bc}	۳۰/۸ ^b	۵۵/۳ ^a	۷۶۹/۰ ^b	۲۸/۷ ^{ab}	۱/۴۰ ^{ab}	۱۲	آبرفت دامنه‌ای
۴۴/۱۴ ^a	۶۹/۰ ^c	۳۴/۹ ^a	۴۵/۱ ^{ab}	۱۱۹۴/۳ ^a	۲۷/۸ ^b	۱/۴۰ ^{ab}	۵	آبرفت بادبزی‌شکل
۲۴/۵۸ ^b	۶۱/۱ ^c	۳۱/۲ ^{ab}	۳۱/۴ ^b	۴۲۶/۶ ^{cd}	۲۲/۰ ^c	۱/۷۷ ^a	۱۰	پادگانه‌ی آبرفت رودخانه‌ای

*- میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ هستند.



شکل ۱- میانگین غلظت فلزهای سنگین در چهار بخش شیمیایی مختلف، در خاک‌های برگزیده

قابل اکسید را می‌توان در رقابت میان کمپلکس مواد آلی- منگنز- آهن و شکل‌های اکسیدهای منگنز- آهن جستجو کرد (۲۹). کانی‌های منگن‌دار در طی فرایند هوازدگی و تحت شرایط اتمسفر زمین اکسید شده و این اکسیدهای منگنز آزاد دوباره به صورت کانی‌های ثانویه رسوب می‌کنند، در نتیجه بخش قابل احیا نسبت به دیگر بخش‌ها سهم بیشتری از فلز منگنز را در برمی‌گیرد.

نیکل: برای کلیه خاک‌ها، سهم این فلز در بخش باقیمانده ۶۵/۴ درصد، برابر با ۳۲/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، برآورد شد. توزیع نیکل در سایر بخش‌ها نیز قابل توجه است. سهم بخش‌های قابل احیا، قابل اکسید و قابل استخراج با اسید استیک به ترتیب ۱۰/۲، ۱۵/۱ و ۹/۳ درصد تعیین شد (شکل ۱). غلظت نیکل در مواد مادری شیل، شیست و سنگ آهک به ترتیب ۳۵/۵، ۳۹/۱ و ۱۰/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. اهمیت بخش باقی‌مانده در حمل‌آلوده کننده‌های فلزی بسیار زیاد است، پژوهشگران نشان دادند که در بسیاری از موارد بیشترین مقدار فلزهای سنگین، از جمله نیکل، در این بخش یافت می‌شوند (۱۳). در بسیاری از مطالعات بیشترین مقدار نیکل در بخش باقیمانده گزارش شده است (۹، ۲۰ و ۳۴). در طی هوازدگی، نیکل به سهولت متحرک می‌شود، و برخلاف منگنز و آهن دو ظرفیتی، در محلول خاک پایدار است و قادر است تا اعماق زیادی مهاجرت کند. همچنین پس از آزادسازی نیکل، این فلز به همراه اکسیدهای آهن و منگنز رسوب می‌کند (۱۲). مواد آلی نیز تمایل زیادی را برای جذب فلز نیکل از خود نشان می‌دهند. محققان در بخش‌بندی فلزهای سنگین، بخش‌های باقیمانده و قابل اکسید را

محققان دریافتند که بیشتر مس به بخش باقیمانده می‌پیوندد، بخش‌های قابل احیا، قابل اکسید و قابل استخراج با اسید استیک به ترتیب در مراتب بعدی اهمیت قرار دارند (۱۴). محققان در طی بخش‌بندی فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی ترکیه گزارش کردند، مس به طور عمده در بخش باقی‌مانده (بیش از ۶۸ درصد) حضور دارد. مس یک فلز نسبتاً غیرمتحرک است، توزیع مس در طول نیمرخ خاک تغییرات کمی را نشان می‌دهد. این پدیده به این دلیل است که برخی از کانی‌های خاک مانند هیدروکسیدهای آهن و آلومینیم، کربنات‌ها، فسفات‌ها و همچنین رس‌های سیلیکاتی برای پیوند با مس از خود تمایل زیادی را نشان می‌دهند (۹). همچنین، مس به دلیل ایجاد ترکیب‌های بسیار پایدار در خاک می‌تواند به راحتی با مواد آلی پیوند برقرار کند (۱۲).

منگنز: غلظت منگنز در بخش قابل احیا در کلیه خاک‌ها، بیشتر از بخش‌های دیگر اندازه‌گیری شد. به طوری که، ۵۵/۷ درصد معادل ۳۷۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم، از کل منگنز در این بخش یافت شد. بخش‌های باقیمانده، قابل اکسید و قابل استخراج با اسید استیک به ترتیب دارای ۲۹/۱، ۵/۱ و ۹/۰ درصد، منگنز بودند. (شکل ۱). غلظت منگنز در مواد مادری شیل، شیست و سنگ آهک به ترتیب ۳۹۰/۷، ۳۵۰/۰ و ۳۰۱/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. منگنز قابل اکسید، در افق‌های سطحی همه خاک‌ها مقادیر بیشتری را نسبت به افق‌های زیرین در برمی‌گیرد (جدول ۴). چرا که تجمع منگنز در افق‌های سطحی خاک، در نتیجه جذب توسط مواد آلی صورت می‌گیرد. با این وجود، علت پایین بودن درصد منگنز و آهن در بخش

در اغلب خاک‌ها بیشترین مقدار روی در بخش باقی‌مانده قرار دارد. اکسیدهای منگنز به دلیل دارا بودن بار منفی باعث تجمع فلزهای سنگین از جمله روی در سخت‌دانه‌های منگنز می‌شوند (۱۲). به گزارش محققان سهم بخش باقی‌مانده و سپس قابل احیا در غلظت روی بیشتر از دو بخش دیگر می‌باشد (۱۴). برطبق نتایج بررسی‌های پژوهشگران کربنات کلسیم سبب رسوب فلزهای سنگین می‌شود، بطوریکه در خاک‌های آهکی، کربنات کلسیم منجر به رسوب روی بصورت کربنات روی می‌گردد (۳۱).

آهن: بخش باقیمانده بیش از ۹۵ درصد از کل آهن را شامل شد و تنها کمتر از ۵ درصد از آهن در سه بخش دیگر دیده شد. در همه خاک‌ها، به طور میانگین ۹۷/۴ درصد از کل آهن در بخش باقیمانده، ۲/۲ درصد در بخش قابل احیا، ۰/۲ درصد در بخش اکسیدی و ۰/۴ درصد در بخش قابل استخراج با اسید استیک یافت شد (شکل ۱). غلظت فلز آهن در مواد مادری شیل، شیست و سنگ آهک به ترتیب ۴۰/۱، ۴۷/۳ و ۴/۰ گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. محققان در طی بخش‌بندی آهن، مقادیر بسیار کم این فلز را در بخش تبادل مشاهده کردند. آن‌ها دریافتند در خاک‌های آهکی به دلیل pH بالا، مقدار کمی آهن و منگنز به وسیله گیاهان جذب می‌شود. آن‌ها نشان دادند که بیشترین مقدار آهن در بخش باقیمانده است و در شبکه کریستالی کانی‌ها، با قدرت زیادی باقی مانده و در محیط آزاد نمی‌شوند (۱۸). در بسیاری از پژوهش‌ها، به حضور عمده آهن در بخش باقیمانده اشاره شده است (۲۹ و ۳۴). رفتار آهن در طی هوازدگی تا حد زیادی به شرایط Eh-pH محیط و به درجه اکسیداسیون ترکیب‌های آهن بستگی دارد. قاعده کلی حاکم بر تحرک و تثبیت این فلز آن است که آهن در شرایط اکسیدی و قلیا رسوب کرده و در شرایط احیا و اسیدی ترکیب‌های آهن حل می‌شوند. آهن آزاد شده در طی هوازدگی به سهولت به شکل‌های اکسی-هیدروکسیدی رسوب می‌کند و همچنین می‌تواند در کانی‌های دیگر به جای منیزیم و آلومینیوم قرار گرفته و با مواد آلی کمپلکس تشکیل دهد (۱۲). در همین راستا، حضور بیشتر آهن در بخش باقیمانده بیانگر غلبه شرایط اکسیدی و غیراسیدی در خاک‌های بررسی شده است. از سوی دیگر در سولوم بیشتر خاک‌ها، آهن به طور آشکاری در بخش قابل احیا نیز حضور دارد. که این امر نقش فرایند هوازدگی را در تشکیل شکل‌های اکسید آهن بی‌شکل نشان می‌دهد (جدول ۴).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بخش‌بندی فلزها، بر نقش مواد مادری بر وضعیت فلزهای سنگین به عنوان اصلی‌ترین عامل کنترل‌کننده غلظت فلزهای مورد مطالعه تأکید دارد.

برای فلز نیکل مهم دانستند (۱). مواد آلی موجود در خاک قادر است با نیکل تثبیت شده در کربنات‌ها، اکسیدها و جذب سطحی شده ترکیب شده، پیوند نه چندان قوی ایجاد کرده و بدین ترتیب بر تحرک این فلز اثر گذاشته و آن را افزایش دهد (۸).

سرب: سهم بخش باقیمانده در غلظت سرب حدود ۴۰/۱ درصد، با میانگین ۱۲/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد و سهم بخش‌های قابل احیا، قابل اکسید و قابل استخراج با اسید استیک به ترتیب ۲۳/۸، ۱۵/۰ و ۲۱/۱ درصد محاسبه شد (شکل ۱). غلظت سرب در مواد مادری شیل، شیست و سنگ آهک به ترتیب ۱۵/۰، ۱۰/۹ و ۲۳/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین شد. در همه خاک‌ها به جز Sch2 و Qf1 (نتایج Qf1، در منبع ۲ و ۳ ارائه شده است)، سهم بخش باقی‌مانده در ذخیره سرب بیشتر از بخش‌های دیگر می‌باشد، اما در دو خاک‌خ یاد شده نقش بخش قابل احیا نیز در اکثر افاق‌ها چشمگیر است (جدول ۴). غلظت زیاد آهن و بویژه منگنز در این خاک‌ها موجب تمرکز بیشتر سرب در بخش قابل احیا شده است (جدول ۴). به طور عمده، سرب با کانی‌های رسی بویژه ایلیت، اکسیدهای منگنز، هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم، و مواد آلی همراه بوده، و در برخی از خاک‌ها در ذرات کربنات کلسیم و فسفات‌ها متمرکز می‌باشد (۱۲). در میان فلزهای سنگین، سرب نامحلول‌ترین فلز می‌باشد، این پدیده نشان دهنده پیوند محکم سرب با اجزاء مختلف خاک و در نتیجه فراهمی زیستی کم این فلز می‌باشد. با این حال، غلظت نسبتاً بالای این فلز در بخش قابل استخراج با اسید استیک دیده شد (جدول ۴). با توجه به اینکه درصد قابل توجهی از سرب در بخش متحرک دیده شد، می‌توان به ورود این فلز از طریق فعالیت‌های انسانی و خطر آلودگی این خاک‌ها (بویژه افاق‌های سطحی خاک‌های Qa1 و Qa2) اشاره کرد. پژوهشگران گزارش کردند که در خاک‌های مناطق خشک، سرب بیشتر به ذرات کربنات کلسیم و فسفر متصل شده است (۲۱).

روی: سهم بخش باقیمانده در غلظت روی ۸۶/۵ درصد، با میانگین ۷۸/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. مقدار روی در بخش‌های قابل احیا، قابل اکسید و قابل استخراج با اسید استیک به ترتیب ۸، ۱/۷ و ۳/۸ درصد بدست آمد. غلظت فلز روی در مواد مادری شیل، شیست و سنگ آهک به ترتیب ۱۲۱/۱، ۷۱/۱ و ۸/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین شد. الگوی توزیع روی در بخش‌های مختلف بسیار مشابه الگوی توزیع مس بود (شکل ۱ و جدول ۴). محققان گزارش کردند که بیشترین مقدار فلز روی در کانی‌های رسی (۶۳-۲۴ درصد) و بخش‌های اکسیدهای آبدار آهن و آلومینیوم (۳۸-۱۴ درصد) یافت می‌شود، بطوریکه بخش‌های متحرک (۲۰-۱ درصد) و آلی (۲/۳-۱/۵ درصد) سهم بسیار کمتری را شامل می‌شوند (۳۵). عبارات دیگر، پیوندهایی که روی با اکسیدهای آهن و آلومینیوم برقرار می‌کند در بالا بردن سهم بخش باقی‌مانده در خاک‌ها نقش خواهد داشت. توزیع مواد و فلزهای سنگین در خاک به ویژگی‌ها و شرایط خاک بستگی دارد و

جدول ۴- غلظت بخش‌های مختلف و غلظت کل فلزهای مطالعه شده در افق‌های ژنتیکی برخی از خاک‌های برگزیده و درصد بازیابی آن‌ها. (کادمیوم، مس، منگنز، نیکل، سرب و روی (mg/kg) و آهن (g/kg))

فلز	بخش	Sh3			Sch2			Lil	
		A	Bk	C	A	Bk	C	A	CB
Cd	قابل استخراج با اسید استیک	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۵
	قابل احیا	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱
	قابل اکسید	۰	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰
	باقیمانده	۰/۹	۰/۸	۰/۹	۱/۲	۱/۰	۱/۵	۱/۱	۱/۱
	غلظت کل هضم اسیدی بازیابی (%)	۱/۱	۰/۹	۱/۱	۱/۵	۱/۲	۱/۸	۱/۱	۱/۱
Cu	قابل استخراج با اسید استیک	۲/۴۳	۳/۰۸	۲/۴۵	۱/۴۰	۲/۵۲	۲/۱۶	۲/۵۶	۲/۶۴
	قابل احیا	۴/۴۰	۲/۰۴	۳/۶۰	۲/۸۰	۲/۵۱	۳/۴۴	۳/۱۲	۲/۵۶
	قابل اکسید	۱/۵۰	۱/۲۰	۱/۲۰	۲/۷۰	۱/۷۰	۱/۳۱	۲/۳	۲/۱۵
	باقیمانده	۲۸/۸	۲۴/۰	۲۶/۵	۲۳/۵	۲۰/۵	۲۲/۰	۱۵/۵	۱۳/۴
	غلظت کل هضم اسیدی بازیابی (%)	۳۳/۷	۳۰/۱	۳۳/۵	۲۵/۹	۲۳/۰	۲۶/۲	۲۰/۳	۲۱/۰
Mn	قابل استخراج با اسید استیک	۵۶/۷	۵۵/۷	۵۶/۶	۵۹/۰	۵۱/۰	۴۵/۱	۴۹/۰	۴۱/۳
	قابل احیا	۴۱۴	۳۱۸	۳۷۰	۵۴۸	۵۱۰	۵۹۷	۱۸۰	۱۵۰
	قابل اکسید	۳۲/۸	۳۰/۴	۲۵/۲	۴۸/۷	۴۰/۸	۴۵/۲	۱۱/۱	۹/۰
	باقیمانده	۱۶۰	۱۵۴	۱۱۲	۲۳۷	۲۱۸	۲۲۵	۱۰۰	۸۰
	غلظت کل هضم اسیدی بازیابی (%)	۶۴۹	۵۲۷	۵۱۷	۹۹۳	۹۷۰	۹۸۷	۳۳۶	۳۰۵
Ni	قابل استخراج با اسید استیک	۵/۱	۵/۷	۵/۰	۴/۲	۵/۰	۳/۸	۳/۷	۲/۵
	قابل احیا	۶/۲	۶/۴	۶/۵	۳/۰	۴/۶	۷/۵	۴/۰	۳/۵
	قابل اکسید	۱۱/۹	۶/۱۱	۱۱/۲	۱۴/۵	۹/۰	۷/۰	۲/۰	۲/۳
	باقیمانده	۴۳	۳۵/۷	۳۱/۰	۳۸/۰	۲۵/۰	۳۰/۰	۱۳/۰	۱۷/۰
	غلظت کل هضم اسیدی بازیابی (%)	۶۷/۷	۵۷/۳	۵۲/۶	۵۵/۸	۳۷/۸	۴۳/۴	۱۸/۹	۲۱/۳
Pb	قابل استخراج با اسید استیک	۲/۴۳	۳/۰۸	۲/۴۵	۱/۴۰	۲/۵۲	۲/۱۶	۲/۵۶	۲/۶۴
	قابل احیا	۴/۴۰	۲/۰۴	۳/۶۰	۲/۸۰	۲/۵۱	۳/۴۴	۳/۱۲	۲/۵۶
	قابل اکسید	۱/۵۰	۱/۲۰	۱/۲۰	۲/۷۰	۱/۷۰	۱/۳۱	۲/۳	۲/۱۵
	باقیمانده	۲۸/۸	۲۴/۰	۲۶/۵	۲۳/۵	۲۰/۵	۲۲/۰	۱۵/۵	۱۳/۴
	غلظت کل هضم اسیدی بازیابی (%)	۳۳/۷	۳۰/۱	۳۳/۵	۲۵/۹	۲۳/۰	۲۶/۲	۲۰/۳	۲۱/۰
Zn	قابل استخراج با اسید استیک	۲/۷	۴/۵	۲/۹	۲/۰	۷/۵	۴/۰	۳/۴	۳/۴
	قابل احیا	۹/۰	۷/۰	۹/۱	۸/۰	۷/۰	۷/۷	۶/۲	۶/۰
	قابل اکسید	۰/۴۵	۱/۲	۱/۴	۰/۴۰	۰/۴۰	۱/۳	۳/۰	۱/۲
	باقیمانده	۱۱۴	۱۱۰	۹۳/۰	۹۹/۹	۹۴/۰	۸۲/۰	۶۲/۵	۵۲/۱
	غلظت کل هضم اسیدی بازیابی (%)	۱۰۷	۱۰۷	۱۱۶	۹۸/۰	۹۹/۰	۸۱/۳	۷۴/۹	۶۰/۵
e	قابل استخراج با اسید استیک	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۴	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱
	قابل احیا	۰/۷۳	۰/۶۴	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۶۰	۰/۵۴
	قابل اکسید	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱۴	۰/۰۴۲	۰/۰۱۰	۰/۰۱۷	۰/۰۹
	باقیمانده	۳۹/۶	۳۶/۴	۳۴/۰	۳۲/۱	۳۹/۴	۳۲/۶	۱۹/۴	۱۴/۴
	غلظت کل هضم اسیدی بازیابی (%)	۳۹/۵	۳۲/۴	۳۳/۵	۳۷/۹	۴۰/۳	۳۲/۵	۱۷/۶	۱۴/۸

اساس غلظت کل فلزها هماهنگی دارد (۲ و ۳).

نتایج بدست آمده از این پژوهش از قرار زیر می‌باشد:

- ۱- در خاک‌های بررسی شده، مواد مادری به شدت غلظت فلزهای سنگین را کنترل می‌کند. چرا که منطقه در شرایط اقلیمی نیمه خشک واقع شده و در این شرایط، فرایند هوازگی و آبشویی در خاک‌ها شدید نمی‌باشد. بنابراین، نقش ماده مادری در غلظت فلزهای

بطور کلی، در این مطالعه با توجه به تنوع بسیار کم فرایندهای خاکساز و مشارکت ناچیز فعالیت‌های انسانی در وضعیت فلزهای سنگین، نقش مواد مادری بسیار واضح‌تر دیده شد. با این وجود تأثیر فرایندهای خاکساز را بر فلز منگنز و تأثیر فعالیت‌های انسانی را بر وضعیت سرب و کادمیوم در خاک‌ها نباید نادیده گرفت. این یافته‌ها با نتایج بدست آمده از گروه‌بندی افق‌های ژنتیکی و مواد مادری بر

احیا، قابل اکسید، و باقیمانده، صرفنظر از نوع ماده مادری و درجه تحول خاکها، نشان داد که به طور عمده فراوانی آهن، کادمیوم، روی، مس، نیکل و سرب در بخش باقیمانده بیشتر از سه بخش دیگر (بخش‌های متحرک) است. در مقابل، منگنز در همه افق‌ها در سه بخش متحرک، بویژه در بخش قابل احیا توزیع شده است.

۵- غلظت بالای منگنز در بخش قابل احیا، در همه خاکرخ‌های بررسی شده را می‌توان در رفتار منگنز در خلال رها شدن از ساختار کانی‌های اولیه جستجو کرد. کانی‌های منگن‌دار در خلال تخریب و هوازگی و تحت شرایط اتمسفر زمین اکسید شده و اکسیدهای منگنز آزاد شده به صورت کانی‌های ثانویه رسوب کرده و متمرکز می‌شوند.

۶- سرب در مقایسه با سایر فلزهای بررسی شده، غلظت بالاتری را در بخش قابل استخراج با اسید استیک نشان داد. این مشاهده را می‌توان به نقش کربنات کلسیم در جذب سرب و در برخی خاکرخ‌ها به آلودگی احتمالی در منطقه، نسبت داد.

۷- در طی بخش‌بندی سرب، مس، روی و آهن، سهم قابل توجه بخش قابل احیا در توزیع این فلزها، بیانگر نقش اکسیدهای آزاد آهن و منگنز در جذب فلزهای سنگین است. سطح ویژه بالا و هم‌چنین، بار منفی اکسیدهای منگنز باعث تجمع فلزهای سنگین، به ویژه مس، روی، سرب و نیکل در اکسیدهای منگنز ثانویه می‌گردد.

سنگین در خاکها نسبت به منطقه‌های مرطوب پر رنگ‌تر است و شرایطی که در آن امکان تمایز و تفرق خاک از ماده مادری در اثر پیشرفت هوازگی باشد، چشمگیر نیست.

۲- تنوع فرایندهای خاکسازی در خاک‌های بررسی شده کم است. فرایند کربنات‌زدایی و هیدرولیز، فرایندهای غالب در این خاکهاست. فرایند کربنات‌زدایی در خاک‌های آهکی به وضوح قابل تشخیص است. بدین ترتیب شدت تحول خاک، در خاک‌های آهکی بیشتر از خاک‌های شیلی، شیستی، آبرفت بادبزی‌شکل، آبرفت امنه‌ای و پادگانه‌ای آبرفت رودخانه‌ای است.

۳- تأثیر فرایندهای خاکسازی، مانند تشکیل افق کلسیک، بر مقدار کل و بخش‌بندی بیشتر فلزهای سنگین مشخص است. این پدیده در افق Bk خاکرخ‌های Sh3 و Sch2 به چشم می‌خورد. مقدار کل بیشتر فلزها در این افق کمتر از افق‌های بالایی و پایینی خاکرخ‌ها است. این نتیجه حاصل از همبستگی منفی فلزها با کربنات کلسیم معادل است. هم‌چنین در طی بخش‌بندی فلزهای سنگین، غلظت بالاتر بیشتر فلزها (کادمیوم، مس، نیکل، سرب، آهن و روی) در بخش قابل استخراج با اسید استیک در این افق، نسبت به افق‌های بالایی و پایینی دیده شد. این پدیده را می‌توان به نقش ذرات کربنات کلسیم در جذب فلزهای سنگین نسبت داد.

۴- توزیع فلزهای سنگین در چهار بخش تبدلی و کربناتی، قابل

منابع

- ۱- وارسته خانلری ز. ۱۳۸۴. تعیین گونه‌های شیمیایی و بررسی تأثیر EDTA بر روی توزیع مجدد فلزهای سنگین در برخی از خاک‌های آلوده همدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشگاه بوعلی سینا. همدان.
- ۲- نصرتی پور ش. ۱۳۹۱. تأثیر مواد مادری، فرایندهای خاکسازی و آلودگی بر مقدار و توزیع برخی فلزهای سنگین در منطقه کبودرآهنگ، همدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشگاه بوعلی سینا. همدان.
- ۳- نصرتی پور ش.، نائل م.، شکل آبادی م. و سپاهی گرو ع. ۱۳۹۲. تأثیر مواد مادری، تحول خاک و آلودگی بر مقدار و توزیع عمقی برخی فلزهای سنگین در خاک‌های منطقه کبودرآهنگ، همدان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک گرگان. تحت داوری.
- 4- Alloway B.J. 1995. The origins of heavy metals in soils. p. 38-57. In B.J. Alloway (ed.) Heavy Metals in Soils. Johns Wiley & Sons, Inc. New York.
- 5- Banat K.M., Howari F.M., and Al-Hamada A.A. 2005. Heavy metals in urban soils of central Jordan: Should we worry about their environmental risk?. Environ. Res. 97: 258-273.
- 6- Bini C., Sartoir G., Wahsha M., and Fontana S. 2011. Background levels of trace elements and soil geochemistry at regional level in NE Italy. Journal of Geochemical Exploration, 109: 125-133.
- 7- Blaser P., Zimmermann S., Luster J., and Shotyk W. 2000. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soils. Sci. Total Environ, 249: 257-280.
- 8- Bloomfield C. 1981. The translocation of metals in soils. p. 463. In D.J. Greenland and M. H.B. Hayes (eds.) The Chemistry of soil Processes. Jhon Wiley & Sons, New York.
- 9- Davutluoglu O., Seckin I.G., Kalat G.D., Yilmaz T., and Ersu B.C. 2010. Speciation and implications of heavy metal content in surface sediments of Akyatan Lagoon-Turkey. Soil Sci, 260: 199-210.
- 10- Gee G.W. 2002. Particle-size analysis. p. 255-295. In J.H. Dane and G.G. Topp (eds.) "Methods of Soil analysis" part 4. "Physical Methods". Soils Science Society of America, Book Series No.5 SSSA, Madison, WI.
- 11- Hardy M., and Cornu S. 2006. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation. Geoderma, 133: 295-308.
- 12- Kabata-Pendias A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press and imprint of the Taylor & Francis Group Boca Raton London New York.

- 13- Lee S.S., Nagy K.L., and Fenter P. 2007. Distribution of barium and fulvic acid at the mica-solution interface using in-situ X-ray refl ectivity. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 5763–5781.
- 14- Lee M.R., Correa J.A., and Castilla J.C. 2001. An assessment of the potential use of the nematode to copepode ratio in the monitoring of metal pollution. The Chan´aral case. *Mar. Pollut. Bull*, 42 (8), 696–701.
- 15- Lopez-Sanchez J.F., Sahuquillo A., Rauret G., Lachica M., Barahona E., Gomez A., Ure A.M., Muntau H., and Quevauviller Ph. 2002. Extraction procedures for soil analysis. p. 10-27. In Ph. Quevauviller (ed.) *Methodologies for Soil and Sediment Fractionation Studies, Single and Sequential Extraction Procedures*”. The Royal Society of Chemistry, UK.
- 16- Luo W., Wang T.Y., Lu J.P., Shi Y., Zheng Y., Xing Y., and Wu G. 2007. Landscape Ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: Multivariate and geostatistical analyses of metals in soils. *Environ. Pollut*, 146: 567-576.
- 17- Nael M., Jalalian A., Khademi H., Kalbasi M., and Sotohian F. 2009. The Effect of Parent Material and Soil Genesis on the Distribution of Selected Major and Trace Elements in Forest Soils of Fuman-Masuleh Area. *Soil Sci*, 152: 157-170.
- 18- Navas A., and Lindhorfer H. 2003. Geochemical speciation of heavy metals in semiarid soils of the central Ebro Valley (Spain). *Soil Sci*, 29: 61-68.
- 19- Palumbo B., Angelone M., Bellanca A., Dazzi C., Hauser S., Neri R., and Wilson J. 2000. Influence of inheritance and pedogenesis on heavy metal distribution in soil of Sicily, Italy. *Geoderma*, 95: 247-266.
- 20- Ramirez M., Massolo S., Frache R., and Correa A.G. 2005. Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile. *Soil Sci Soc*. 50: 62-72.
- 21- Ramos L., Hernandez L.M., and Gonzalez M.G. 1994. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana national park. *J. Environ. Qual*. 23:50–57.
- 22- Roades J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. p. 417-436. In M.R Carter, and E.G Gregorich (eds.) *Methods of Soil Analysis, part: Chemical Methods*. Soils Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- 23- Rowell D.L. 1994. Measurement of the composition of soil solution. Part 7. *Soil Science: Methods and Application*. Longman Group, UK Limited, Essex, UK.
- 24- Sims J.T. 1996. Lime requirement. p. 491. In R.J Gilkes (ed.) *method of soil analysis, parts: Methods of Soil Analysis, part: Chemical Methods*. Soils Science Society of America, Madison, Wisconsin. USA.
- 25- Soil Conservation Service. 1979. *Definitions and Abbreviations for Soil Description*. Portland, Oregon.
- 26- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Survey*. 2nd ed., *Agric. Handb. No. 436*. USDA NRCS.
- 27- Sposito G., Lund L.J. and Chang A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Sci Soc. Am. J.* 46: 260–264.
- 28- Sterckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., and Proix N. 2001. Factors affecting trace element concentration in soils developed on recent marine deposits from northern France. *Applied geochemistry*, 19: 89-103.
- 29- Sundaray S.K., Nayak B.B., Lina S., and Bhattach D. 2011. Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments—A case study: Mahanadi basin, India. *Soil Sci Soc*, 186: 1837-1846.
- 30- USDA and NRCS. 1966. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Inv. Rep. No. 42, ver. 3. 0 USDA, Washington, DC.
- 31- Usman A.R.A., Kozyakov Y., and Stahr K. 2004. Dynamics of organic mineralization and the mobile fraction of heavy metals in a Calcareous soil incubated with organic wastes. *Water Air sSoil Pollut*, 158: 401-418.
- 32- Walkley A., and Black I.A. 1934. An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci*, 37: 29–38.
- 33- Wilson M.A., Burt R., and Indorante S.J. 2008. Geochemistry in the modern soil survey program. *Environ. Monit. Assess*, 139: 151–171.
- 34- Zhang X., Tian Y., Wang Q., Chen L., and Wang X. 2012. Heavy metal distribution and speciation during sludge reduction using aquatic worms. *Soil Sci*, 126: 41-47.
- 35- Zyrin N.G., Rerich J.W., and Tikhomirov F.A. 1976. Forms of zinc compounds in soils and its supply to plants. *Agrokimiya*, 5: 124-134.

The Provenance of Selected Heavy Metals in Soils near Power Plant of Hamedan: A Pedological Approach

Sh. Nosratipoor¹- M. Nael^{2*}- M. Sheklabadi³- A.A. Sepahi Garo⁴

Received:16-11-2013

Accepted:29-04-2014

Abstract

To determine the origin of heavy metals, the effects of parent materials, soil genesis, and human activities on the content and distribution of selected metals in soils near Mofateh Martyr powerhouse, Hamedan, were assessed. Six types of parent materials including shale, schist, limestone, alluvial plain, alluvial terraces and fan deposits were identified and soil genesis were studied. Total content of Cd, Cu, Mn, Ni, Zn, Pb, Fe were determined in soil horizons and parent materials. Concentration of the metals in four different chemical phases, including acetic acid extractable, reducible, oxidizable and residual fractions, was determined with four-step sequential extraction procedure. Soil development is limited in the studied region so that the discrepancy between solum and parent material in terms of heavy metal content is not great in general. Calcareous soils and limestone have the lowest amount of copper, manganese, nickel, zinc, lead and iron. Independent of soil types and parent materials, most of the heavy metals, except Mn, were present in the residual fraction. The concentration of Mn in all profiles is highest in reducible fraction. Low degree of soil development and the prevalent presence of metals in residual fraction show the influential role of parent materials in controlling metal concentration and distribution; pedogenic processes have minor effects. The role of human activities is limited for most of the selected metals; however, the tangible presence of Pb and, in some cases, Cd in acetic acid extractable fraction, reflects the impact of human activities on the concentrations of these two metals.

Keywords: Heavy metals, Parent materials, Chemical fractionation, Soil evolution, Pollution, Power plant

1 ,2,3- M.Sc. Graduated and Assistant Professors, Department of Soil Science, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Respectively

(*- Corresponding Author Email: m.nael@basu.ac.ir)

4- Professor, College of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran