فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست
سال نهم، شماره ۳۱، تابستان ۱۳۹٤

تأثیر سنگ منشاء بر ویژگی‌های ژئوشیمیایی برخی عناصر سنگین در مهم‌ترین سازندهای زمین‌شناختی در استان زنجان

علی افشاری[۱] و حسین خادمی[۲]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، رشته خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان a.afshari66@yahoo.com

۲- استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۷ تاریخ تصویب: ۹٤/۲/۱

چکیده

غلظت عناصر سنگین به طور طبیعی در خاک‌های بکر وابسته به نوع سنگ منشاء در خاک هستند و فاکتورهای خاک‌سازی و ژئوشیمیایی بر توزیع آنها تأثیر می‌گذارند. این مطالعه با هدف تعیین غلظت و توزیع ژئوشیمیایی برخی فلزات سنگین در خاک‌های حاصل از سنگ منشاء مختلف در مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناختی در استان زنجان انجام گرفت. برای این منظور تعداد ٦٧ نمونه خاک سطحی از سنگ منشاء مختلف که شامل ۱۹ نمونه خاک‌های با سنگ منشاء آذرین (خاک‌هایی با سنگ منشاء آندزیتی، بازالتی، گرانیتی و توف‌های آتش‌فشانی)، ۱۷ نمونه خاک‌های با سنگ منشاء رسوبی (خاک‌هایی با سنگ منشاء شیل و ماسه سنگ) و ۳۱ نمونه رسوبات آبرفتی بود، برداشت گردید. با توجه به نتایج، بالاترین میانگین مس (۳۸/٦)، روی (۱۹۱/۷) و سرب (۸۵/۵) در سنگ منشاء آبرفتی، کروم (۳۱/۵) و نیکل (٦٦/۰) در خاک‌هایی با سنگ منشاء شیل، منگنز در خاک‌هایی با سنگ منشاء گرانیتی (٦۷٤/٤) و آندزیتی (٦۷۳/۸) و آهن در خاک‌هایی با سنگ منشاء آندزیتی (۱۹۸۰۰) و شیل (۱۸٦۰۰) میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. غلظت کل کبالت و کادمیم در خاک‌های با سنگ منشاء مختلف تغییرات چندانی نشان نداد. جزءبندی شیمیایی فلزات نیز در خاک‌های مختلف متفاوت بود. فاکتور تحرک عناصر چنین بدست آمد: Pb(۲۹/۸)>Co(۲۵/۱)>Ni(۱۸/۵)>Cu(٦/۲)>Zn(۵/۱). بالاترین مقادیر فاکتور غنی‌شدگی عناصر سرب، روی، کادمیم و مس در سنگ منشاء آبرفتی، فاکتور غنی‌شدگی نیکل، کبالت و منگنز در خاک‌هایی با سنگ منشاء آندزیتی و فاکتور غنی‌شدگی کروم و نیکل در خاک‌هایی با سنگ منشاء شیل بدست آمد. شاخص زمین-انباشتگی عناصر نیز نتایج تقریباً مشابهی ارائه داد.

واژگان کلیدی: سنگ منشاء، عناصر سنگین، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، استان زنجان.

مقدمه

عوامل زمین‌شناختی (Geologic) و فاکتورهای خاک‌سازی (Pedologic) مهم‌ترین کنترل کننده‌های تأثیرگذار بر فراوانی، توزیع و رفتار عناصر در محیط خاک‌های طبیعی هستند. نوع کانی‌های موجود در سنگ منشاء و فرآیندهای ژئوشیمیایی و خاک‌سازی که با تأثیر بر عمل هوادیدگی و تشکیل خاک در مواد مادری صورت می‌گیرد، بر مقدار و توزیع عناصر در محیط‌های خاکی طبیعی مؤثر می‌باشد. از این رو مقدار کل عناصر در خاک‌های با شرایط خاک- زمین‌شناختی مختلف می‌تواند بسیار متفاوت باشد. تفاوت بین غلظت عناصر در سنگ منشاء نسبت به خاک‌های حاصل از آن‌ها در نتیجه اثر فرآیندهای خاک‌سازی است (Nael et al, 2009). غلظت طبیعی (لیتولوژی) عناصر سنگین عمدتاً پایین‌تر از غلظت‌های سمیت قرار دارند. اما تغییرات عناصر سنگین در جریان تشکیل خاک (Pedogenesis) و چرخه بیولوژیکی می‌تواند بر توزیع شیمیایی و زیست فراهمی فلزات تأثیر بگذارد. اندازه تأثیرات پدوژنیکی بر الگوی توزیع متفاوت عناصر سنگین بر اساس غالبیت

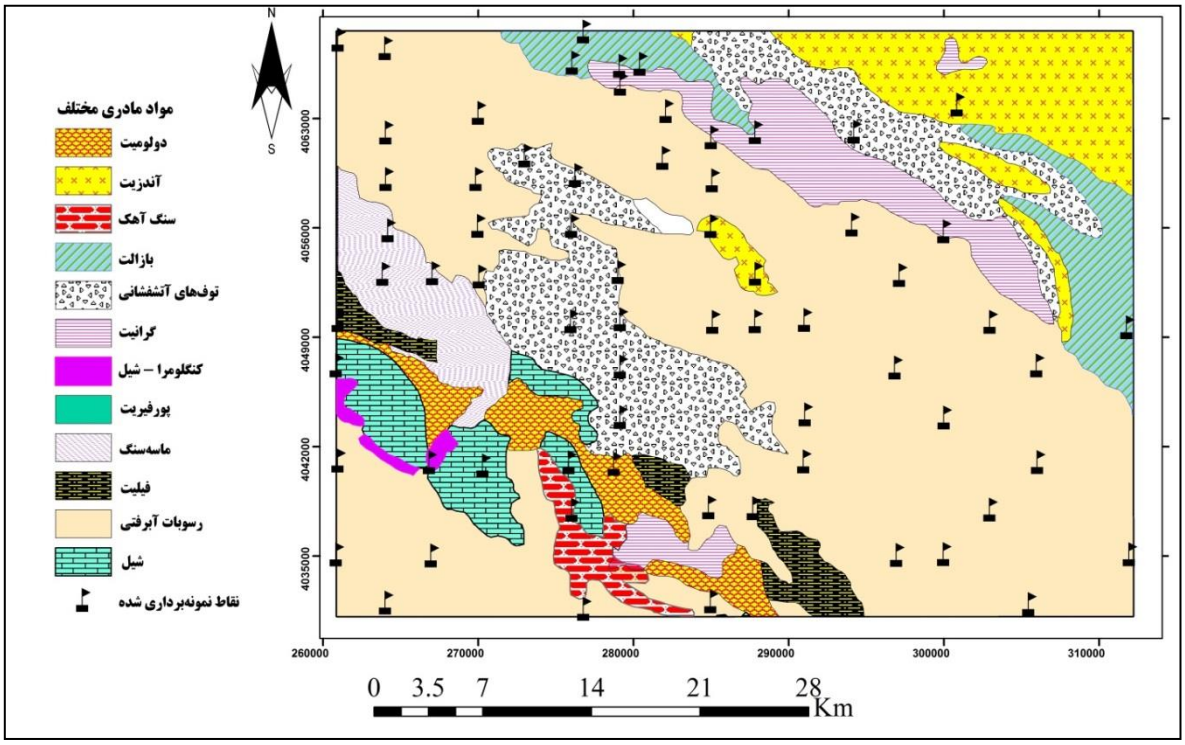
فاکتورهای تأثیرگذار پروسه‌های خاک‌سازی است (Palumbo et al, 2000).

مهم‌ترین جنبه‌های خاک‌شناختی (پدوژنیکی) که رفتار عناصر را در خاک کنترل می‌کند، شامل هوادیدگی و رها شدن عناصر به محیط و جابه‌جایی، انتقال و تجمع ذرات تشکیل دهنده خاک مثل رس‌های سیلیکاتی، اکسیدها و هیدروکسیدها و مواد آلی که قابلیت جذب عناصر را دارند، می‌باشد. فرآیندهای مهم پدوژنیکی که باعث این جابه‌جایی‌ها در خاک می‌شوند عبارتند از:

آبشستگی (Eluviation)، انباشتگی (Illuviation)، آبشویی، به هم ریختگی خاک (Pedoturbation)، اکسایش و کاهش، کلات‌سازی (Chelation) و سیلیس‌زدایی است (Nael et al, 2009). در شروع زمان تشکیل خاک، ویژگی‌های خاک بیشتر تحت تأثیر سنگ منشاء هستند. گذشت زمان و پشرفت مراحل خاک‌سازی، در خاک تغییراتی را در پی خواهد داشت. به طوری که این ویژگی‌ها از کنترل سنگ منشاء خارج شده و بیشتر متأثر از پارامترهای دیگر خاک‌سازی از قبیل اقلیم و توپوگرافی خواهند بود. با این حال ویژگی‌های متفاوت سنگ منشاء سرعت تغییر یکسانی ندارند. رنگ، تشکیل افق‌های مختلف و واکنش سنگ منشاء تحت تأثیر فرآیندهای خاک‌سازی با سرعت بالایی تغییر می‌یابند. در حالی که، برخی دیگر از ویژگی‌های سنگ منشاء بسیار پایدار بوده و تأثیر خود را در زمان‌های طولانی بر خاک اعمال می‌کنند. سنگ منشاء رسی و شنی به ترتیب خاک‌های رسی و شنی ایجاد می‌کنند. به علاوه نوع سنگ منشاء به واسطه تأثیری که بر بافت و سطح ویژه دارد، شدت فرآیندهای خاک‌سازی را کنترل می‌کند (Nael et al, 2009 & Anderson, 2005). مطالعه حاضر با هدف تعیین غلظت و توزیع ژئوشیمیایی برخی فلزات سنگین در خاک‌های مشتق شده از سنگ منشاء مختلف در مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناختی در استان زنجان انجام گرفت.

روش تحقیق

منطقه مطالعاتی بین مدارهای ´۲۰ °۳۶ تا ´۴۱ °۳۶ عرض شمالی و ´۱۹ °۴۸ تا ´۵۳ °۴۸ طول شرقی با مساحتی بالغ بر ۲۰۰۰ کیلومترمربع در قسمت اراضی مرکزی استان زنجان واقع شده است. منطقه مطالعاتی دارای رژیم رطوبتی دری‌زریک (Dry xeric) و تیپیک زریک و رژیم حرارتی مزیک (Mesic) و فریجید (Frigid) می‌باشد. سنگ منشاء غالب منطقه شامل سنگ‌های آذرین (دوره ایوسن-کامبرین) و سنگ‌های رسوبی (دوره ژوراسیک-کرتاسه) می‌باشد. همچنین سنگ منشاء آبرفتی (دوره کواترنری) بخش اعظم منطقه مطالعاتی را می‌پوشاند (Stocklin et al, 1969). به صورت کلی تعداد ۶۷ نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری در مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناختی با توجه به وسعت هر یک از سنگ منشاء مختلف برداشت گردید، که شامل ۱۹ نمونه از خاک‌های با سنگ منشاء آذرین (خاک‌هایی با سنگ منشاء آندزیتی، بازالتی، گرانیتی و توف‌های آتشفشانی)، ۱۷ نمونه از خاک‌های با سنگ منشاء رسوبی (خاک‌هایی با سنگ منشاء شیل و ماسه سنگ) و ۳۱ نمونه از رسوبات آبرفتی برداشت گردید (شکل ۱). تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل pH و هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره ۱:۲ آب به خاک، بافت خاک به روش پیپت، ماده آلی به روش والکی- بلک، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اسید و باز، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم (Burt, 2004) به عمل آمد. غلظت کل عناصر آهن، منگنز، کروم، کبالت، نیکل، روی، سرب، مس و کادمیم به روش اسید نیتریک ۵ نرمال (Sposito et al, 1982) و غلظت قابل استخراج با DTPA به روش لیندزی و نورول (Lindsay and Norvell, 1978) و عصاره‌گیری متوالی فلزات به روش تسیر (Tessier et al, 1979) انجام گرفت.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری شده

غلظت فلزات عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیرهای مختلف به کمک دستگاه جذب اتمی مدل Perkin-Elmer: AA 200 در آزمایشگاه گروه خاک‌شناسی دانشگاه صنعتی اصفهان قرائت گردید. چون غلظت کادمیم کل از دامنه تشخیص دستگاه مذبور پایین‌تر بود، بنابراین از دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی مدل Rayleigh: WF-1E برای این کار کمک گرفته شد.

تعیین غلظت طبیعی عناصر در سنگ منشاء مختلف

برای این منظور از فاکتور غنی‌شدگی (Enrichment EF: factor) و شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}: Geoaccumulation index) استفاده گردید (به ترتیب معادله ۱ و ۲). فاکتور غنی‌شدگی تأثیرات فاکتورهای خاک‌شناختی (پدولوژیکی) (Pedological) و دیگر فاکتورهای غیرطبیعی (Non-lithogenic) بر فراوانی عناصر خاک را ارزیابی می‌کند (Nael et al, 2009).

$$EF = \frac{[(Metal / Fe)_{Sample}]}{[(Metal / Fe)_{Background}]} \quad (۱)$$

$$Igeo = Log_2(C_n / 1.5B_n) \quad (۲)$$

در این مطالعه، از آهن به عنوان عنصر مبنا برای مطالعات بعدی استفاده گردید (Chabukdhara ,2012).

در فاکتور غنی‌شدگی (معادله ۱)، صورت کسر، مربوط به نسبت غلظت فلز مورد مطالعه به غلظت آهن در نمونه مورد نظر می‌باشد. مخرج کسر، نسبت غلظت زمینه‌ای همان فلز مورد مطالعه به غلظت زمینه‌ای آهن می‌باشد (Chabukdhara and Nema, 2012). در شاخص زمین‌انباشتگی (معادله ۲)، C_n غلظت فلزات مورد آزمون در نمونه‌های خاک، B_n غلظت زمینه‌ای ژئوشیمیایی فلز و ضریب ۱/۵، ضریب تصحیح تأثیر لیتوژنیکی مقدار غلظت زمینه می‌باشد (Bhuiyan et al, 2010).

غلظت زمینه‌ای مس، کادمیم، روی، سرب، نیکل، کروم، کبالت، منگنز و آهن به ترتیب برابر ۲۶/۹۹، ۰/۲۵، ۹۱/۸۱، ۵۷/۷۹، ۴۰/۷۴، ۱۹/۹۹، ۲۴/۱۸، ۶۲۸/۴ و ۱۶۵۰۰ میلی-گرم بر کیلوگرم می‌باشد، که با توجه به نقاط نمونه‌برداری شده در مناطق دور از فعالیت‌های انسانی و بکر، در خود منطقه مطالعاتی محاسبه شده است.

فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی دارای کلاس‌بندی‌های مختلفی هستند که در جدول ۱ نشان داده شده است (Bhuiyan et al, 2010).

بحث و نتایج

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ منشاء مختلف

جدول ۲ برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌هایی با سنگ منشاء مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، تغییرات هدایت الکتریکی خاک بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب در خاک‌هایی با سنگ منشاء آندزیتی و آبرفتی مشاهده شد. بالاترین مقادیر کربنات کلسیم معادل در خاک‌های حاصل از توف، آبرفتی و شیل به ترتیب ۲۲، ۲۰/۰ و ۱۹/۸ درصد بدست آمد. نسبت بالای آهک در خاک‌های حاصل از توف می‌تواند ناشی از تحت تأثیر قرارگرفتن از سنگ منشاء مجاور از قبیل شیل و سنگ آهک در منطقه مطالعاتی باشد.

مقدار حداقل کربنات کلسیم معادل در خاک‌های با سنگ منشاء آندزیتی (۵/۰٪) و گرانیتی (۱۳/۳٪) مشاهده شد. تغییرات pH از گستردگی بالایی برخوردار نیست و کمترین آن در خاک‌هایی با سنگ منشاء آندزیتی ۷/۰۵ و بالاترین مقدار آن در خاک‌های مشتق شده از توف‌های آتشفشانی ۷/۵۳ بدست آمد. در سنگ منشاء مختلف دامنه تغییرات pH، متفاوت گزارش شده است برای مثال نائل و همکاران (۲۰۰۹) حداکثر مقدار pH را در خاک‌های آهکی (میانگین ۷/۵)، حداقل مقدار آنرا در خاک‌های حاصل از شیل (میانگین ٦/۰) و در خاک‌های دولریتی، تونالیتی، پریدوتیتی، و فیلیتی واکنش خاک را نزدیک به ۷ گزارش کردند (Nael et al, 2009). بیشترین و کمترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به ترتیب در خاک-هایی با سنگ منشاء ماسه سنگ ۲۱/۲۵ cmol/kg و آندزیت و گرانیت ۱٦/۵۸ cmol/kg مشاهده شد.

بیشترین مقدار رس در خاک‌های حاصل از شیل مشاهده شد (۲۵/۱٪). درصد شن در خاک‌های حاصل از بازالت (۵۷٪) بالاترین مقدار بود. درصد رس، سیلت و شن در خاک‌های مختلف به شدت تحت تأثیر نوع ماده مادری است (Nael et al, 2009). بالاترین درصد مواد آلی در خاک‌های مشتق شده از سنگ‌های آندزیتی (۲/۰٦٪) و کمترین آن در خاک‌های حاصل از توف‌های آتشفشانی (۰/۸۲٪) بدست آمد. با توجه به اینکه سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت و گرانیت) در قسمت شمال غرب منطقه مطالعاتی (کوه‌های طارم) واقع شده‌اند و دارای رژیم رطوبتی Typic Xeric و رژیم حرارتی Frigid هستند، این مناطق اصولاً دارای بارندگی و پوشش گیاهی مناسبی می‌باشند. در حالی که خاک‌های با سنگ منشاء توف، شیل و سنگ آهک (جنوب منطقه مطالعاتی) دارای رژیم رطوبتی Dry Xeric و رژیم حرارتی Mesic می‌باشند و علاوه بر بارندگی نسبتاً کم، به خاطر چرای بی رویه دام-ها، پوشش گیاهی مناسبی ندارند و فرسایش خاک هم در این مناطق بالاتر است.

غلظت عناصر سنگین در خاک‌هایی با سنگ منشاء مختلف

تیپ‌های مختلف خاک از سنگ منشاء مختلف ایجاد می‌شوند. ترکیب سنگ منشاء عمدتاً بر غلظت عناصر سنگین در خاک‌ها تأثیر می‌گذارند. هوادیدگی کانی‌های سنگی در درجه اول منبع طبیعی عناصر سنگین در سیستم خاک است و به طور کلی در مراحل اولیه خاک‌سازی، غلظت فلزات در خاک می‌تواند با توجه به فراوانی عنصر در سنگ منشاء پیش‌بینی شود (Palumbo et al, 2000). توزیع غلظت عناصر سنگین در سنگ منشاء مختلف در جدول ۳ آورده شده است.

بیشترین میانگین مس کل در خاک‌هایی با سنگ منشاء آبرفتی، بازالتی و توف به ترتیب با ۳۸/٦، ۳۲/٦ و ۳۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده می‌شود. نائل و همکاران (۲۰۰۹) مس کل را دارای کمترین تغییرات غلظت در بین فلزات در سنگ منشاء مختلف گزارش کردند (Nael et al, 2009). کبالت و کادمیم کل در خاک‌های با سنگ

منشاء مختلف تغییرات چندانی نشان نمی‌دهند و دامنه تغییرات آنها در خاک‌های مختلف بسیار پایین است. بیشترین میانگین روی کل در خاک‌های با سنگ منشاء آبرفتی و توف به ترتیب با ۱۹۱/۷ و ۱۶۷/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد. بالاترین مقادیر سرب کل در خاک‌های مشتق شده از ماسه سنگ و آبرفتی به ترتیب با ۱۰۰/۲ و ۸۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. بیشترین مقدار کروم و نیکل در خاک‌های با منشاء شیل به ترتیب با ۳۱/۵ و ٦٦ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. در بررسی آلودگی فلزات سنگین و توزیع آن در پارک‌های شهر اسلامشهر (جنوب غرب تهران) ۲۵ نمونه خاک، غلظت عناصر Ag، Cd، Hg، As و Se را کمتر از حد تشخیص دستگاه گزارش کردند. در حالیکه غلظت عناصر Co، Cr، Cu، Pb و Zn بالاتر از غلظت زمینه‌ای پوسته زمین بدست آمد. در مطالعه ایشان بیشترین آلودگی عناصر سنگین در منطقه واوان مشاهده شد. ایشان عناصر مس، روی و سرب را متأثر از فعالیت‌های انسانی از قبیل شهرنشینی، کشاورزی، صنعتی و ترافیک نسبت دادند (Yazdi & Behzad, 2009).

جدول ۱- آلودگی فلزات مختلف بر اساس فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی

آلودگی	متغیر	غنی شدگی	متغیر
غیرآلوده	$I_{geo} \leq ۰$	پایین	EF < ۲
غیرآلوده تا آلودگی متوسط	$۰ < I_{geo} < ۱$	متوسط	EF = ۲-۵
آلودگی متوسط	$۱ < I_{geo} < ۲$	بالا	EF = ۵-۲۰
آلودگی متوسط تا بالا	$۲ < I_{geo} < ۳$	خیلی بالا	EF = ۲۰-٤۰
آلودگی بالا	$۳ < I_{geo} < ٤$	به شدت بالا	EF > ٤۰
آلودگی بالا تا خیلی بالا	$٤ < I_{geo} < ۵$		
آلودگی خیلی بالا	$I_{geo} \geq ۵$		

جدول ۲- میانگین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های تشکیل بر روی سنگ منشاء مختلف

	آهک	EC	pH	CEC	OM	سیلت	شن	رس
آندزیت	۵/۰۰	۰/۱۸	۷/۰۵	۱٦/۵۸	۲/۰٦	۳۷/۳	٤۳/۷	۱۹/۱
بازالت	۱۷/۲۰	۰/۲۱	۷/٤۲	۱۸/۲۸	۱/۱۰	۲۷/۲	۵۷/٤	۱۵/٤
ماسه سنگ	۱۳/۹۸	۰/۲۲	۷/٤۳	۲۱/۲۵	۱/۰۳	۳٦/۷	٤٤/۸	۱۸/٤
توف	۲۱/۹۷	۰/۲۱	۷/۵۳	۲۰/٦۳	۰/۸۲	٤۹/۰	۲۹/۲	۲۱/۷
گرانیت	۱۳/۲۵	۰/۲۲	۷/۵۰	۱٦/۵۸	۱/۰۸	۳٤/۹	٤۹/۵	۱۵/٦
شیل	۱۹/۸۰	۰/۱۹	۷/٤۰	۲۰/۲۱	۰/۹۷	٤٤/٤	۳۰/٦	۲۵/۱
آبرفتی	۲۰/۰۷	۰/۳۵	۷/۳۸	۱۹/٦٤	۱/۷۵	٤٦/۱	۳۳/۱	۲۰/۸

منگنز کل در خاک‌ها تغییرات کمتری دارد، با این‌حال بیشترین مقادیر آن در خاک‌هایی با سنگ منشاء گرانیتی (٦۷٤/٤) و آندزیتی (٦۷۳/۸) میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین آن در خاک‌های حاصل از ماسه سنگ با ۲۸۰

میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد. بالاترین مقادیر آهن کل در خاک‌های حاصل از آندزیت و شیل به ترتیب با ۱۹/۸ و ۱۸/٦ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد.

پالومبو و همکاران (۲۰۰۰) به صورت کلی در خاک‌های با سنگ منشاء مختلف در سیسیل ایتالیا، غلظت کل کادمیم (۰/۱۲ تا ۲/٤)، کروم (۱۵ تا ۱۳۷)، مس (۱۲ تا ۱۷۲)، منگنز (۲۵۹ تا ۲۹٦۷)، نیکل (۱۵ تا ۱۰٤)، سرب (۵ تا ٤۵) و روی (٤۷ تا ۱۵۲) میلی‌گرم برکیلوگرم گزارش کردند که عمدتاً غلظت‌های بالا در خاک‌های حاصل از سنگ منشاء سنگ آهک و غلظت‌های پایین‌تر عناصر سنگین را در خاک‌های مشتق شده از سنگ منشاء گچی و رسوبات ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی مشاهده کردند (Palumbo et al, 2000). همچنین نائل و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه خود در خاک‌های با سنگ منشاء مختلف در فومن (ماسوله)، بالاترین غلظت کروم، کبالت و نیکل را به ترتیب ۹۸٤، ۲۸۵ و ۵۳ میلی‌گرم برکیلوگرم در خاک‌های پریدوتیتی (آذرین) و حداکثر مقادیر سرب و روی را به ترتیب با ۲۷ و ۱۰٦ میلی‌گرم برکیلوگرم در خاک‌های مشتق شده از شیل (رسوبی) مشاهده کردند (Nael et al, 2009). در بررسی آلودگی‌های ژئوشیمیایی در رودخانه سیاب اسلام شهر (جنوب تهران)، با برداشت ۲۹ نمونه از آب، خاک و گیاهان اطراف رودخانه، مقادیر عناصر As، Hg و Ag را کمتر از حد تشخیص دستگاه گزارش کردند. ایشان آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی را باعث افزایش غلظت سلنیوم و کادمیم دانستند و مقادیر آنها را به ترتیب ۱۷٤ و ۲۲۰ برابر میانگین پوسته بالائی زمین بدست آوردند. این محققین، توسعه شهرنشینی در منطقه به خصوص اطراف رودخانه سیاب (اسلامشهر) را از عوامل عمده آلودگی‌های انسانی در منطقه نسبت دادند (Yazdi & Behzad, 2009). یک عنصر مشخص الگوهای متفاوتی را در خاک‌های با سنگ منشاء مختلف و حتی در برخی موارد، در نیمرخ‌های مختلف با یک نوع ماده مادری خاص، نشان می‌دهد (Nael et al, 2009).

جدول ۳- میانگین غلظت کل فلزات سنگین در خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ منشاء مختلف

	مس	کادمیم	روی	سرب	نیکل	کروم	کبالت	منگنز	آهن*
آندزیت	۲٤/۹	۰/۵۷	۱۳۰/٦	٦٦/٦	٤۱/۸	۱۳/۹	۲۳/۹	٦۷۳/۸	۱۹/۸
بازالت	۳۲/٦	۰/٦۱	۱۲۰/۰	۷۸/۵	٤۰/۸	۱۵/۸	۲٤/۰	٦۲۲/۰	۱۷/٤
ماسه سنگ	۲۳/۹	۰/۷۹	۱٦۱/۵	۱۰۰/۲	۳٦/۰	۱۷/۲	۲۵/۳	۲۸۰/۰	۱٦/۱
توف	۳۰/۵	۰/۵۰	۱٦۷/۹	۵۱/۷	۵۱/۱	۱۷/۸	۲٤/۹	٦۲۱/۷	۱۳/۳
گرانیت	۲۸/٦	۰/۵۲	۱۳۲/۲	٦۱/٦	٤۱/٦	۲۰/٤	۲٤/۲	٦۷٤/٤	۱۷/٦
شیل	۲۹/٤	۰/۵٦	۱۱۲/۱	٦۱/۲	٦٦/۰	۳۱/۵	۲۷/۰	٦٤٤/۳	۱۸/٦
آبرفتی	۳۸/٦	۰/۹۳	۱۹۱/۷	۸۵/۵	۵۰/۱	۲٤/٤	۲٤/٦	٦۲۲/۸	۱٦/۵

***(آهن بر حسب گرم بر کیلوگرم و بقیه عناصر بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشند)**

شرایط ژئوپدولوژیک حاکم بر محیط خاک، عامل اصلی موثر بر توزیع و مقدار عناصر در خاک‌های بکر هستند (Nael et al, 2009).

شکل ۲ الگوی توزیع ژئوشیمیایی فلزات مورد مطالعه را در خاک‌های حاصل از سنگ منشاء مختلف نشان می‌دهد. الگوی ژئوشیمیایی کبالت در خاک‌های حاصل از آندزیت (Re>Oxid>Exch>Om>Car)می باشد.

Re : جزء باقیمانده

Oxid: جزء متصل به اکسیدهای آهن و منگنز

Car: جزء متصل به کربنات‌ها

Om: جزء متصل به مواد آلی

Exch: جزء(محلول+تبادلی)، خاک‌های با سنگ منشاء

بازالتی،ماسه سنگی(Re>Oxid>Exch>Car>O)، خاکی با مواد مادری گرانیتی و خاک‌های حاصل از توف بدین صورت (Re>Car>Oxid>Exch>Om) مشاهده شد. رفتار شیمیایی مس در خاک‌های مختلف تفاوت چندانی نشان نداد و در خاک‌های با سنگ منشاء آندزیتی و آبرفتی (Re>Om>Oxid>Car>Exch) و در خاک‌های با سنگ منشاء بازالتی، ماسه سنگی، توف، گرانیتی و شیلی (Re>Oxid>Om>Car>Exch) بدست آمد. علت زیاد بودن بخش وابسته به مواد آلی مس در مقایسه با سایر فلزات، میل ترکیبی زیاد مس برای تشکیل پیوند با مواد آلی می‌باشد (Tao et al, 2003). در خاک‌های آهکی مس را بیشتر در فرم‌های باقیمانده و آلی گزارش کردند (Jalali & Khanlari, 2008). از طرف دیگر میزان ماده آلی در رسوبات آبرفتی نسبت به سایر سنگ منشاء بالاتر است که می‌تواند این امر را توجیه کند.

نیکل دارای سه الگوی شیمیایی بود و در خاک‌های حاصل از آندزیت، بازالت، گرانیت و شیل (Re>Oxid>Om>Car>Exch)، خاک‌های حاصل از ماسه سنگ و آبرفتی (Re>Oxid>Car>Om>Exch) وخاکی حاصل از توف (Re>Car>Oxid>Om>Exch) بدست آمد.

نائل و همکاران (۲۰۰۹) کروم، مس، نیکل، روی و وانادیم را جدا از نوع خاک و مواد مادری، بیشتر در جزء باقیمانده گزارش کردند. در مقابل منگنز، سرب و کبالت در جزءهای غیرباقیمانده بودند (Nael et al, 2009).

روی پایدارترین حالت ژئوشیمیایی را در خاک‌های مختلف نشان داد و ترتیب آن در تمام خاک‌ها (Re>Oxid>Om>Car>Exch) بدست آمد. در حالیکه سرب ناپایدارترین حالت شیمیایی را در خاک‌های مختلف نشان می‌دهد و به ترتیب در خاک‌های با سنگ منشاآندزیتی‌وماسه‌سنگی(Re>Om>Oxid>Car>Exch)، خاک‌های با سنگ منشاء بازالتی و آبرفتی بصورت (Re>Oxid>Car>Om>Exch)، خاک‌های حاصل از توف(Re>Car>Exch>Om>Oxid)، خاک های حاصل از گرانیت (Re>Oxid>Om>Exch>Car) و خاک‌های حاصل از شیل (Re>Oxid>Car>Exch>Om) مشاهده شد (شکل ۲). منابع مختلف نشان می‌دهند که مقدار این عنصر در خاک‌های طبیعی شدیداً وابسته به نوع ماده مادری بوده، ولی به خاطر گستردگی وسیع آلودگی سرب، اغلب خاک‌ها به ویژه در افق‌های سطحی، نسبت به این عنصر غنی شده‌اند (Nael et al, 2009).

بیشترین درصد مس، نیکل و روی را جدا از نوع خاک و سنگ منشاء در جزء باقیمانده گزارش کردند در حالیکه سرب و کبالت بیشتر در جزءهای غیرباقیمانده بود (Nael et al, 2009). پالومبو و همکاران (۲۰۰۰) در خاک‌های آهکی غلظت‌های بالای سرب، روی و مس را در جزء ساده شدنی (Reducible) گزارش کردند (Palumbo et al, 2000). جزء باقیمانده و در مرتبه بعدی جزء متصل به اکسیدهای آهن و منگنز بالاترین سهم را در تمام فلزات در همه سنگ منشاء مختلف به خود اختصاص دادند. اختصاص یافتن درصد بیشتری از عناصر به بخش اکسیدی احتمالاً به علت سنگ منشاء و همچنین میل ترکیبی بالا به تشکیل پیوند با اکسیدهای آهن و منگنز می‌تواند باشد. نائل و همکاران (۲۰۰۹) تمرکز کلیه عناصر به جز سرب را در بخش باقیمانده و سهم قابل توجهی از سرب را در بخش متحرک گزارش کردند (Nael et al, 2009). جزء محلول تبادلی در تمام فلزات، کمترین جزء نسبت به سایر جزءها و در تمام نمونه‌های خاک بود که می‌تواند ناشی از خصوصیات خاک و ویژگی خاص خود فلز باشد. در خاک‌های آهکی، علت پایین بودن جزء تبادلی به خاطر کربنات کلسیم بالا و غلظت سیلت و رس بالا در خاک گزارش شده است (Jalali & Khanlari, 2008). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مثل وضعیت اکسیداسیون و احیا، pH و غلظت آب همراه با افزایش و تخلیه مواد (املاح، کربنات-ها، رس و مواد آلی) بر سرعت تغییرات شیمیایی فلزات در خاک تأثیر می‌گذارد (Palumbo et al, 2000). به عنوان مثال در مطالعه حاضر، در جزءهای شیمیایی فلز

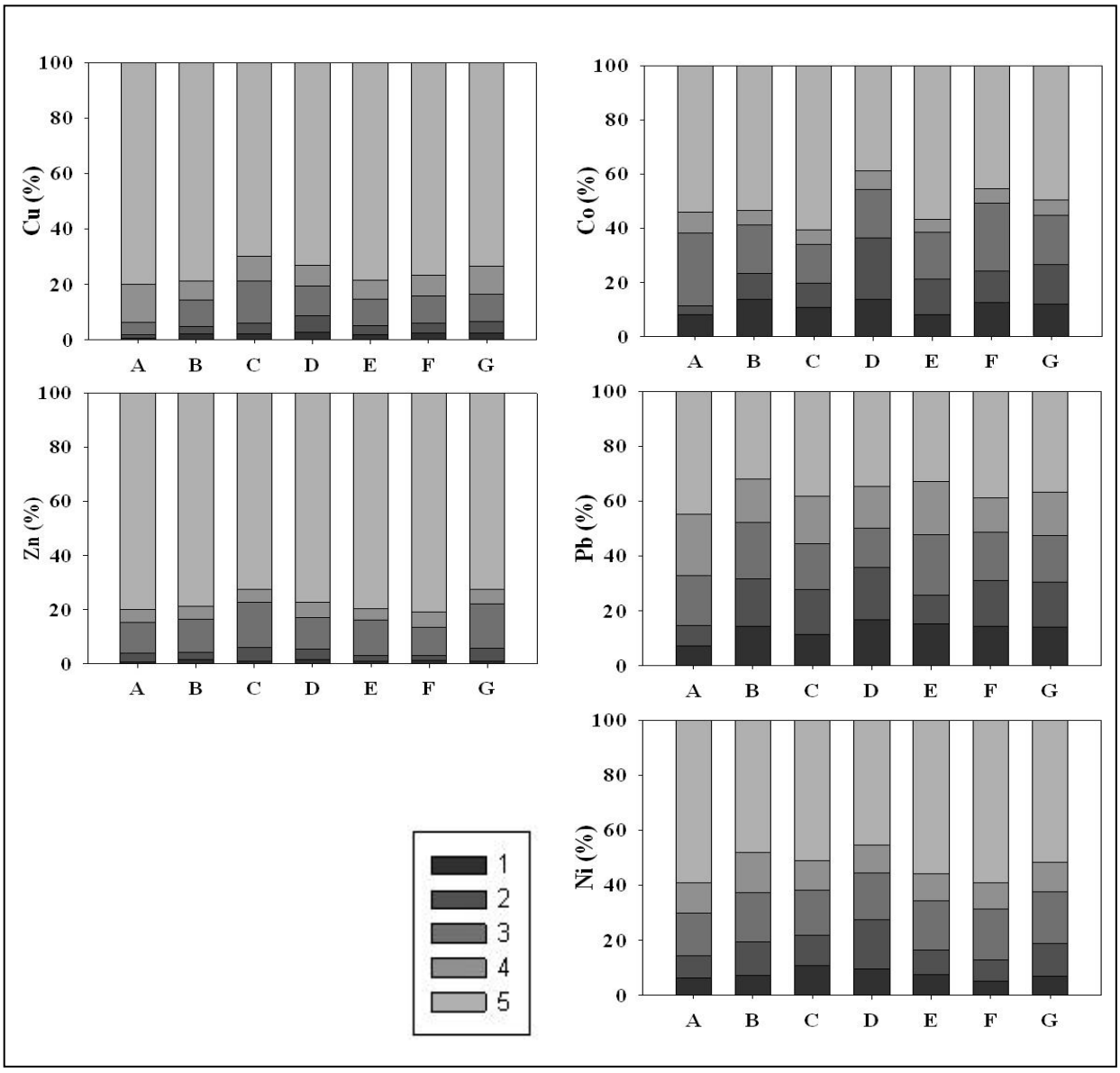
روی (Zn)، ماده آلی با جزء متصل به کربنات‌ها (r=۰/٤٧١)، متصل به آهن و منگنز (r=۰/٥٨٩) و متصل به مواد آلی (r=۰/٤٤٧) در (P<۰/۰۱) و EC با جزءهای متصل به کربنات‌ها، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز و متصل به مواد آلی به ترتیب با ضرایب ۰/۳٦٤، ۰/٤۳٥ و ۰/۲۹۲ در سطح (P<۰/۰۱) ارتباط مثبت و معنی‌دار نشان دادند. رس و CEC بیشترین ارتباط را با جزءهای شیمیایی سرب نشان دادند (جلالی و خانلری۲۰۰۸). غلظت سیلت خاک را جزء پارامترهایی می‌دانند که بر ابقاء (Retention) عناصر سنگین در فاز متصل به مواد آلی تأثیر می‌گذارد (Jalali & Khanlari, 2008).

شاخص آلودگی و زیست‌فراهمی (Bioavailable) فلزات سنگین غلظت فلزات عصاره‌گیری شده با DTPA و فاکتور تحرک آن‌ها

خاک‌های آبرفتی (به ترتیب ۷/٥۹، ۱۰/۰ و ۲/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و خاک‌هایی با سنگ منشاء ماسه سنگی (به ترتیب ۷/٤۱، ۷/۷۷ و ٤/٥۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آنها در خاک‌های حاصل از شیل (به ترتیب ۱/۹٦، ۰/۷٦ و ۱/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهد شد (جدول ٤). بالاترین مقدار فلزات عصاره‌گیری شده با DTPA برای روی و سرب در خاک‌های آبرفتی است که با توجه به اینکه فعالیت‌های انسانی (شهری، صنعتی و کشاورزی) در منطقه بیشتر بر روی این خاک‌هاست، می‌تواند در افزایش غلظت کل و قابل جذب این عناصر نقش داشته باشد. بریتزل و کالدریسی (۲۰۰٦) اشاره داشتند که عناصر با منشاء لیتوژنیکی کمترین مقدار استخراج شده با DTPA را نشان می‌دهند در حالیکه عناصر با منشاء انسانی دارای مقدار استخراج شده با DTPA بیشتری هستند (Bretzel and Calderisi, 2006). خصوصیات آماری غلظت فلزات عصاره‌گیری شده با DTPA در سنگ منشاء مختلف را نشان می‌دهد. در خاک‌های مختلف مقدار نیکل و کبالت عصاره‌گیری شده با DTPA تغییرات چندانی ندارد، با اینحال مقدار حداکثر آنها برای نیکل در خاک‌های آبرفتی ۱/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کبالت در خاک‌هایی با سنگ منشاء آبرفتی و شیل برابر ۰/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد. بالاترین مقدار سرب، روی و مس عصاره‌گیری شده با DTPA در علاوه بر ماهیت فلز و مقدار آن، به ظرفیت بافری (Buffer capacity) و شرایط و خصوصیات خاک نیز بستگی زیادی داشته و بین خاک‌های مختلف متفاوت می‌باشد (Bretzel and Calderisi, 2006). جدول ٤ برخی زیست‌فراهمی عناصر، مربوط به بخشی از مقدار کل عنصر در خاک می‌باشد که بتواند توسط میکرواورگانیسم‌ها و گیاهان جذب شده و با سیستم متابولیک آنها وارد واکنش گردد. قابلیت زیست‌فراهمی عناصر در خاک فاکتور تحرک (MF: Mobility factor) شاخصی برای شناسایی قابلیت تحرک و زیست‌فراهمی عناصر در خاک می‌باشد. مقدار بالای فاکتور تحرک نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر و قابلیت استفاده بیولوژیکی بالای عناصر سنگین در خاک‌ها است (Olajire et al, 2003). فاکتور تحرک به فاکتورهایی از قبیل غلظت طبیعی عناصر، خصوصیات خاک (pH، Eh، غلظت رس، نسبت مواد آلی) و نوع و کیفیت خاک وابسته است (Olajire et al, 2003). این پارامتر بر پایه نسبت جزءهای محلول در آب+تبادلی و متصل به کربنات‌ها به مجموع تمام جزءها محاسبه می‌شود (Nael et al, 2009 and Nannoni et al, 2011). به صورت کلی فاکتور تحرک فلزات در تمام نمونه خاک‌ها (بدون تأثیر نوع مواد مادری) به صورت زیر بدست آمد:

Pb (۲۹/۸)>Co(۲٥/۱)>Ni(۱۸/٥)>Cu(٦/۲)>Zn(٥/۱)

در خاک‌هایی که به نحوی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی هستند ورودی‌های با منشاء انسانی عناصر سنگین به صورت فرم‌های پیوند شده ضعیف باقی می‌مانند که نتیجه آن بالا رفتن تحرک و پتانسیل زیست‌فراهمی آنها در خاک‌های آلوده است (Nannoni et al, 2011). نائل و همکاران (۲۰۰۹) مقدار فاکتور تحرک را در خاک‌های منطقه مطالعاتی (فومن-ماسوله) کم و برای آهن و منگنز ۰ و ۷/۳، کبالت ٤/٥، نیکل ٤/۲، مس ۰/۹، سرب ۰/۸،



شکل ۲- توزیع ژئوشیمیایی عناصر در سنگ منشاء مختلف، (محور Xها: A: آندزیتی، B: بازالتی، C: ماسه سنگی، D: توف، E: گرانیتی، F: شیل، G: آبرفتی)، (جزءهای شیمیایی، ۱: تبادلی، ۲:متصل به کربنات‌ها، ۳: متصل به اکسیدهای آهن و منگنز، ٤: متصل به مواد آلی، ٥:باقیمانده).

جدول ٤- میانگین غلظت قابل استخراج فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌هایی با سنگ منشاء مختلف

	کبالت	مس	نیکل	سرب	روی
آندزیت	۰/۳٤	۲/۳۱	۰/۹۱	۲/۲٥	۲/۱۰
بازالت	۰/۳۲	۱/۷۹	۰/۷۰	۳/۷٥	۱/۳۷
ماسه سنگ	۰/۲۷	٤/٥۲	۰/۷۳	۷/٤۱	۷/۷۷
توف	۰/۳۲	۱/٤۲	۰/۸۲	۲/۳٦	۱/۰۳
گرانیت	۰/۳۳	۱/۸۹	۰/۸۷	۲/۸۷	۱/٦۲
شیل	۰/۳۷	۱/۷۸	۰/۹٥	۱/۹٦	۰/۷٦
آبرفتی	۰/۳۷	۲/۸۳	۱/۱۷	۷/٥۹	۱۰/۰۰

جدول ۵- میانگین فاکتور غنی‌شدگی عناصر مختلف در خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ منشاء مختلف

	EF-Cu	EF-Cd	EF-Zn	EF-Pb	EF-Ni	EF-Cr	EF-Co	EF-Mn
آندزیت	۱/۱۵	۳/۰٤	۱/۷۹	۱/٤۳	۱/٤۷	۰/۹٦	۱/۳٤	۱/۳۱
بازالت	۱/٤۳	۲/۷۹	۱/٤٤	۱/٤۷	۱/۱۰	۰/۸۷	۱/۰٦	۱/۰۵
ماسه سنگ	۰/۸۲	۳/۲۵	۱/٦٤	۱/۵٤	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۹٤	۱/۱۲
توف	۱/۱٤	۱/۹۹	۱/۸۹	۰/۹۰	۱/۲۹	۰/۹۱	۱/۰۱	۰/۹٦
گرانیت	۱/۰۲	۲/۰۱	۱/۳۹	۱/۰۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹٦	۱/۰۳
شیل	۰/۹۰	۱/۷۸	۰/۹۹	۰/۸٦	۱/۳۰	۱/۲۵	۰/۹۱	۰/۸۳
آبرفتی	۱/۵٦	٤/۰۲	۲/۲۳	۱/۵۸	۱/۲۷	۱/۲٤	۱/۰٦	۱/۰۲

جدول ٦ - میانگین شاخص زمین‌انباشتگی عناصر مختلف در خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ منشاء مختلف

	I_{geo}-Fe	I_{geo}-Mn	I_{geo}-Co	I_{geo}-Cr	I_{geo}-Ni	I_{geo}-Pb	I_{geo}-Zn	I_{geo}-Cd	I_{geo}-Cu
آندزیت	-۱/۰۰	-۰/٦۱	-۰/٦۱	-۱/۱۲	-۰/۵٦	-۰/٤۸	-۰/۱۵	۰/۵٦	-۰/۷۹
بازالت	-۰/۷۰	-۰/٦۷	-۰/٦٤	-۰/۹۸	-۰/٦۱	-۰/۲٤	-۰/۲۳	۰/٦۵	-۰/٤۱
ماسه سنگ	-۰/٤٤	-۰/۳۱	-۰/۵٤	-۰/۸٦	-۰/۷۹	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۷۸	-۰/۸۳
توف	-۰/۵٦	-۰/٦۲	-۰/۵۵	-۰/۷۷	-۰/۲۷	-۰/۷۵	۰/۲٦	۰/۳٦	-۰/٤۲
گرانیت	-۰/۵۳	-۰/۵۱	-۰/۵۹	-۰/۵٦	-۰/۵۸	-۰/۵۸	-۰/۰۸	۰/٤۰	-۰/۵۱
شیل	-۰/۲۸	-۰/۵۹	-۰/٤٤	۰/۰٤	۰/۰۸	-۰/۵٤	-۰/۳۱	۰/٤۸	-۰/٤۹
آبرفتی	-۰/٦٤	-۰/٦۳	-۰/۵۸	-۰/۳٦	-۰/۳۳	-۰/۲۲	۰/۲۹	۱/۰۰	-۰/۲۳

روی ۰/٦ و وانادیوم ۰/۱ محاسبه کردند (Nael et al, 2009). نانونی و همکاران (۲۰۱۱) فاکتور تحرک را در خاک‌های اطراف معادن در شمال کوزوو به ترتیب تحرک در خاک Cd>>Zn>>Pb>>Sb>As>Cu گزارش کردند (Nannoni et al, 2011).

غلظت‌های بالای عناصر در خاک لزوماً نشان‌دهنده تحرک بالای آنها در خاک نیست. اولاجیر و همکاران (۲۰۰۳) ارتباط منفی و معنی‌دار بین شاخص تحرک روی با غلظت کل آن بدست آوردند (Olajire et al, 2003). فلزی که در خاک تحرک کمتری دارد، بیشترین درصد آن در جزء باقیمانده است و یا دارای پیوند قوی با کانی‌های ثانویه در خاک می‌باشد (Nael et al, 2009).

در این مطالعه بین فاکتور تحرک نیکل با غلظت کل آن ارتباط منفی و معنی‌دار (r=-٤٢٣، P<۰/۰۵) و بین فاکتور تحرک روی وغلظت کل آن ارتباط مثبت و معنی-دار

مشاهده شد. بین فاکتور تحرک سرب، مس و کبالت با غلظت آنها، هیچ ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد.فاکتور غنی‌شدگی فلزات مورد مطالعه در خاک هایی با سنگ منشاء مختلف، نتایج متفاوتی ارائه داده است(جدول ۵). فاکتور غنی‌شدگی (EF) به علت فرمول رایج عمومی، ابزاری ساده و آسان برای تشخیص درجه غنی‌شدگی و با ارزیابی آلودگی با منشاء طبیعی و انسانی است (Zhang et al, 2009). با توجه به جدول، بالاترین مقادیر فاکتور غنی‌شدگی عناصر کادمیم، روی، سرب و مس به ترتیب ٤/۰۲، ۲/۲۳، ۱/۵۸ و ۱/۵٦ در خاک‌های آبرفتی مشاهده شد. خاک‌های با منشاء آندزیتی دارای مقادیر بالایی از فاکتور غنی‌شدگی نیکل، کبالت و منگنز به ترتیب با ۱/٤۷، ۱/۳٤ و ۱/۳۱ می‌باشد. خاک‌هایی با سنگ منشاء شیل نیز دارای فاکتور غنی‌شدگی بالایی از کروم و نیکل به ترتیب با ۱/۲۵ و ۱/۳۰ می‌باشد. نائل و همکاران (۲۰۰۹) شدت غنی‌شدگی را در خاک های با سنگ منشاء مختلف در فوفن- ماسوله برای Cu، Mn، Pb و Zn بیشتر از سایر عناصر معرفی کردند (Nael et al, 2009). از شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) نیز به عنوان مرجع برای برآورد وسعت آلودگی فلزات استفاده شد (جدول ٦).

بالاترین مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی کادمیم، روی و مس به ترتیب با ۱/۰۰، ۰/۲۹ و ۰/۲۳- در خاک‌های آبرفتی بدست آمد. در خاک‌های با سنگ منشاء ماسه سنگی بیشترین شاخص زمین‌انباشتگی سرب و منگنز با ۰/۰۵ و ۰/۳۱ مشاهده شد.

بالاترین میانگین شاخص زمین‌انباشتگی نیکل، کروم، آهن و کبالت به ترتیب با ۰/۰۸، ۰/۰٤، ۰/۲۸- و ۰/٤٤- در خاک‌های با سنگ منشاء شیل بدست آمد. با توجه جدول ۱، فاکتور غنی‌شدگی تمام عناصر مورد مطالعه (به جزء کادمیم) در دامنه EF < ۲ قرار می‌گیرند، که نشان دهنده کمترین حد غنی‌شدگی این عناصر در سنگ منشاء مختلف دارد. فاکتور غنی‌شدگی کادمیم در خاک‌های با سنگ منشاء آندزیتی، بازالتی، ماسه سنگی، گرانیتی و آبرفتی دارای دامنه ۵-۲ = EF هستند که در حد غنی‌شدگی متوسط قرار می‌گیرند. شاخص زمین‌انباشتگی کادمیم در تمام خاک‌ها در دامنه غیرآلوده تا آلودگی متوسط (۱>I_{geo}>۰) قرار دارد. شاخص زمین‌انباشتگی عناصری مثل روی، سرب در بعضی خاک‌ها در دامنه غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار می‌گیرند، ولی عددهای بزرگی نیستند. یزدی و بهزاد (۲۰۰۹) میزان فاکتور غنی‌شدگی را خاک‌های جمع‌آوری شده از پارک‌های سطح شهر اسلامشهر (تهران) برای روی، سرب، مس، کروم، کبالت و آلومینیوم به ترتیب ۲/۰۲، ۱/۷۱، ۲/۳۸، ۲/۱٤، ۱/۲ و ۰/۱۹- گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

غلظت و توزیع عناصر سنگین در خاک‌هایی با سنگ منشاء مختلف، در درجه اول می‌تواند بیشتر متأثر از نوع سنگ منشاء باشد.

در درجه دوم، ویژگی‌های خود فلز، شرایط تشکیل خاک (فاکتورهای خاک‌سازی) و شرایط محیطی حاکم (تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار داشتن) مهم‌ترین نقش را دارند. خاک‌هایی با سنگ منشاء آبرفتی که دارای کاربری-های غیرطبیعی هستند (کشاورزی و صنعتی) و بیشتر متأثر از فعالیت‌های انسانی در منطقه می‌باشند، دارای غلظت‌های بالایی از عناصر با منشاء انسانی (سرب، روی، مس) می‌باشند. همچنین نتایج مربوط به جزءبندی شیمیایی این فلزات در این خاک‌ها نشان می‌دهد که بیشترین سهم شیمیایی این عناصر در بخش‌های غیرباقیمانده (جزء متصل به اکسیدهای آهن و منگنز و کربنات‌ها) قرار دارد، که نشان‌دهنده ورودی‌های با منشاء خارجی (انسانی) است. بالاترین میانگین فلزات عصاره-گیری شده با DTPA در تمام فلزات (به جز مس) در رسوبات آبرفتی دیده شد. همچنین روند فاکتور غنی شدگی فلزات در تمام خاک‌ها یکسان بدست آمد که سرب بالاترین و روی کمترین میزان تحرک را نسبت به عناصر دیگر نشان دادند (Pb>Co>Ni>Cu>Zn).

تغییرات عناصر در جریان تشکیل خاک (Pedogenesis) و چرخه بیولوژیکی می‌تواند بر توزیع شیمیایی و زیست فراهمی فلزات تأثیر بگذارد. اندازه تأثیرات پدوژنیکی بر الگوی توزیع متفاوت عناصر بر اساس غالبیت فاکتورهای تأثیرگذار پروسه‌های خاک‌سازی است.

به طور مثال در خاک‌های با کربنات کلسیم بالا (خاک‌های حاصل از توف)، بعد از جزء باقیمانده، جزء متصل به کربنات‌ها بیشترین سهم را نشان می‌دهد، در حالیکه در خاک‌های با ماده آلی بالا (خاک‌های آندزیتی)، بعد از جزء باقیمانده، جزء متصل به مواد آلی بیشترین سهم را دارد.

درصد کربنات کلسیم معادل در خاک‌های با سنگ منشاء شیل و آبرفتی بیشترین مقدار را نشان داد. همچنین درصد رس و CEC در خاک‌های مشتق شده از شیل حداکثر بود، در حالیکه بالاترین درصد شن در خاک‌های حاصل از بازالت مشاهد شد.

منابع

- **رجائی.، و کریمیان، ن.، ۱۳۸٦.** اثر کادمیم اضافه شده و زمان خواباندن بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در دو گروه بافتی خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. سال یازدهم، شماره اول (الف). بهار. ۹۷-۱۰۸.

- **یزدی. م.، و بهزاد. ن. ۱۳۸۸.** آلودگی‌های ژئوشیمیایی در رودخانه سیاب اسلام‌شهر، جنوب تهران. علوم محیطی، سال ششم، شماره چهارم، تابستان. ٥٥-٦٤.

-Bhuiyan, M.A.H., Parvez, L., Islam, M.A. Dampare, S.B., and Suzuki, S. 2010. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. Journal of Hazardous Materials, 173: 384-392.

-Bretzel, F., and Calderisi, M. 2006. Metal contamination in urban soils of coastal Tuscany (Italy). Environmental Monitoring Assessment, 118: 319-335.

-Burt, R. (Ed.). 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Investigations, Report No. 42, Version 4.0, USDA, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE, USA. 735 Pages.

-Chabukdhara, M., and Nema, A. K., 2012. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediment: A chemometric and geochemical approach. Chemosphere, 87: 945-953.

-Fitamo, D., Itana, F., and Olsson, M. 2007. Total content and sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater, Akaki, Ethiopia. Environmental Management, 39: 178-193.

-Jalali, M., and Khanlari, Z. V. 2008. Effect of aging process on the fractionation of heavy metals in some calcareous soils of Iran. Geoderma, 143: 26-40.

-Lindsay W.L. and Norvell W.A. 1978. Development of DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of American Journal, 42: 421-428.

-Nael, M., Khademi, H., Jalalian, A., Schulin, R., Kalbasi, M., and Sotohian, F. 2009. Effect of geo-pedological conditions on the distribution and chemical speciation of selected trace elements in forest soils of western Alborz, Iran. Geoderma, 152: 157-170.

-Nannoni, F., Protano, G., and Riccobono, F. 2011. Fractionation and geochemical

mobility of heavy elements in soils of a mining area in northern Kosovo. Geoderma, 161: 63-73.

-Olajire, A. A., Ayodele, E. T., Oyedirdan, G. O., and Oluyemi, E. A. 2003. Levels and speciation of heavy metals in soils of industrial southern Nigeria. Environmental Monitoring Assessment, 85: 135-155.

-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 soils of Sicily, Italy. Geoderma, 95: 247-266.

-Schaetzl, R., and Anderson, S. 2005. Soils, Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press. 833 Pages.

-Sposito, G., Lund, L. J., Chang, A. C. 1982. Trace metal chemistry in aird-zone field soils amended with sewage sludge: I .Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Science Society of American Journal, 46: 260-264.

-Stocklin, J., Hirayama, K., Alavi, M., Eftekhar-nezhad, J., Haghipour, A., Hajian, J., and Vale, N. 1969. Explanatory text of the Zanjan quadrangle map, 1:250000. Geological quadrangle No. D4. Geological Survey of Iran. 61 Pages.

-Tao, S., Chen, Y. J., Xu, F. L., Cao, J., and Li, B. G. 2003. Chang of copper speciation in maize rhizosphere soil. Environmental Pollution, 122: 447-454.

-Tessier A., Campbell P.G.C. and Bisson M. 1979. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry, 51: 844-851.

-Yazdi, M.& Behzad, N. 2009. Heavy metal contamination and distribution in the Park City of Islam Shahr SW of Tehran, Iran. The Open Environmental Pollution and Toxicology Journal (OEPTJ), 1: 49-53.

-Zhang, W., Feng, H., Chang, J., Qu, J., Xie, H. & Yu, L. 2009. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes. Environmental Pollution, 157: 1533-1543.