

ارزیابی و پهنه بندی خطر زیست محیطی فلزات سنگین خاک با استفاده از شاخص‌های آلودگی در اراضی زراعی جنوب تهران

یوسف رضا باقری^{۱*}، فاطمه مسکینی ویشکایی^۲، زهرا محمد اسماعیل^۳، سعید سعادت^۴، حامد رضایی^۵

- ۱ و ۳. محقق، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲. هیئت علمی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.
- ۴ و ۵. هیئت علمی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۷)

چکیده

فلزات سنگین گروهی از عناصر هستند که در غلظت‌های بالاتر از حدود استانداردهای زیست محیطی به عنوان آلاینده شناخته می‌شوند. شاخص‌های آلودگی امکان مقایسه بین آلودگی ناشی از فلزات سنگین مختلف ناشی از فعالیت‌های انسانی را فراهم می‌نمایند. لذا این تحقیق به منظور ارزیابی و تهیه نقشه‌های پراکنش مکانی خطر زیست محیطی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های آلودگی در اراضی زراعی جنوب تهران انجام شد. در این تحقیق از حدود ۲۰۰۰ هکتار از اراضی زراعی در محدوده نهر فیروزآباد در جنوب تهران، تعداد ۱۷۵ نمونه خاک با فواصل ۳۰۰ متر انتخاب گردید. از روش وزن‌دهی عکس فاصله جهت پهنه بندی منطقه از لحاظ شاخص‌های زمین انباشت، فاکتور آلودگی، بارآلودگی و پتانسیل خطر زیست محیطی استفاده شد. بیشترین مقدار میانگین شاخص‌های زمین انباشت و فاکتور آلودگی مربوط به عنصر سرب بود. نتایج نشان داد که ۸۶ درصد از نمونه‌های خاک مورد مطالعه از لحاظ شاخص‌های مذکور آلوده به سرب می‌باشند. نقشه‌های پهنه بندی شاخص‌های بار آلودگی و پتانسیل خطر زیست محیطی (شاخص‌های جامع آلودگی خاک به تمام فلزات سنگین) مبین آلودگی تمام سطح منطقه می‌باشد. براساس شاخص پتانسیل خطر زیست محیطی، حدود ۹۸ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه (۱۸۵۷ هکتار) در کلاس خطر قابل توجه و حدود ۲ درصد از سطح منطقه (۳۳ هکتار) در کلاس خطر بسیار زیاد قرار گرفتند.

کلید واژگان: آلاینده‌های خاک، پتانسیل خطر زیست محیطی، شاخص بارآلودگی، وزن دهی عکس فاصله

۱. مقدمه

(Nayanaka *et al.*, 2010; Sekabira *et al.*, 2010).

نتایج Bhuiyana و همکاران در سال ۲۰۱۰ نشان از غنی شدگی معنی دار خاک‌ها با فلزات سنگین حاصل از ورودی از فعالیت‌های معدنی بود. Andem و همکاران در سال ۲۰۱۵ طی تحقیقی به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در سطح رسوبات در رودخانه اونا در غرب نیجریه با استفاده از شاخص‌های زمین انباشتگی و بار آلودگی نشان دادند که فعالیت‌های انسانی بر روی آلودگی رسوبات رودخانه تاثیر داشته است.

یکی از مشکلات اصلی بررسی الگوی توزیع مکانی آلودگی به فلزات سنگین، ناممکن بودن نمونه برداری از تمامی نقاط در منطقه مورد مطالعه است. اصول زمین‌آمار، امکان پردازش داده‌ها و توصیف مکانی آنها را فراهم می‌آورد. برای این کار، تکنیک‌های درون‌یابی نظیر روش کریجینگ (Dadgar *et al.*, 2010)، وزن‌دهی عکس فاصله (Dadgar *et al.*, 2010; Mirzaii and Seifi, 2016)، توابع پایه شعاعی (Rahimpour and Ali Abaspour, 2014) و روش مکانی چندجمله‌ای (Mirzaii and Seifi, 2016) به طور گسترده‌ای در تحقیقات خاک و تولید نقشه‌ی آلودگی استفاده می‌شود. محققین بسیاری از روش‌های مختلف زمین‌آمار برای پهنه‌بندی شاخص‌های آلودگی استفاده نموده‌اند. طی مطالعه‌ای نقشه پهنه‌بندی شاخص جامع فاکتور آلودگی توسط شهبازی و همکاران (Shahbazi *et al.*, 2012) نشان داد که آلودگی عناصر کروم، مس، نیکل و روی منشأ زمین‌شناسی و کشاورزی دارند. نتایج مطالعه روان‌خواه و همکاران (Ravankhah *et al.*, 2015) نشان‌دهنده روند نزولی میانگین شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی در منطقه آران و بیدگل به ترتیب برای مس، کادمیوم، نیکل، روی و سرب بود. الگوی مکانی این شاخص‌ها نشان داد که بیشترین انباشت فلزات کادمیوم، سرب و روی در محدوده شهرک‌های صنعتی، کوره‌های آجرپزی و مناطق شهری اتفاق افتاده است و برای دو عنصر مس و نیکل انباشت بیشتر در مناطق شهری و زمین‌های کشاورزی رخ داده است.

فلزات سنگین گروهی از عناصر هستند که در غلظت‌های بالاتر از حدود استانداردهای زیست محیطی به عنوان آلاینده شناخته می‌شود. این فلزات با ورود به زنجیره غذایی و تجمع بیولوژیکی در موجودات زنده باعث بروز اختلالات، بیماری‌ها و اثرات نامطلوب بسیاری در این موجودات می‌شوند. در میان آلاینده‌های محیطی، فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و اثرات فیزیولوژیکی که بر موجودات زنده در غلظت‌های کم دارند از اهمیت خاصی برخوردارند. این عناصر به دلیل تحرک کم به مرور در خاک انباشته می‌شوند (Barbieri, 2016). عناصر سنگین در خاک معمولاً ارتباطات پیچیده‌ای با یکدیگر دارند. عوامل مهمی مانند غلظت اصلی عناصر سنگین در سنگ‌ها و مواد مادری، فرآیندهای مختلف تشکیل خاک و عوامل انسانی از قبیل آلودگی توسط فعالیت‌های انسانی، تعیین‌کننده فراوانی نسبی غلظت عناصر سنگین در خاک هستند (Sun *et al.*, 2010). به منظور بررسی آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از غلظت فلزات سنگین، شاخص‌های متفاوتی همچون شاخص آلودگی، شاخص زمین‌انباشتگی، فاکتور آلودگی و فاکتور غنی‌سازی پیشنهاد شده است. مورتن-برما (Morton-Bermea *et al.*, 2009) میزان آلودگی فلزات سنگین براساس شاخص آلودگی در خاک‌های سطحی مکزیکوسیتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج وی نشان داد سرب، روی و مس دارای بالاترین مقادیر شاخص آلودگی را در خاک‌های سطحی شهری بودند. Kharat Sadeghi و Karbasi در سال ۲۰۰۸ در برآورد شدت آلودگی زیست محیطی رسوبات رودخانه شیروود با استفاده از شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور غنی‌سازی بیان کردند منطقه مورد مطالعه از نظر عناصر سرب و روی در کلاس آلودگی کم تا آلودگی شدید طبقه‌بندی شدند. محققین دیگر نیز از شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور غنی‌سازی به منظور بررسی و تعیین منابع آلودگی استفاده کرده و مهم‌ترین منابع آلودگی عناصر روی، سرب و کادمیوم را فعالیت‌های استخراج معادن، فعالیت‌های صنعتی و حمل و نقل گزارش کردند

فیروزآباد) استفاده شد.

۲. مواد و روش‌ها

پس از بازدید از مناطق کشاورزی مشروب از کانال فیروزآباد و انشعابات آن واقع در جنوب تهران، حدود ۲۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی اطراف کانال برای مطالعه در سال ۱۳۹۳ انتخاب گردید. با استفاده از عکس‌های هوایی منطقه، یک شبکه ۲۰۰ نقطه‌ای (به ابعاد ۳۰۰*۳۰۰ متر در هر شبکه) در محدوده ۳۵/۴۹ تا ۳۵/۵۴ عرض شمالی و ۵۱/۴۵ تا ۵۱/۵۲ طول شرقی برای نمونه برداری ایجاد گردید. بعد از نمونه برداری به علت وجود موانع و بیرون افتادن تعدادی از نقاط نمونه برداری از زمین‌های تحت کشت این موقعیت‌ها به ۱۷۵ نقطه نمونه برداری تقلیل یافت (شکل ۱). سپس در فصل زراعی در هر موقعیت نمونه برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی متری این نقاط ۲ کیلوگرم خاک به صورت مرکب نمونه برداری شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و غلظت سرب، کادمیوم و نیکل کل با استفاده از دستگاه ماکروویو و روش هضم با اسیدنیتریک ۶۵ درصد، هیدروکلریدریک اسید ۳۲ درصد و هیدروفلوریک اسید ۴۰-۳۸ درصد و سپس بوسیله‌ی دستگاه ICP^۱ تعیین گردید. سایر ویژگی‌های خاک شامل شوری، pH و بافت خاک با روش‌های آزمایشگاهی موسسه تحقیقات خاک و آب اندازه‌گیری شد (AliEhiai, 1997).

۱،۲. شاخص‌های آلودگی

جهت تعیین شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین از شاخص زمین انباشتگی^۲ (I_{geo})، فاکتور آلودگی^۳ (CF)، شاخص بار آلودگی (PLI)^۴ و شاخص ارزیابی پتانسیل خطر زیست محیطی (RI)^۵ استفاده گردید.

نظر به ناکارآمدی نقشه‌های تک عنصری فلزات سنگین در انعکاس کیفیت کلی خاک از نقطه نظر آلاینده‌های زیست محیطی، مدل‌سازی تغییرات مکانی شاخص بار آلودگی فلزات سنگین و پتانسیل خطر زیست محیطی راهکاری سودمند در راستای درک الگوی توزیع مکانی آلاینده‌ها و اثرات آنها بر تنزل کیفیت خاک می‌باشد. در این راستا صفری و همکاران (Safari et al., 2016) در ارزیابی وضعیت فلزات سنگین در منطقه شهرک صنعتی روی زنجان به کمک شاخص بار آلودگی نشان دادند که به طور کلی، فعالیت‌های صنعتی مربوط به فرآوری فلز روی، موجب ورود هم‌زمان چندین فلز سنگین به خا‌های اطراف و کاهش کیفیت اراضی منطقه شده است. افشاری و همکاران (Afshari et al., 2016) در ارزیابی پتانسیل خطرپذیری آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مرکزی استان زنجان بر اساس انواع شاخص‌های آلودگی نشان دادند که میانگین پتانسیل خطر زیست محیطی در کاربری کشاورزی ۱۱۴/۰۹، مرتع ۱۲۲/۰۸ و شهری ۳۳۹/۶۲ می‌باشد.

از دیرباز آلودگی ناشی از استفاده از فاضلاب نهر فیروزآباد از دغدغه‌های پژوهشگران مختلف بوده است (Shariati et al., 1989; Torabian and Baghoury, 1997; MollaHosseini and Baghoury, 2002; Mardani et al., 2010). آنچه که در تمامی این پژوهش‌ها بر آن تأکید شده است روند افزایشی غلظت فلزات سنگین در اراضی و محصولات زراعی منطقه جنوب تهران است. در این راستا Bagheri و همکاران (۲۰۱۶) نیز طی مطالعه‌ای به بررسی و پهنه بندی غلظت عناصر سنگین در اراضی زراعی جنوب تهران پرداختند. با توجه به عدم امکان مقایسه آلودگی ناشی از فلزات سنگین مختلف براساس غلظت هر عنصر، در این پژوهش به منظور بررسی اثرات زیست محیطی از شاخص‌های آلودگی (شاخص زمین انباشتگی، فاکتور آلودگی، شاخص بار آلودگی و فاکتور پتانسیل خطر زیست محیطی) جهت ارزیابی و پهنه‌بندی میزان آلودگی خاک‌های زراعی جنوب تهران در سطح مناطق مورد مطالعه (حوالی نهر

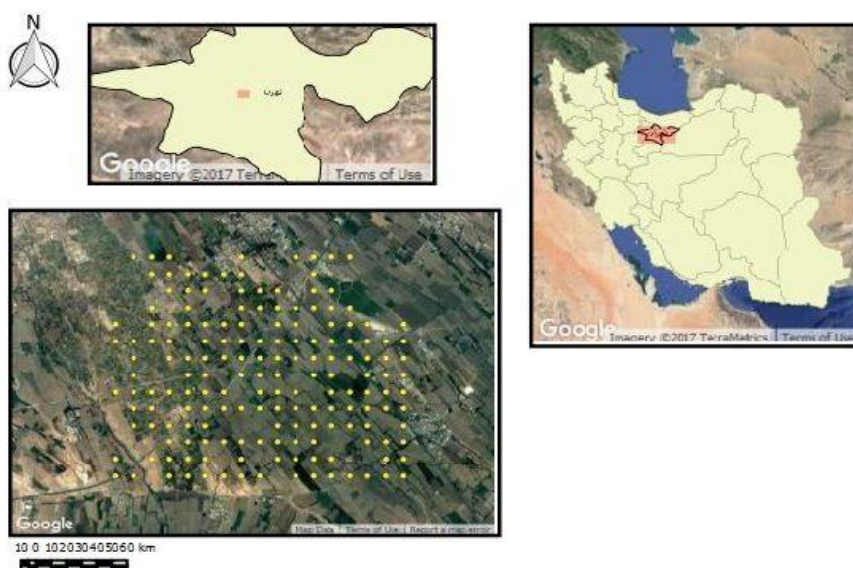
¹ Inductively coupled plasma

² Geoaccumulation Index

³ Contamination Factor

⁴ Pollution Lead Index

⁵ Environmental Risk Potential Index



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه و پراکنش مکانی نقاط نمونه برداری خاک در اراضی زراعی اطراف نهر فیروزآباد

۲،۲. شاخص زمین انباشتگی

این شاخص به منظور مشخص کردن درجه آلودگی و میزان تاثیر عوامل انسانی از عوامل طبیعی در محیط خاک و رسوب استفاده می‌شود (Anagnostou *et al.*, 1997) و از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right) \quad (1)$$

در این معادله I_{geo} : شاخص زمین انباشتگی یا شاخص شدت آلودگی، C_n : غلظت فلزات سنگین و سمی در خاک منطقه مورد مطالعه و B_n : غلظت فلزات سنگین در شیل یا غلظت زمینه عنصر مورد نظر است. ضریب ۱/۵ به دلیل احتمال اختلاف در غلظت اولیه تحت تاثیر عوامل محیطی در معادله گنجانده شده است. براساس این شاخص خاک‌ها از نظر درجه آلودگی به هفت کلاس (غیر آلوده: کمتر صفر، غیر آلوده تا کمی آلوده: ۱-۰، کمی آلوده: ۲-۱، کمی آلوده تا خیلی آلوده: ۳-۲، خیلی آلوده: ۴-۳، خیلی آلوده تا به شدت آلوده: ۵-۴، به شدت آلوده: بیشتر از ۵) طبقه‌بندی می‌شوند (Ji *et al.*, 2008).

۳،۲. فاکتور آلودگی

بر اساس این فاکتور می‌توان مقدار عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجید و میزان آلودگی خاک را تعیین کرد. فاکتور آلودگی طبق رابطه (۲) برای عناصر مورد بررسی محاسبه شد:

$$CF_{\text{metal}} = C_{\text{metal}} / C_{\text{background}} \quad (2)$$

که در آن CF_{metal} عامل آلودگی هر فلز دلخواه، C_{metal} و $C_{\text{background}}$ به ترتیب، غلظت فلز مورد نظر در خاک سطحی و در زمینه خاک می‌باشند. براساس این شاخص خاک‌ها از نظر درجه آلودگی به چهار کلاس (آلودگی کم: کمتر از ۱، آلودگی متوسط: ۳-۱، آلودگی زیاد: ۶-۳ و آلودگی خیلی زیاد: بیشتر یا مساوی ۶) طبقه‌بندی می‌شوند (Hakanson, 1980).

۴،۲. شاخص بار آلودگی

به منظور ارزیابی هم زمان وضعیت کلی آلودگی خاک به تمامی عناصر آلاینده اندازه گیری شده، اقدام به محاسبه شاخص بار آلودگی شد. مقادیر این شاخص،

در بسیاری از مطالعات از غلظت فلزات سنگین در پوسته زمین به عنوان مقادیر زمینه استفاده شده است (Kartal *et al.*, 2006; Tokalioglu *et al.*, 2003). در این مطالعه نیز از غلظت‌های ۸۰، ۰/۲ و ۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب برای عناصر نیکل، کادمیوم و سرب (غلظت این فلزات در پوسته زمین (Karbassi *et al.*, 2005)) به عنوان غلظت زمینه استفاده شد.

۳. نتایج

خلاصه آمار توصیفی برخی از ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. حدود ۵۰ درصد خاکهای منطقه دارای ۳۹ درصد رس می‌باشد که نشان از آن است که عمده خاک‌ها دارای بافت متوسط تا سنگین می‌باشند. با توجه به این نتایج خاک‌های منطقه مستلزم مدیریت آبیاری و کوددهی مناسب برای جلوگیری از انباشتگی عناصر سنگین در آنها می‌باشند. کمترین و بیشترین مقدار شاخص I_{geo} مربوط به نیکل (۱/۵۲-) و سرب (۲/۵۷) است. میانگین مقادیر شاخص I_{geo} برای کادمیوم، سرب و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۱۲-، ۱/۴۷ و ۰/۵۶- است. کمترین و بیشترین مقدار شاخص CF نیز مشابه شاخص I_{geo} به ترتیب مربوط به نیکل و سرب است (جدول ۲). نتایج نشان می‌دهد که ۵۰ درصد نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای PLI بالاتر از ۱/۸ می‌باشند. در حالیکه تمام نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای شاخص RI بالاتر از ۳۰۰ بوده و از نظر پتانسیل خطر زیست محیطی در کلاس‌های بیش از خطر متوسط قرار می‌گیرند.

خلاصه‌ای از شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین را بیان کرده و کیفیت محیطی خاک را نشان می‌دهد (Andem *et al.*, 2015).

$$PLI = \sqrt[n]{CF1 * CF2 * \dots * CFn} \quad (3)$$

PLI شاخص بار آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه، CF عامل آلودگی هر یک از عناصر فلزی و n تعداد فلزات سنگین اندازه‌گیری شده می‌باشد (Angulo, 1996). براساس این شاخص خاک‌ها از نظر درجه آلودگی به دو گروه غیرآلوده ($PLI < 1$) و آلوده ($PLI > 1$) تقسیم بندی می‌شوند (Tomlinson *et al.*, 1980).

۵.۲. شاخص پتانسیل خطر زیست محیطی

شاخص ارزیابی پتانسیل خطر زیست محیطی برای اولین بار توسط Hakanson در سال ۱۹۸۰ ارائه شد. از این شاخص به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی آلودگی رسوبات و خاک‌ها استفاده می‌شود (رابطه ۴):

$$E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times C_i \rightarrow RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

در این رابطه RI: شاخص پتانسیل خطر زیست محیطی برای منطقه مورد مطالعه، E_i : فاکتور پتانسیل خطر زیست محیطی برای آلاینده i ، C_i : نسبت غلظت فلز در خاک به غلظت زمینه و T_i : فاکتور پاسخ سمیت برای یک آلاینده که برای عنصر نیکل، سرب و کادمیوم به ترتیب ۲، ۵ و ۳۰ تعیین شده است. بر این اساس برای پتانسیل خطر زیست محیطی چهار کلاس (کم خطر: $RI > 150$ ، خطر متوسط: $300 < RI < 150$ ، خطر قابل توجه: $600 < RI < 300$ ، خطر بسیار بالا: $RI > 600$) تعریف شده است (Hakanson, 1980).

جدول ۱. آماره‌های توصیفی برخی از ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

متغیر	میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	چولگی	کشی‌دگی
رس (/)	۳۸/۸	۳۹	۲۶	۵۰	-۰/۳۱۵	-۰/۳۸۹
pH	۷/۸	۷/۹	۷/۲	۸/۳	-۰/۸۰۶	۰/۶۰۵
EC (dS m ⁻¹)	۴/۲	۲/۹۴	۱/۰۸	۳۰/۷	۳/۴۴	۱۷/۵

جدول ۲. آماره‌های توصیفی شاخص‌های آلودگی محاسبه شده

شاخص	عنصر	میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	چولگی	کشیدگی	ضریب تغییرات
I _{geo}	کادمیوم	-۰/۱۲	-۰/۱۱	-۱/۲۳	۱/۴۴	۰/۲	۰/۴۱	-۳۶/۳
	سرب	۱/۴۷	۱/۴۴	۰/۷۴	۲/۵۷	۰/۷۷	۰/۷۹	۲۲/۹
	نیکل	-۰/۵۶	-۰/۵۸	-۱/۵۲	۰/۳۸	-۰/۰۴	۱/۷۲	-۵۰/۲۲
CF	کادمیوم	۱/۴۴	۱/۳۹	۰/۶۴	۴/۰۸	۱/۵۵	۶	۳۱/۱۸
	سرب	۴/۲۸	۴/۰۷	۲/۵	۸/۹	۱/۵۸	۳/۲۳	۲۶/۱
	نیکل	۱/۰۳	۱	۰/۵۲	۱/۹۵	۱/۰۲	۲/۹۲	۲۰/۱
PLI		۱/۸۳	۱/۸۱	۱/۱۷	۳/۱	۰/۷	۰/۵۵	۱۸/۰۲
RI		۴۸۲/۳۱	۴۶۶/۰۴	۳۲۱/۱۲	۷۸۲/۳۵	۰/۹۵	۰/۹۷	۱۸/۱۱

اقدام به نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از تبدیل‌گرهای لگاریتمی گردید.

نتایج برازش مدل‌های نیم‌تغییرنما نشان داد که تغییرات مکانی شاخص I_{geo} و CF برای هر دو عنصر کادمیوم و سرب در منطقه‌ی مورد مطالعه از مدل خطی و تغییرات مکانی شاخص‌های PLI و RI از مدل کروی پیروی می‌کنند (شکل ۳). مدل‌های برازش داده شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی از بالاترین ضریب تبیین (R²) و کم‌ترین میزان مجموع مربعات خطا (RSS) برخوردار بودند. ویژگی‌های هر مدل در جدول ۳ نشان داده شد.

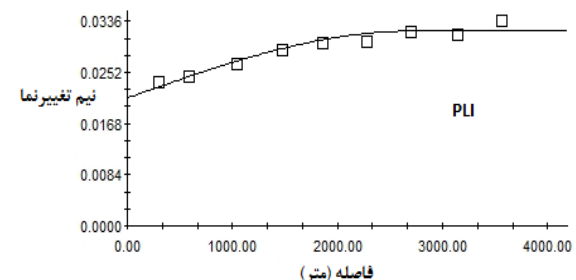
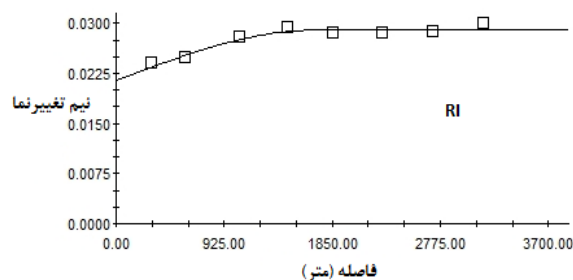
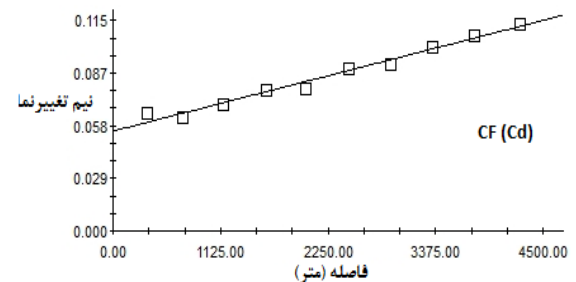
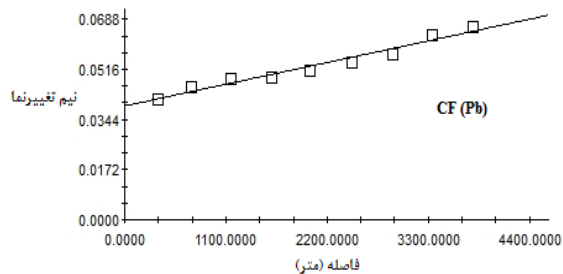
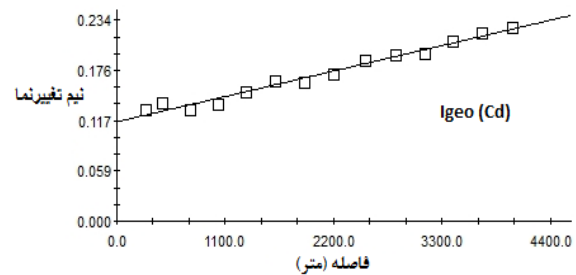
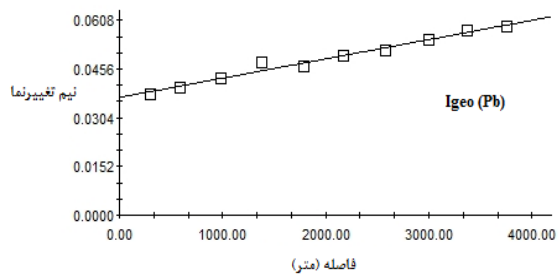
مقادیر شاخص‌های I_{geo} و CF برای عنصر نیکل مبین عدم وجود آلودگی یا آلودگی بسیار کم در اکثر نمونه‌های خاک مورد مطالعه بود. از این رو پراکنش مکانی شاخص‌های مذکور برای عنصر نیکل در این مطالعه بررسی نشد. نتایج آزمون کولموگراف-اسمیونف (جدول ۲) نشان داد که مقادیر شاخص I_{geo} برای سرب، شاخص CF برای کادمیوم و سرب، شاخص‌های PLI و RI از تابع توزیع نرمال پیروی نمی‌کند اما مقدار شاخص I_{geo} برای عنصر کادمیوم دارای توزیع نرمال است (k-s p > ۰/۰۵). با توجه به اینکه نرمال بودن داده‌ها در تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری نتایج مطلوب‌تری را در پی خواهد داشت.

جدول ۳. مولفه‌های مدل‌های برازش داده شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی شاخص‌های آلودگی مورد مطالعه

متغیر	نوع مدل	اثر قطعه‌ای	حد آستانه	دامنه تاثیر (متر)	نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه	R ²	RSS
I _{geo}	کادمیوم	خطی	۰/۱۱۵۸	-	-	۰/۹۷۸	۰/۰۵۸۶
	سرب	خطی	۰/۰۳۶۷	-	-	۰/۹۷۹	۱/۹ × ۱۰ ^{-۳}
CF	کادمیوم	خطی	۰/۰۵۵	-	-	۰/۹۷۹	۰/۰۱۲۲
	سرب	خطی	۰/۰۳۹	-	-	۰/۹۶۵	۲/۲۵ × ۱۰ ^{-۳}
PLI	کروی	۰/۰۲۱	۰/۰۳۲	۲۷۰۰	۰/۶۶	۰/۹۴۰	۵/۸۹ × ۱۰ ^{-۶}
RI	کروی	۰/۰۲۱	۰/۰۲۹	۱۷۰۰	۰/۷۲	۰/۹۳۲	۲/۶۹ × ۱۰ ^{-۶}

مطالعه است. همچنین شاخص PLI به دلیل اثر قطعه‌ای کوچک‌تر و دامنه تأثیر گسترده‌تر دارای ساختار مکانی قوی‌تری نسبت به شاخص RI است (جدول ۳). اما علی‌رغم مشاهده ساختار مکانی (پیروی از مدل کروی دارای آستانه) به دلیل همبستگی غیر قوی مشاهده شده (بالا بودن نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه $0/66$) برای شاخص PLI و $0/72$ برای شاخص RI) استفاده از روش IDW برای پهنه‌بندی شاخص‌های PLI و RI نیز در اولویت قرار گرفت.

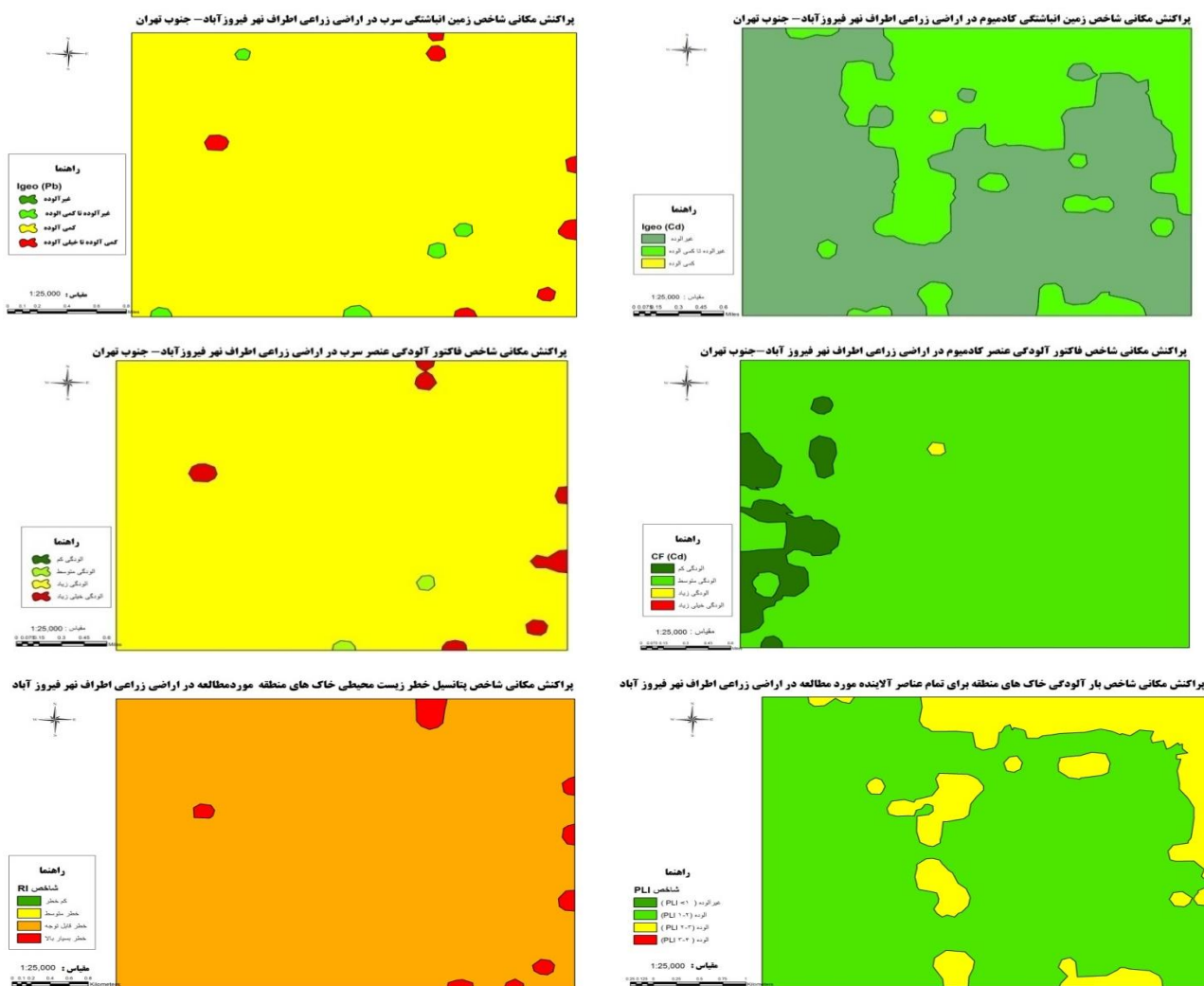
در مورد شاخص I_{geo} و CF برای هر دو عنصر مورد مطالعه به دلیل پیروی از مدل خطی تعیین حد آستانه و دامنه تأثیر ممکن نیست. با توجه به توانایی بیشتر روش وزن دهی عکس فاصله در بازنمایی رفتار آنومالی ویژگی‌ها نسبت به کریجینگ که امکان مدیریت رفتار ویژگی‌ها را بهتر فراهم می‌کند جهت پهنه‌بندی شاخص‌های I_{geo} و CF از روش IDW استفاده شد (شکل ۴). دقت برآورد درون‌یابی برای شاخص‌های PLI و RI به دلیل پیروی از مدل کروی (جدول ۳) بالاتر از سایر شاخص‌های مورد



شکل ۳. نیم تغییرنمای تجربی و مدل‌های برازش داده شده بر شاخص‌های I_{geo} و CF برای کادمیوم و سرب.

محدوده‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

شکل ۴ نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های آلودگی مورد مطالعه را به روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) در



شکل ۴. پراکنش مکانی شاخص I_{geo} و CF برای سرب و کادمیوم و شاخص RI و PLI برای تمام آلاینده‌های مورد مطالعه به روش IDW در خاک‌های اراضی زراعی اطراف نهر فیروزآباد در جنوب تهران.

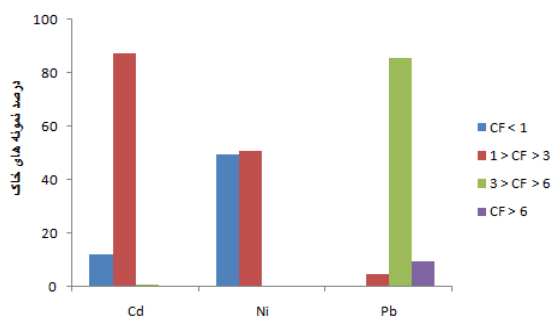
تغییرپذیری متوسط می‌باشند (جدول ۲).

بیشترین مقدار میانگین شاخص I_{geo} مربوط به عنصر سرب بوده (جدول ۲) که نشان دهنده آلودگی کم خاک به سرب است. اما مقدار حداکثر $2/57$ مبین وجود خاک‌هایی با آلودگی زیاد در منطقه می‌باشد. نتایج شاخص I_{geo} برای سرب نشان داد که حدود ۸۶ درصد نمونه‌های خاک در گروه کمی آلوده و ۹ درصد نمونه‌های خاک در گروه کمی آلوده تا خیلی آلوده قرار داشتند. برای عنصر کادمیوم، حدود ۶۵ درصد نمونه‌های خاک در

۴. بحث و نتیجه گیری

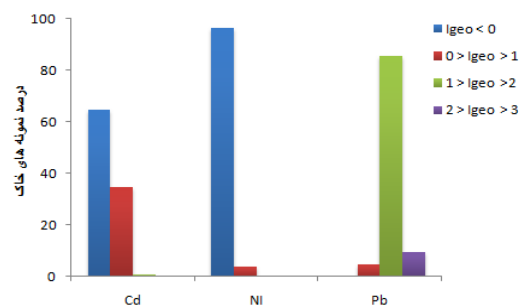
در این مطالعه شاخص‌های آلودگی خاک به فلزات سنگین شامل I_{geo} ، CF، PLI و RI برای ارزیابی آلودگی اراضی زراعی جنوب استان تهران محاسبه شد. با توجه به اینکه ضریب تغییرات کمتر از ۱۰٪ نشان از تغییرپذیری کم و ضریب تغییرات بیشتر از ۹۰٪ نشان از تغییرپذیری زیاد دارد (Zhang et al., 2007). بر همین اساس، ضریب تغییرات تمام شاخص‌های محاسبه شده دارای

گروه آلودگی زیاد (۸۶ درصد) و حدود ۹ درصد نمونه‌های خاک در گروه آلودگی خیلی زیاد قرار گرفتند. در عنصر کادمیوم حدود ۱۲، ۸۷ و کمتر از ۱ درصد نمونه‌های خاک به ترتیب در گروه‌های آلودگی کم، آلودگی متوسط و آلودگی زیاد می‌باشند. برای عنصر نیکل ۵۰ درصد نمونه‌ها در گروه آلودگی کم و مابقی در گروه آلودگی متوسط قرار داشتند (شکل ۵).



گروه غیر آلوده، ۳۴ درصد در گروه غیر آلوده تا کمی آلوده و کمتر از یک درصد در گروه کمی آلوده قرار گرفتند. همچنین نتایج شاخص I_{geo} نشان داد که در عنصر نیکل ۹۶ درصد نمونه‌های خاک مورد مطالعه در گروه غیر آلوده و تنها ۴ درصد نمونه‌های خاک در گروه غیر آلوده تا کمی آلوده قرار گرفتند (شکل ۵).

مقدار فاکتور آلودگی در منطقه مورد مطالعه برای عنصر سرب نشان داد که بخش عمده نمونه‌های خاک در



شکل ۵. مقادیر شاخص زمین انباشتی و فاکتور آلودگی در نمونه‌های خاک مورد مطالعه.

نتایج پهنه بندی شاخص زمین انباشت برای عنصر کادمیوم نشان داد که حدود ۶۵ درصد از اراضی زراعی منطقه مورد مطالعه غیر آلوده (۱۲۴۴ هکتار) و ۳۴ درصد منطقه غیرآلوده تا کمی آلوده و کمتر از ۰/۵ درصد منطقه کمی آلوده (۲/۶ هکتار) می‌باشد. برای عنصر سرب، حدود ۹۸ درصد از سطح اراضی زراعی منطقه (۱۸۵۵ هکتار) در کلاس کمی آلوده و تنها یک درصد از سطح منطقه معادل ۲۱ هکتار در کلاس کمی آلوده تا خیلی آلوده قرار گرفتند.

نقشه‌های پراکنش شاخص فاکتور آلودگی در منطقه مورد مطالعه برای عنصر کادمیوم نشان داد که بیش از ۹۳ درصد از سطح اراضی زراعی منطقه (۱۷۶۲ هکتار) در کلاس آلودگی متوسط قرار گرفت. در حالیکه نتایج شاخص فاکتور آلودگی برای عنصر سرب مبین قرار گرفتن بیش از ۹۸ درصد از سطح اراضی منطقه (۱۸۵۶ هکتار) در کلاس آلودگی زیاد و حدود ۱ درصد از سطح

شاخص RI می‌تواند برآورد جامعی از خطرات زیستی فلزات سنگین در محیط را ارائه نماید (Hakanson, 1980). مقادیر شاخص RI نشان داد که حدود ۹۰ درصد نمونه‌های خاک در کلاس خطر قابل توجه و ۱۰ درصد آنها در کلاس خطر بسیار بالای آلودگی قرار دارند. نتایج شاخص PLI نیز نشان داد که تمامی نمونه‌های خاک مورد مطالعه در کلاس خاک‌های آلوده قرار گرفت.

نظر به پیوستگی تغییرات مکانی مواد مادری خاک و تمرکز فعالیت‌های بشری مخرب محیط زیست در مکان‌های خاص و محدود، بی شک نسبت اثرگذاری عوامل طبیعی و انسانی بر غلظت فلزات سنگین در خاک در بعد مکان، تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد. این در حالی است که داشتن اطلاعات صحیح از الگوی تغییرات مکانی غلظت فلزات سنگین در خاک، پیش شرط طراحی برنامه‌های کنترل آلودگی است (Yang et al., 2009).

عوامل طبیعی و انسانی بر غلظت فلزات سنگین در خاک در بعد مکان، تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد. این در حالی است که داشتن اطلاعات صحیح از الگوی تغییرات مکانی غلظت فلزات سنگین در خاک، پیش شرط طراحی برنامه‌های کنترل آلودگی است (Yang et al., 2009). ارزیابی صحیح ریسک آلودگی‌های زیست محیطی، مستلزم توجه هم زمان به تمامی آلاینده‌های موجود است. حال آن که ظهور عناصر مختلف در دامنه‌های متفاوتی از مقادیر، امکان انطباق نقشه‌های تک عنصری و تصور کیفیت کلی خاک را با مشکل مواجه می‌سازد (Romic et al., 2007) از این رو، به نظر می‌رسد که بتوان با مدل سازی تغییرات مکانی شاخص‌های بار آلودگی و پتانسیل خطر زیست محیطی فلزات سنگین به اطلاعات سودمندی راجع به اثرات الگوی پراکنش مکانی هر یک از فلزات سنگین بر کیفیت کلی خاک دست یافت.

از آن جا که روش‌های کمی ارزیابی آلودگی خاک به مقادیر غلظت مرجع تکیه دارند یک مشکل عمده در ارتباط با روش صحیح ارزیابی آلودگی خاک، شناسایی مقادیر مناسب مرجع در شرایطی است که خاک آلوده نشده است (Desaules, 2012). مقادیر مرجع معمول مورد استفاده شامل غلظت زمینه، غلظت پوسته زمین و مقادیر مرجع نظارتی هستند که مناسب‌ترین مرجع، غلظت زمینه منطقه مورد مطالعه است (Reimann and Caritat, 2000). از این رو پیشنهاد می‌شود به منظور اطمینان از صحت ارزیابی شاخص‌های آلودگی منطقه مورد مطالعه، در مطالعات بعدی تعیین غلظت زمینه منطقه مورد بررسی قرار گیرد.

منطقه (۲۹ هکتار) در کلاس آلودگی خیلی زیاد می‌باشد. نقشه‌های پهنه بندی شاخص‌های PLI و RI نیز مبین آلودگی تمام سطح منطقه می‌باشد (شکل ۴). براساس شاخص پتانسیل خطر زیست محیطی (RI)، حدود ۹۸ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه (۱۸۵۷ هکتار) در کلاس خطر قابل توجه و حدود ۲ درصد از سطح منطقه (۳۳ هکتار) در کلاس خطر بسیار زیاد قرار گرفتند.

براساس شاخص I_{geo} و CF می‌توان بیان نمود که آلودگی اراضی به عنصر کادمیوم در بخش غربی منطقه مورد مطالعه دارای کمترین مقدار می‌باشد. قسمت اعظم منطقه مورد مطالعه از لحاظ شاخص‌های I_{geo} و CF از لحاظ عنصر سرب آلوده بود. در خاک‌های کشاورزی منابع آلودگی فلزات سنگین می‌تواند ناشی از نزدیکی به مراکز استخراج معدن، کارخانجات صنعتی، نزدیکی به بزرگراه‌ها (Harrison et al., 1981)، استفاده زیاد از کودهای شیمیایی، لجن فاضلاب و آفت‌کش‌ها (Wei and Linsheng, 2010) باشد. الگوی مکانی پراکنش فاکتور آلودگی تا حد زیادی شبیه الگوی مکانی شاخص زمین انباشت است. با این تفاوت که طبق این شاخص، شدت آلودگی بیشتر برآورد گردیده است (شکل ۴) که این موضوع می‌تواند به دلیل ضریبی باشد که در محاسبه آلودگی خاک توسط شاخص زمین انباشت استفاده می‌شود. به عبارت دیگر شاخص زمین انباشت در برآورد آلودگی خاک محتاط تر عمل می‌کند (Wu et al., 2014).

نظر به پیوستگی تغییرات مکانی مواد مادری خاک و تمرکز فعالیت‌های بشری مخرب محیط زیست در مکان‌های خاص و محدود، بی شک نسبت اثرگذاری

References

- Afshari, A., Khademi, H., Hojati, S., 2016. Assessment of heavy metals pollution risk in soils of central Zanjan province based on pollution indices. *Journal of Water and Soil Conservation* 22(6), 21-40 (in Persian).
- AliEhiai, M., 1997. Methods of soil chemical analysis. Technical publication No. 1024. Soil and Water Research Institute (in Persian).

- Anagnostou, C., Kaberi, H., Karageorgis, A., 1997. Environmental impact on the surface sediments of the bay and the gulf of Thessaloniki (Greece) according to the geoaccumulation index classification. *International Conference on Water Pollution, Slovenia*. pp. 269-275.
- Andem, A. B., Okorafor, K. A., Oku, E. E., Ugwumba, A. A., 2015. Evaluation and characterization of trace metals contamination in the surface sediment using pollution load Index (PLI) and geo-accumulation index (I_{geo}) of ona River, Western Nigeria. *International Journal of Scientific & Technology Research* 4(1), 29-34.
- Angulo, E., 1996. The Tomlinson's pollution load index applied to heavy metal "Mussel- Watch" data: a useful index to assess coastal pollution. *Science of the Total Environment* 187, 19-56.
- Bagheri, Y. R., Meskini-Vishkaee, F., Mirkhani, R., 2016. Soil pollution assessment to lead, nickel and cadmium and mapping it by geostatistics in the Tehran south farms. . *Journal of Environmental Science and Technology* (accepted) (in Persian).
- Barbieri, M., 2016. The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (I_{geo}) to evaluate the Soil Contamination. *Journal of Geological Geophysics* 5(1), 1-4.
- Bhuiyana, M. A. H., Parvez, L., Islam, M. A., Dampare, S. B., Suzukia, S., 2010. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials* 173, 384-392.
- Dadgar, M., Shahsavari, A., Yousefzadeh, A., 2010. Evaluation of Cd variation in plain absard of Tehran. *International Conference of plant, water, soil and air modeling, Kerman, Iran* (in Persian).
- Desaules, A., 2012. Critical evaluation of soil contamination assessment methods for trace metals. *Science of the Total Environment* 426, 120-131.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach. *Water Research* 8, 975-1001.
- Harrison, R. M., Laxen, D. P. H., Wilson S. J., 1981. Chemical associations of lead, cadmium, copper, and zinc in street dusts and roadside soils. *Environmental Science & Technology* 15, 1378-1383.
- Ji, Y. Q., Feng, Y. C., Wu, J. H., Zhu, T., Bai, Z. P., Duan, C. Q., 2008. Using geo-accumulation index to study source profiles of soil dust in China. *Journal of Environmental Sciences* 20, 571-578.
- Karbassi, A. R., Nabi-Bidhendi, Gh.R., Bayati I., 2005. Environmental geochemistry of heavy metals in a sediment core off Bushehr, Persian Gulf, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 2(4), 225-260.
- Kartal, S., Aydin, Z., Takalioglu, S., 2006. Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data. *Journal of Hazardous Materials* 132, 80-89.
- Kharat Sadeghi, M., Karbasi, A.R., 2008. Estimation of environmental pollution EF and I_{geo} indices Shirud river in order to maintain sustainable development criteria. *Journal of Environmental Science and Technology* 1, 29-39 (in Persian).
- Mardani, G, Sadeghi, M., Ahankoob, M., 2010. Soil Pollution along the Surface Runoff in Southern Tehran. *Journal of Water and Wastewater* 3, 108-113 (in Persian)
- Mirzaii, R., Seifi, Y., 2016. Comparison of spatial interpolation for zoning concentrations of heavy metals in surface soil of Aran Bidgol city. *Journal of Environmental Science and Technology* (online) (in Persian).
- MollaHosseini, H., Baghoury, A., 2002. Evaluation of intensively and extent of the contamination of soils to heavy metals and determination of their value in plants irrigated with sullage. Final report of Soil and Water Research Institute (in Persian).
- Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., González-Hernández, G., Romero, F., Lozano, R. and Beramendi-Orosco, L. E., 2009. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration* 101, 218-224.
- Nayanaka, V. G. D., Vitharana, W. A. U., Mapa, R. B., 2010. Geostatistical Analysis of Soil Properties to Support Spatial Sampling in a Paddy Growing Alfisol. *Tropical Agricultural Research* 22, 34-44.
- Rahimpour, F., Ali Abaspour, R., 2014. Mapping concentrations of heavy metals in soils using Kriging and RBF Case study: Harris Township. *Journal Management system* 23, 55-67 (in Persian).

- Ravankhah, N., Mirzaei, R., Masoum, S., 2015. Evaluation of Geoaccumulation Index, Contamination Factor, and Principal Component Analysis for Estimating Soil Contamination. *Iranian Journal of Health & Environment* 8(3), 345-356 (in Persian).
- Reimann, C., Caritat, P. D., 2000. Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science & Technology* 34(24), 5084-5091.
- Romic, M., Hengl, T., Romic, D., Husnjak, S., 2007. Representing soil pollution by heavy metals using continuous limitation scores. *Computers & Geosciences* 33, 1316-1326.
- Safari, Y., Delavar, M. A., Esfandiarpour Borujeni, I., Salehi, M. H., Owliaie, H. R., 2016. Assessment of heavy metals using pollution load index in Zanjan Zinc Industrial Town area. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 6(2), 119-133 (in Persian).
- Sekabira, K., Oryem Origa, H., Basamba, T.A., Mutumba, G. and Kakudidi, E., 2010. Assessment of heavy metal pollution in the urban stream sediments and its tributaries. *Journal of Environmental Science and Technology* 7, 435-446.
- Shahbazi, A., Safianian, A., Mir Ghafari, N., Ein Ghalaii, M.R., 2012. Evaluation soil heavy metal contamination using by contamination factor, geoaccumulation and comprehensive pollution factor indices (Case study: Nahavand). *Environment and development Journal* 5, 31-38 (in Persian).
- Shariati, M., Sabagh Farshi, R., Ghorghani Nezhad, A., 1989. Evaluation heavy metal concentration in crops and land south of Tehran. *Technical Publications of Soil and Water Research institute*. 5, 3-4 (in Persian).
- Sun, Y., Zhou, Q., Xie, X., Liu, R., 2010. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China. *Journal of Hazardous Materials* 174, 455-462.
- Tokalioglu, S., Kartal, S., Birol, G., 2003. Application of a three-stage sequential extraction procedure for the determination of extractable metal contents in highway soils. *Turkish Journal of Chemistry* 27, 333-346.
- Tomlinson, D. C., Wilson, J. G., Harris, C. R., Jeffrey, D. W., 1980. Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen* 33, 566-575.
- Torabian, A., Baghouri, A., 1997. Study of pollution caused by the use of municipal and industrial wastes on agricultural lands south of Tehran. *Journal of Environmental Studies* 18. (in Persian).
- Wei, B., Linsheng, Y., 2010. A review of heavy metal contamination in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal* 94, 99-107.
- Wu, J., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., Jiao, X., 2014. Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. *PLoS One* 9(11), e112917.
- Yang, P., Mao, R., Shao, H., Gao, Y., 2009. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China. *Comptes Rendus Biologies* 332, 558-566.
- Zhang, X. Y., Sui, Y. Y., Zhang, X. D., Herbert, K. S. J., 2007. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere* 17(1), 19-29.