مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
ص ۳۷-۵۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲
تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹

بررسی میزان آلودگی و غنی‌شدگی فلزات سنگین (مطالعهٔ موردی: شهرک صنعتی شیراز و اراضی اطراف آن)

❖ **اسفندیار جهانتاب*؛** استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران.

❖ **علی نجم‌الدین؛** پژوهشگر پسا دکتری زمین‌شناسی زیست‌محیطی، گروه زمین‌شناسی، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

آلودگی فلزات سنگین یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی است که در سراسر دنیا در حال گسترش می‌باشد. هدف از این پژوهش تعیین میزان آلودگی و غنی‌شدگی فلزات سنگین در داخل و اراضی اطراف شهرک صنعتی شیراز است. برای رسیدن به این هدف، تعداد ۲۰ نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر از داخل و اطراف شهرک صنعتی شیراز برداشت شده و غلظت فلزات سرب، کروم، آلومینیم، منگنز، مس، روی، استرانسیم، وانادیم، نیکل، کبالت، اسکاندیم، آهن و آرسنیک در آن‌ها با استفاده از روش ICP-MS بررسی شد. نتایج نشان داد غلظت میانگین عناصر مس، سرب، منگنز، کروم، آلومینیم، روی، استرانسیم، وانادیم، نیکل، کبالت، آهن، آرسنیک و اسکاندیم به ترتیب ۷۵، ۸۷/۹، ۵۴۱/۶، ۱۴۳/۳، ۲۱۸۰۴/۸، ۲۷۵/۴، ۴۳۹/۹، ۱۷۳/۳، ۵۵/۴، ۱۲/۰، ۵۰۵۷۹/۳، ۴/۸ و ۴/۷ میلی‌گرم و بر کیلوگرم می‌باشد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت همهٔ عناصر به جز آلومینیم (۲۱۸۰۴/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و اسکاندیم (۴/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بسیار بیشتر از مقادیر غلظت این عناصر در خاک‌های جهانی است. علاوه بر این، در مقایسه با استانداردهای کشورهای چین و کانادا نیز عناصر مس، سرب، روی، وانادیم و کروم غلظت‌های بسیار بیشتری از مقادیر استاندارد را نشان می‌دهند. محاسبهٔ ضریب غنی‌شدگی عناصر مذکور در نمونه‌های خاک نشان‌دهندهٔ غنی‌شدگی زیاد عناصر مس (۸/۳۲)، سرب (۵/۴۲)، روی (۷/۰۴)، استرانسیم (۵/۱۵)، وانادیم (۵/۰۴) و کروم (۵/۳۴) است. نتایج تحقیق حاضر گویای آن است که خاک‌های منطقه آلوده به فلزات مس، سرب، وانادیم، منگنز و روی هستند، لذا پیشنهاد می‌شود بایستی با روش‌های مختلف سعی در کاهش فلزات در محیط داشت.

کلید واژگان: فلزات سنگین، آلودگی خاک، فعالیت‌های صنعتی، شاخص غنی شدگی، شاخص زمین انباشت.

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۹۸۹۱۷۱۴۸۵۴۰۶+
Email: e.jahantab@fasau.ac.ir

۱. مقدمه

خاک به عنوان بخشی از چرخهٔ زیست‌زمین‌شیمیایی، در چرخهٔ عناصر نقش مهمی ایفا می‌کند [۱۹]. دلیل این موضوع می‌تواند نقش این محیط به عنوان عامل ورود عناصر گوناگون به چرخه‌های زیستی جانوری و گیاهی باشد [۲۴]. در اکوسیستم‌های خشکی، خاک نقش عمده‌ای در چرخهٔ عناصر ایفا می‌کند [۴]. از آغاز انقلاب صنعتی، آلودگی فلزات سنگین در بیوسفر، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است و به یک نگرانی جدی زیست‌محیطی تبدیل شده است. سطح وسیعی از مناطق با فلزات سنگین مانند مس، روی، سرب، نیکل، جیوه و کادمیم آلوده شده است [۱۸]. توسعهٔ صنعت و کشاورزی باعث رهاسازی شدید فلزات سنگین در محیط زیست شده و مشکلات جدی برای محیط زیست و سلامتی بشر ایجاد کرده است. وجود فلزات سنگین در محیط زیست نتیجه فعالیت‌های طبیعی خاکسازی (پدوژنیک) و انسان ساخت (آنتروپوژنیک) است [۱۷]. عناصر سنگین از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیست به شمار می‌آیند که در چند دههٔ اخیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. سالانه هزاران تن از این عناصر که ناشی از فعالیت‌های شهری، صنعتی و کشاورزی است، وارد خاک می‌شود [۲]. فلزات سنگین در اثر فعالیت‌هایی نظیر؛ سوزاندن سوخت‌های فسیلی، معدن‌کاوی، صنایع ذوب فلزات، زباله‌های شهری، استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و لجن فاضلاب وارد خاک می‌شود [۱۰].

در چند دههٔ اخیر نگرانی‌های زیادی به دلیل مشکل آلودگی خاک‌های مناطق شهری و حومه با فلزات سنگین با توجه به افزایش شهرنشینی و صنعتی شدن به وجود آمده است [۲۶]. تجمع صنایع و کارخانجات در شهرک‌های صنعتی و حجم آلودگی‌های تولید شده در این مراکز که اغلب در نزدیکی شهرها هستند سبب شده تا ملاحظات زیست محیطی در این مراکز از اهمیت و حساسیت بیشتری برخوردار باشد [۱، ۲۸]. از جمله مطالعاتی که در زمینهٔ بررسی غلظت فلزات سنگین در مراکز صنعتی صورت گرفته است می‌توان به تحقیقات: ارزیابی میزان آلودگی برخی از فلزات سنگین در خاک سطحی شهرک صنعتی سمنان و اراضی اطراف آن [۲۶]؛ بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی اطراف شهرک صنعتی شمارهٔ ۲ اهواز [۲۷]؛ بررسی میزان آلودگی جیوه در خاک شهرک‌های صنعتی اراک [۳۱]؛ بررسی میزان فلزات سنگین در خاک‌های شهری سویل، اسپانیا [۲۱]، ارزیابی غلظت فلزات در رسوبات و اثرات فعالیت‌های صنعتی در هیندون، هندوستان [۳۲]، آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی اهواز [۶]، توزیع فلزات سنگین در خاک‌های منطقهٔ صنعتی سورودوینسک (Severodvinsk) روسیه [۳۵] و بررسی غنی‌سازی فلزات سنگین در خاک‌های منطقهٔ داکا [۵] اشاره کرد.

شهرک صنعتی شیراز که در جنوب این شهر واقع شده است با وسعت تقریبی ۱۴۰۰ هکتار، یکی از بزرگترین و مهم‌ترین شهرک‌های صنعتی کشور محسوب می‌شود. بنابراین با توجه به گستردگی واحدهای صنعتی، غلظت آلاینده‌های عنصری و آلی در خاک‌های سطحی می‌تواند به مقادیر بیشتر از حد استاندارد رسیده و مشکلات سلامتی جدی را برای ساکنین به وجود آورد. در همین راستا، در این پژوهش اثر صنایع بزرگ مقیاس واقع در داخل و اطراف شهر شیراز بر خاک‌های سطحی بررسی شده است. بنابراین، تحقیق حاضر با هدف تعیین میزان آلودگی و غنی شدگی فلزات سرب، کروم، آلومینیم، منگنز، مس، روی، استرانسیم، وانادیم، نیکل، کبالت، اسکاندیم، آهن و آرسنیک در خاک‌های داخل و اطراف شهرک صنعتی شیراز انجام شد.

۲. روش شناسی

۱،۲. معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

شیراز مرکز استان فارس در طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۳۵ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۱ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه، با مساحتی در حدود ۱۲۶۸ کیلومترمربع، واقع شده است.

این محدوده در بلوک ۹۹ از نقشهٔ ۱:۲۵۰۰۰۰ شیراز و نقشهٔ زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیراز از انتشارات سازمان زمین‌شناسی و در محدودهٔ نقشهٔ توپوگرافی با شماره III NW ۶۵۴۹ قرار دارد. شیراز پنجمین شهر بزرگ ایران است و در فاصلهٔ ۹۱۹ کیلومتری تهران واقع شده و مساحت آن ۳۴۰ کیلومتر مربع می‌باشد. از کل مساحت این شهرستان ۶۰/۴ درصد را مناطق کوهستانی و تپه ماهور و ۳۹/۶ درصد را مناطق پست و دشت‌ها را تشکیل می‌دهند. شیراز در ارتفاع ۱۴۸۶ متری از سطح دریا در دامنهٔ کوه‌های دراک، بمو، سبز پوشان، چهل مقام و باباکوهی (از رشته کوه زاگرس) واقع شده است. در سمت شمال چند رشته کوه به موازات یکدیگر امتداد یافته که بلندترین این رشته کوه‌ها به نام کوه بمو می‌باشد.

۲,۲. روش تحقیق

جهت انجام تحقیق حاضر، در گام اول تعداد ۲۰ نمونه در خردادماه سال ۱۳۹۸ از عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری از داخل و اطراف شهرک صنعتی شیراز برداشت شد. نمونه‌برداری به روش هدفمند به منظور بررسی نقش واحدهای صنعتی مختلف در آلودگی خاک‌های صنعتی اطراف انجام شد. همچنین نمونه‌برداری به روش مرکب (Composite) انجام شده است. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شد و جهت آماده‌سازی به آزمایشگاه منتقل شد. به منظور بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی، تمامی نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. در مرحلهٔ بعدی، جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر به روش ICP-MS، نمونه‌ها از الک ۲۲۰ مش عبور داده شدند. غلظت عناصر به وسیلهٔ دستگاه ICP-MS در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما اندازه‌گیری شد. جهت بررسی نمونه‌های خاک، از روش چهار اسید استفاده شد. همچنین پارامترهای فیزیکو-شیمیایی شامل بافت خاک، pH، هدایت الکتریکی (EC)، محتوای مادهٔ آلی (OM) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد [۱۲].

۳,۲. محاسبه شاخص‌های آلودگی

۱.۳.۲. شاخص زمین انباشت (Geoaccumulation Index)

شاخص زمین انباشت برای تعیین و توصیف آلودگی فلز در محیط، توسط [۲۵] ارائه و سپس توسط سایر پژوهشگران تکمیل شد. این ضریب با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد:

$$Igeo = {}^{Log_{۲}\, Cn}/_{۱.۵\, Bn}$$

در این رابطه C_n غلظت عنصر در نمونه خاک و B_n، غلظت عنصر در نمونه زمینه یا مرجع می‌باشد [۸]. در این پژوهش، میانگین خاک‌های جهانی به عنوان نمونه زمینه یا مرجع در نظر گرفته شد [۳] و پس از محاسبه، با استفاده از رده‌بندی ارائه شده کیفیت خاک تعیین گردید (جدول ۱).

جدول ۱. رده‌بندی کیفیت خاک بر مبنای مقدار شاخص زمین‌انباشت (مولر، ۱۹۶۹)

تعیین کیفیت خاک	رده Igeo	مقدار Igeo
آلودگی خیلی زیاد	۶	۵<
آلودگی زیاد تا خیلی زیاد	۵	۴-۵
آلودگی زیاد	۴	۳-۴
آلودگی متوسط تا زیاد	۳	۲-۳
آلودگی متوسط	۲	۱-۲
ناآلوده تا آلودگی متوسط	۱	۰-۱
ناآلوده	۰	۰

۲.۳.۲. ضریب غنی‌شدگی (Enrichment Factor)

ضریب غنی‌شدگی روشی مؤثر برای ارزیابی غلظت آلاینده‌های فلزی در خاک است. این ضریب از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$EF = \frac{\left(\frac{X}{RE}\right)_{sample}}{\left(\frac{X}{RE}\right)_{baseline}}$$

در رابطهٔ بالا، $\left(\frac{X}{RE}\right)_{sample}$ نسبت غلظت عنصر مورد نظر به عنصر مرجع در نمونه خاک و $\left(\frac{X}{RE}\right)_{baseline}$ نسبت غلظت عنصر مورد نظر به عنصر مرجع در نمونهٔ زمینه است.

در محاسبهٔ ضریب غنی شدگی، غلظت فلزات سنگین با استفاده از یک عنصر مرجع بهنجار می‌شود [۲۲]. پرکاربردترین عناصر مرجع در محاسبهٔ ضریب غنی‌شدگی شامل آهن، آلومینیم، اسکاندیم و تیتانیم می‌باشند [۵]. برای نمونه مرجع نیز از غلظت‌های زمینه زمین‌شیمیایی منطقه و یا از مقادیر شیل میانگین، خاک‌های جهانی و یا پوستهٔ بالایی استفاده می‌شود [۲۴]. در این پژوهش اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع و میانگین خاک‌های جهانی به عنوان محیط مرجع در نظر گرفته شد. بر مبنای ضریب غنی شدگی، ۵ ردهٔ آلودگی تعریف می شود که در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. رده‌بندی ضریب غنی‌شدگی (Chabukdhara et al., 2012)

ضریب غنی‌شدگی	رده
کمبود یا غنی‌شدگی کمینه	<۲
غنی‌شدگی متوسط	۲-۵
غنی‌شدگی قابل‌توجه	۵-۲۰
غنی‌شدگی بسیار زیاد	۲۰-۴۰
بیش از حد بالا	>۴۰

۳.۳.۲. شاخص خطر بالقوهٔ بوم‌شناختی

برای ارزیابی خطر بوم‌شناختی فلزات سمناک در خاک، از شاخص خطر بالقوهٔ بوم‌شناختی استفاده می‌شود. این روش اولین بار توسط هاکانسون در سال ۱۹۸۰ ارائه شده است. این شاخص توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_r^i = C_s^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i$$

$$RI = \sum_{r=1}^{n} E_r^i$$

در این روابط C_r^i شاخص آلودگی هر فلز، C_s^i غلظت فلز در نمونه، C_n^i غلظت فلز در نمونهٔ زمینه، E_r^i ضریب خطر بالقوهٔ بوم‌شناختی، T_r^i ضریب پاسخ فلز سنگین است که توسط هاکانسون برای عناصر مختلف تعیین شده است (Zn=1 < Cr=2 < Cu=Ni=Pb=5 < AS=10 < Cd=30 < Hg=40). همچنین در این فرمول‌ها RI شاخص خطر بالقوهٔ بوم‌شناختی برای آلودگی کلی فلزی است. رده‌بندی RI و E_r^i در جدول (۳) ارائه شده است [۳۶].

۴.۲. تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی نرمال بودن یا نبودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (KS) استفاده شد. با توجه به اینکه غلظت عناصر در نمونه‌های خاک صنعتی دارای توزیع غیرنرمال است از ضریب همبستگی اسپیرمن برای تفسیر روابط بین فلزات سنگین استفاده شد. از

آزمون آزمون کروسکال-والیس برای مقایسهٔ غلظت عناصر مختلف بین صنایع مختلف موجود در منطقه استفاده شد. آنالیزها در نرم‌افزار SPSS20 انجام شد.

جدول۳. درجات خطر بالقوهٔ بوم‌شناختی(Zheng et al. 2010)

	کم	متوسط	قابل توجه	زیاد	بسیار زیاد
E_r^i	۴۰ <	۴۰- ۸۰	۸۰ -۱۶۰	۱۶۰- ۳۲۰	≥۳۲۰
RI	۱۵۰ <	۱۵۰ -۳۰۰	۳۰۰ -۶۰۰	≥۶۰۰	

۳. نتایج

۱,۳. پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک

نتایج نشان داد که pH خاک از ۶/۲ تا ۹/۷ متغیر است که در محدودهٔ کمی اسیدی تا قلیایی قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که بافت غالب خاک در منطقهٔ مطالعاتی، لوم رسی ماسه‌ای و لوم رسی است. بر اساس نتایج، CEC از ۷/۵۵ میلی اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم تا ۵۴/۷۳ میلی اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم تغییر می‌کند. میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی ۲۱/۶۱ میلی اکی والان بر ۱۰۰ گرم می‌باشد. در منطقهٔ مطالعاتی هدایت الکتریکی نمونه‌های خاک در محدودهٔ ۱۹/۱۶-۶/۷۹ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر می باشد. میانگین هدایت الکتریکی نمونه های خاک ۱۱/۸۹ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی به طور میانگین دارای ۶/۶۹ درصد مواد آلی می‌باشند.

۲,۳. زمین‌شیمی عناصر بالقوهٔ سمی

برای مقایسهٔ غلظت عناصر با محیط‌های مرجع از غلظت عناصر در خاک‌های جهانی استفاده شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که میانگین غلظت همهٔ عناصر به جز آلومینیم و اسکاندیم بسیار بیشتر از مقادیر غلظت این عناصر در خاک‌های جهانی است. همچنین، مقادیر میانه غلظت این عناصر نیز بیشتر از خاک‌های جهانی است. از این میان، غلظت بسیار زیاد عناصری مانند مس، سرب، روی، وانادیم و کروم نسبت به میانگین جهانی قابل توجه است. به عنوان مثال، بیشینهٔ غلظت عناصر مس، سرب، روی و وانادیم در نمونه‌های خاک صنعتی شهر شیراز به‌ترتیب ۱۵۳ میلی‌گرم برکیلوگرم، ۲۱۵ میلی‌گرم برکیلوگرم، ۴۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۸۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم است.

برای بررسی تغییرات غلظت عناصر در نمونه‌های خاک صنعتی از ضریب تغییرات (coefficients of variation) یا CV استفاده شده است. این ضریب از تقسیم مقادیر انحراف معیار بر میانگین عناصر به‌دست می‌آید. اگر مقدار CV بیشتر از ۰/۳ باشد، نشان‌دهندهٔ تغییرات زیاد و ناهمگونی در داده‌ها است. با توجه به این موضوع، غلظت عناصر مس، سرب، روی، کبالت، منگنز، آهن، آرسنیک و وانادیم در نمونه‌های خاک صنعتی شهر شیراز تغییرات زیادی دارد (جدول ۴).

غلظت عناصر با بیشینهٔ غلظت مجاز ارائه شده در خاک‌های صنعتی توسط سازمان‌های حفاظت محیط زیست ایران، چین و کانادا مقایسه شده است (جدول ۴). غلظت عناصر مس، روی، وانادیم، کروم و سرب در برخی از ایستگاه‌ها بیشتر از حدود مجاز می‌باشد. همچنین در مقایسه با استانداردهای کشورهای چین و کانادا نیز عناصر مس، سرب، روی وانادیم و کروم غلظت‌های بسیار بیشتری از مقادیر استاندارد را نشان می‌دهند.

جدول ۴. خلاصهٔ آماری غلظت عناصر انتخاب شده در نمونه‌های خاک شهرک صنعتی شیراز و اراضی آن و مقایسهٔ با مقادیر آن‌ها در خاک‌های جهانی و استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران، چین و کانادا برای کیفیت خاک (غلظت برای تمام عناصر بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

عنصر	آلومینیم (Al)	کروم (Cr)	منگنز (Mn)	سرب (Pb)	مس (Cu)	روی (Zn)	نیکل (Ni)	کبالت (Co)	آهن (Fe)	آرسنیک (As)	وانادیم (V)	استرانسیم (Sr)	اسکاندیم (Sc)
میانگین	۲۱۸۰۴/۸	۱۴۳/۳	۵۴۱/۶	۸۷/۹	۷۵/۰	۲۷۵/۴	۵۵/۴	۱۲/۰	۵۰۵۷۹/۳	۴/۸	۱۷۳/۳	۴۳۹/۹	۴/۷
میانه	۲۲۰۵۰/۰	۱۳۵/۰	۴۹۴/۵	۸۹/۰	۷۲/۰	۲۸۳/۰	۵۶/۰	۱۰/۸	۴۱۷۰۹/۵	۴/۷	۱۲۲/۵	۵۰۶/۸	۴/۷
انحراف معیار	۴۰۳۴/۰	۳۵/۴	۲۸۲/۷	۴۶/۲	۳۲/۶	۹۴/۶	۸/۹	۴/۴	۲۷۵۶۱/۷	۱/۷	۱۷۸/۳	۶۸/۸	۰/۹
واریانس	۱۶۲۷۲۹۷۵۳	۱۲۵۳/۱	۷۹۹۱۰/۲	۲۱۳۰/۸	۱۰۵۹/۶	۸۹۴۹/۷	۷۹/۷	۱۹/۲	۷۵۹۶۴۶۴۳۸۶	۳/۰	۳۱۷۷۸/۷	۴۷۲۷/۳	۰/۸
ضریب چولگی	۰/۳ -	۱/۰	۳/۹	۱/۱	۰/۸	۰/۱	۰/۵	۱/۵	۰/۶	۰/۴-	۳/۵	۱/۰-	۰/۲
ضریب کشیدگی	۰/۷	۰/۵	۱۶/۳	۱/۴	۰/۱	۰/۵ -	۰/۷	۲/۶	۰/۹ -	۰/۸-	۱۳/۵	۱/۵	۰/۵-
کمینه	۱۲۰۲۲/۰	۱۰۲/۰	۳۶۱/۰	۳۴/۰	۳۵/۰	۱۳۰/۰	۴۱/۰	۷/۰	۲۲۰۴۰/۰	۱/۴	۶۳/۰	۳۰۹/۲	۳/۰
بیشینه	۲۸۸۱۳/۰	۲۲۷/۰	۱۶۹۱/۰	۲۱۵/۰	۱۵۳/۰	۴۶۵/۰	۷۷/۰	۲۴/۷	۱۰۰۰۰۰/۰	۷/۳	۸۷۱/۰	۵۹۹/۴	۶/۴
خاک‌های جهانی	۷۱۰۰۰/۰	۴۲/۰	۴۱۸/۰	۲۵/۰	۱۴/۰	۶۲/۰	۱۸/۰	۶/۹	۴۷۰۰۰/۰	۴/۷	۶۰/۰	۱۴۷/۰	۷/۰
ضریب تغییرات (CV[a])	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۴۳	۰/۳۴	۰/۱۶	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۳۶	۱/۰۳	۰/۱۴	۰/۱۹
استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران (ISQGs[b])	-	۱۷۰/۰	-	۸۰/۰	۴۰۰/۰	۵۰۰/۰	۱۵۵/۰	۵۰/۰	-	۴۰/۰	۲۰۰/۰	-	-
استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست چین (ChSQGS[c])	-	۲۰۰/۰	-	۳۰۰/۰	۱۰۰/۰	۲۵۰/۰	۵۰/۰	-	-	۲۰/۰	-	-	-
استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست کانادا (CSQGs[d])	-	۶۴/۰	-	۱۴۰/۰	۶۳/۰	۲۰۰/۰	۴۵/۰	۵۰/۰	-	۱۲/۰	۱۳۰/۰	-	-

a. Coefficient of variation
b. Iranian soil quality guidelines (IDOE 2014)
c. China soil quality guidelines (NEPAC 1995)
d. Canadian soil quality guidelines (CCME 2007).

میانگین غلظت عنصر مس در خاک های منطقهٔ مطالعاتی، ۷۵ میلی‌گرم برکیلوگرم می‌باشد. غلظت این عنصر در تمامی نمونه‌ها از استاندارد حفاظت محیط زیست ایران برای خاک کمتر است. میانگین غلظت عنصر روی در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۲۷۵/۴ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. در مقایسه با استاندارد حفاظت محیط زیست ایران، غلظت این عنصر در تمامی ایستگاه‌ها از مقدار استاندارد (۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمتر است ولی در مقایسه با استانداردهای چین (۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کانادا (۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در بسیاری از نمونه‌ها غلظت عنصر روی بیشتر از حد استاندارد ارائه شده است، که نشان‌دهندهٔ آلودگی این عنصر در خاک‌های سطحی منطقهٔ مطالعاتی است و نیاز به توجه بیشتر به منظور کاهش غلظت این عنصر در محیط و پاکسازی خاک‌های آلوده است.

میانگین غلظت عنصر نیکل در خاک های منطقهٔ مطالعاتی، ۵۵/۴ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. در مقایسه با استاندارد حفاظت محیط زیست ایران، غلظت این عنصر

در تمامی ایستگاه‌ها از مقدار استاندارد (۱۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمتر است ولی در مقایسه با استانداردهای چین (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کانادا (۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در بسیاری از نمونه‌ها غلظت عنصر نیکل بیشتر از حد استاندارد ارائه شده است. میانگین غلظت عنصر کبالت در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۱۲ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. در مقایسه با استانداردهای حفاظت محیط زیست ایران، چین و کانادا غلظت این عنصر در تمامی ایستگاه‌ها از مقدار استاندارد (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمتر است که بیانگر غیرآلوده بودن خاک‌های منطقه نسبت به این عنصر است.

میانگین غلظت عنصر آهن در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۵۰۵۷۹/۳ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. باید توجه داشت که برای عنصر آهن نیز مانند عنصر منگنز در خاک‌های صنعتی استانداردی تعریف نشده است. میانگین غلظت عنصر آرسنیک در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۴/۸ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. غلظت این عنصر در منطقهٔ مطالعاتی از تمامی استانداردهای حفاظت محیط زیست ایران، چین و کانادا کمتر است که بیانگر غیرآلوده بودن خاک‌های منطقه نسبت به این عنصر است.

میانگین غلظت عنصر وانادیم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۱۷۳/۳ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. در مقایسه با استاندارد حفاظت محیط زیست ایران، غلظت این عنصر در بسیاری از ایستگاه‌ها از مقدار استاندارد (۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر است، که نشان‌دهندهٔ آلودگی این عنصر در خاک‌های سطحی منطقهٔ مطالعاتی است و نیاز به توجه بیشتر به منظور کاهش غلظت این عنصر در محیط و پاکسازی خاک‌های آلوده است. اگر غلظت این عنصر را با استاندارد کانادا (۱۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مقایسه کنیم؛ ۵۰ درصد از نمونه‌ها غلظت وانادیم بیشتری از مقدار استاندارد دارند. میانگین غلظت عنصر استرانسیم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۴۹۳/۹ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. باید توجه داشت که برای عنصر استرانسیم نیز مانند عناصر منگنز، آلومینیم و آهن در خاک‌های صنعتی استانداردی تعریف نشده است.

میانگین غلظت عنصر اسکاندیم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۴/۷ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد باید توجه داشت که برای عنصر اسکاندیم نیز مانند عناصر استرانسیم، منگنز، آلومینیم و آهن در خاک‌های صنعتی استانداردی تعریف نشده است. به طور کلی تحرک زمین‌شیمیایی این عنصر در محیط خاک کم بوده و به ندرت سمناکی این عنصر برای گیاهان و جانوران مشاهده شده است. میانگین غلظت عنصر سرب در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۸۷/۹ میلی‌گرم برکیلوگرم می‌باشد. غلظت این عنصر در ۱۱ نمونه (۵۵ درصد نمونه‌ها) از استاندارد حفاظت محیط زیست ایران برای خاک بیشتر است، که نشان‌دهندهٔ آلودگی شدید این عنصر در منطقهٔ مطالعاتی است و نیاز به توجه بیشتر به منظور کاهش غلظت این عنصر در محیط است.

میانگین غلظت عنصر منگنز در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۵۴۱/۶ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. باید توجه داشت که برای عنصر منگنز در خاک‌های صنعتی استانداردی تعریف نشده است. میانگین غلظت عنصر کروم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۱۴۳/۳ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. در مقایسه با استاندارد حفاظت محیط زیست ایران، غلظت این عنصر در بسیاری از ایستگاه‌ها از مقدار استاندارد (۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر است، که نشان‌دهندهٔ آلودگی این عنصر در خاک‌های سطحی منطقهٔ مطالعاتی است و نیاز به توجه بیشتر به منظور کاهش غلظت این عنصر در محیط و پاکسازی خاک‌های آلوده است. اگر غلظت این عنصر را با استاندارد کانادا (۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مقایسه کنیم؛ همهٔ نمونه‌ها غلظت کروم بیشتری از مقدار استاندارد دارند. میانگین غلظت عنصر آلومینیم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۲۱۸۰۴/۸ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. باید توجه داشت که برای عنصر آلومینیم نیز مانند عنصر منگنز در خاک‌های صنعتی استانداردی تعریف نشده است، که می‌تواند ناشی از این موضوع باشد

که این عنصر در محیط خاک تحت شرایط معمول، تحرک زمین‌شیمیایی کمی دارد و به ندرت سبب ایجاد سمناکی برای گیاهان و جانوران می‌شود.

۳.۳. ضریب غنی‌شدگی

برای بررسی بیشتر روند غنی‌شدگی عناصر در نمونه‌های خاک، ضریب غنی شدگی محاسبه شد. در این پژوهش برای محاسبهٔ ضریب غنی‌شدگی از عنصر اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع و از غلظت میانگین عناصر در خاک‌های جهانی به عنوان محیط مرجع استفاده شد. نتایج بیانگر غنی‌شدگی کم تا غنی‌شدگی شدید است. روند میانهٔ ضریب غنی‌شدگی به صورت زیر است:

$$Cu > Zn > Pb > Cr > Sr > V > Ni > Co > Mn \approx Fe \approx As \approx Al$$

تغییرات ضریب غنی شدگی برای شش عنصر ابتدایی سری بسیار بیشتر از بقیه است. بطور کلی ضرایب غنی شدگی برای عناصر مس، روی، سرب، کروم، استرانسیم و وانادیم بسیار بیشتر از بقیه عناصر است. همچنین، عناصر آلومینیم، آرسنیک، آهن، منگنز و کبالت کمترین ضریب غنی‌شدگی را نشان می‌دهند (جدول ۵).

جدول ۵. فاکتور ضریب غنی‌شدگی عناصر مختلف

عناصر	ضریب غنی شدگی	رده‌بندی غنی شدگی
آلومینیم (Al)	۰/۴۶	کمبود یا غنی‌شدگی کمینه
کروم (Cr)	۵/۳۴	غنی‌شدگی قابل‌توجه
منگنز (Mn)	۲/۱۲	غنی‌شدگی متوسط
سرب (Pb)	۵/۴۲	غنی‌شدگی قابل‌توجه
مس (Cu)	۸/۳۲	غنی‌شدگی قابل‌توجه
روی (Zn)	۷/۰۴	غنی‌شدگی قابل‌توجه
نیکل (Ni)	۴/۷۳	غنی‌شدگی متوسط
کبالت (Co)	۲/۷۵	غنی‌شدگی متوسط
آهن (Fe)	۱/۷۴	غنی‌شدگی متوسط
آرسنیک (As)	۱/۵۷	غنی‌شدگی متوسط
وانادیم (V)	۵/۰۴	غنی‌شدگی قابل‌توجه
استرانسیم (Sr)	۵/۱۵	غنی‌شدگی قابل‌توجه

۴.۳. ضریب همبستگی بین عناصر بالقوهٔ سمی

در این مطالعه، با توجه به اینکه غلظت عناصر در نمونه‌های خاک صنعتی دارای توزیع غیرنرمال است از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شده است (جدول ۶). کبالت همبستگی مثبت و قوی با عناصر آهن و کروم دارد. همچنین عنصر استرانسیم با عناصر سرب، روی، آرسنیک و مس همبستگی مثبت و بالایی دارد. عنصر مس با عناصر سرب، روی، آهن و آرسنیک همبستگی بالایی نشان می‌دهد. سرب نیز با عناصر روی، آرسنیک، کادمیم و آنتیموان همبستگی مثبت بالایی دارد سرب و روی به عنوان عناصر همراه شناخته می‌شوند که دارای رفتار ژئو شیمیایی مشابه هستند. عناصر نیکل، کروم و کبالت نیز دارای همبستگی مثبت و قوی هستند که احتمالاً به دلیل منشاء مشابه آن‌ها می‌باشد. عنصر آهن با وانادیم

همبستگی بالایی نشان می‌دهد.

جدول ۶. ضریب همبستگی اسپیرمن بین عناصر مختلف در نمونه‌های خاک منطقهٔ مطالعاتی

عنصر	مس (Cu)	سرب (Pb)	روی (Zn)	نیکل (Ni)	کبالت (Co)	منگنز (Mn)	آهن (Fe)	آرسنیک (As)	استرانسیم (Sr)	وانادیم (V)	کروم (Cr)	آلومینیم (Al)	اسکاندیم (Sc)
مس (Cu)	۱/۰۰۰												
سرب (Pb)	۰/۶۹۵**	۱/۰۰۰											
روی (Zn)	۰/۸۱۵**	۰/۷۵۳**	۱/۰۰۰										
نیکل (Ni)	۰/۴۶۹**	۰/۱۵۸	۰/۳۵۰**	۱/۰۰۰									
کبالت (Co)	۰/۵۱۰**	۰/۲۲۸**	۰/۴۴۰**	۰/۸۷۱**	۱/۰۰۰								
منگنز (Mn)	۰/۵۵۱**	۰/۳۴۷**	۰/۶۰۶**	۰/۵۱۰**	۰/۵۳۰**	۱/۰۰۰							
آهن (Fe)	۰/۵۳۲**	۰/۵۹۳	۰/۵۱۳**	۰/۵۵۷**	۰/۶۸۲**	۰/۵۱۶**	۱/۰۰۰						
آرسنیک (As)	۰/۶۸۸**	۰/۶۸۸**	۰/۶۸۲**	۰/۴۳۲**	۰/۵۱۸**	۰/۵۴۳**	۰/۷۱۴**	۱/۰۰۰					
استرانسیم (Sr)	۰/۴۸۹**	۰/۶۴۳**	۰/۵۸۳**	۰/۳۳۶**	۰/۳۲۱**	۰/۳۸۱**	۰/۴۳۰**	۰/۵۱۵**	۱/۰۰۰				
وانادیم (V)	۰/۳۶۴**	۰/۴۸۲**	۰/۵۰۱**	۰/۳۵۳**	۰/۴۷۰**	۰/۵۴۲**	۰/۷۸۹**	۰/۴۲۱**	۰/۴۲۶**	۱/۰۰۰			
کروم (Cr)	۰/۴۵۰**	۰/۳۳۶**	۰/۵۳۸**	۰/۷۶۸**	۰/۴۴۰**	۰/۴۴۰**	۰/۶۱۳**	۰/۴۸۳**	۰/۴۶۴**	۰/۴۰۷**	۱/۰۰۰		
آلومینیم (Al)	۰/۰۰۵	-۰/۱۸۰	-۰/۰۹۴	۰/۴۲۱**	۰/۳۱۰**	۰/۱۳۸	-۰/۰۰۸	-۰/۰۵۹	۰/۱۸۵	۰/۰۶۲	۰/۳۸۷**	۱/۰۰۰	
اسکاندیم (Sc)	-۰/۱۷۷	-۰/۴۴۰**	-۰/۳۲۹**	۰/۳۳۶**	۰/۲۲۶*	۰/۰۲۱	-۰/۲۱۳**	-۰/۲۸۴**	-۰/۰۸۵**	-۰/۱۳۷	۰/۲۵۰*	۰/۸۳۴**	۱/۰۰۰

۵،۳. آزمون کروسکال-والیس

آزمون کروسکال-والیس یکی از آزمون‌های ناپارامتریک که به مقایسهٔ چند جامعهٔ مستقل (بیش از دوجامع) می‌پردازد. از این آزمون برای مقایسهٔ غلظت عناصر مختلف بین صنایع مختلف موجود در منطقه استفاده شد که نتایج در جدول (۷) ارائه شده است. کل صنایع موجود در منطقهٔ مورد مطالعه بر اساس نوع فعالیت آن واحد صنعتی به ۶ گروه تقسیم‌بندی شدند. این گروه‌ها عبارتند از: صنایع غذایی، صنایع فلزی، فلزی، کشاورزی، الکتریکی- الکترونیکی و پتروشیمی- بازیافتی. نتایج نشان داد که از بین عناصر مختلف، میانگین غلظت عناصر مس، سرب، روی، منگنز، وانادیم و استرانسیم از نظر آماری تفاوت معنی‌داری را بین صنایع مختلف نشان می‌دهند.

۶،۳. شاخص خطر بالقوهٔ بوم‌شناختی

نتایج شاخص خطر برای همهٔ ایستگاه‌ها محاسبه شد. بر این اساس، حدود ۶۶ در صد ایستگاه‌ها دارای شاخص خطر کم می‌باشند و نزدیک به ۳۴ در صد ایستگاه‌ها نیز دارای شاخص خطر متوسط تا بسیار زیاد می‌باشند (جدول ۸).

جدول ۷. نتایج آزمون کروسکال-والیس برای عناصر مختلف در نمونه‌های خاک

آزمون کروسکال-والیس (H test)			
عنصر	Chi-Square value	درجه آزادی	معنی‌داری
کروم (Cr)	۱۹/۱۵۷	۵	۰/۰۶۶
مس (Cu)	۷۸/۹۸۱	۵	۰/۰۰۰
کبالت (Co)	۷۰/۲۹۳	۵	۰/۰۶۳
آهن (Fe)	۲۵/۱۲۹	۵	۰/۲۰۶
منگنز (Mn)	۳۰/۲۴۴	۵	۰/۰۱۷
نیکل (Ni)	۱۶/۳۴۰	۵	۰/۳۶۴
سرب (Pb)	۸۳/۲۰۱	۵	۰/۰۱۳
استرانسیم (Sr)	۷۷/۷۹۴	۵	۰/۰۰۷
آرسنیک (As)	۱۴۹/۲۳۵	۵	۰/۵۳۳
وانادیم (V)	۲۲/۵۲۶	۵	۰/۰۰۴
روی (Zn)	۱۴۱/۳۵۸	۵	۰/۰۰۰
آلومینیم (Al)	۵۳/۲۶۲	۵	۰/۱۲۱
اسکاندیم (Sc)	۷۶/۵۳۷	۵	۰/۸۹۷

جدول ۸. نتایج شاخص خطر بالقوهٔ بوم‌شناختی برای ایستگاه‌های نمونه‌برداری

وضعیت ایستگاه‌ها با توجه به مقادیر شاخص خطر (درصد)	شاخص خطر	مقدار RI
۶۵.۳۳	شاخص خطر کم	RI < 150
۲۱.۱۳	شاخص خطر متوسط	۱۵۰ ≤ RI < 300
۷.۷۴	شاخص خطر زیاد	۳۰۰ ≤ RI < 600
۵.۱۳	شاخص خطر بسیار زیاد	RI ≥ 600

۴. بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج، میانگین غلظت همهٔ عناصر به جز آلومینیم و اسکاندیم بسیار بیشتر از مقادیر غلظت این عناصر در خاک‌های جهانی است. این موضوع نقش منابع انسان‌زاد در افزایش غلظت عناصر را نشان می‌دهد. غلظت بسیار زیاد عناصری مانند مس، سرب، روی، وانادیم و کروم نسبت به میانگین جهانی قابل توجه است. مقایسهٔ غلظت عناصر با بیشینهٔ غلظت مجاز در خاک‌های صنعتی توسط سازمان‌های محیط زیست ایران، چین و کانادا نشان داد غلظت عناصر مس، روی، وانادیم، کروم و سرب در برخی از ایستگاه‌ها بیشتر از حدود مجاز می‌باشد. همچنین در مقایسه با استانداردهای کشورهای چین و کانادا نیز عناصر مس، روی، وانادیم، کروم و سرب غلظت‌های بسیار بیشتری از مقادیر استاندارد را نشان می‌دهند.

نتایج نشان داد میانگین غلظت عنصر مس در

خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۷۵ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. مس عنصری گوگرد دوست است و غلظت آن در پوستهٔ قاره‌ای بالایی، ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم تخمین زده شده است [۲۳]. میانگین جهانی غلظت عنصر مس در خاک ۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. از خصوصیات رایج مس، تجمع این عنصر در افق بالایی خاک است. تمام کانی‌های موجود در خاک قادر به جذب یون‌های مس محلول هستند. بیشترین مقدار جذب توسط اکسیدهای آهن و منگنز، هیدرواکسیدهای آلومینیم و کانی‌های رسی صورت می‌گیرد [۱۳]. میانگین غلظت عنصر سرب در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۸۷/۹ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. به‌طورکلی غلظت عنصر سرب در لایه‌های سطحی خاک بیش از لایه‌های عمقی است و با افزایش عمق خاک غلظت این عنصر کاهش می‌یابد [۳]. سرب در خاک به شکل ترکیبات انحلال ناپذیر مانند کربنات، سولفات و فسفات حضور دارد. تترا اتیل سرب موجود در بنزین بزرگ‌ترین منبع سرب در خاک محسوب می شود، که این روزها مصرف آن کاهش یافته است [۱۳]. در تحقیقی پژوهشگران بیان داشتند در منطقهٔ شهرک صنعتی روی زنجان خاک‌های منطقه به فلزات سرب، روی و کادمیوم آلوده هستند. آن‌ها اظهار داشتند غلظت نیکل و مس در منطقه کمتر از حد مجاز جهانی اسن عناصر است [۲۹].

میانگین غلظت عنصر منگنز در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۵۴۱/۶ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می باشد. منگنز عنصری به نسبت رایج در زمین است. این فلز سنگ‌دوست به عنوان جزء سازندهٔ بسیاری از کانی‌های سیلیکاته توزیع گسترده‌ای دارد. میانگین جهانی غلظت منگنز در خاک ۳۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۵]. میانگین غلظت عنصر کروم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۱۴۳/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. میانگین جهانی غلظت کروم در خاک ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است [۱۵]. خاک‌های تشکیل شده از سرپانتین‌ها ۱۰۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کروم داشته باشند. به طور معمول عنصر کروم در فاز بازماندهٔ خاک حضور دارد [۱۳]. مطالعات زیادی نشان می‌دهد که کروم از مواد مادری منشأ می‌گیرد [۱۱، ۲۶ و ۳۳].

میانگین غلظت عنصر آلومینیم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۲۱۸۰۴/۸ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. آلومینیم پس از اکسیژن و سیلیسیم، فراوان‌ترین عنصر فلزی پوستهٔ زمین است. میانگین غلظت آلومینیم در خاک‌های جهانی ۷۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. هیدروکسیدهای آلومینیم انحلال پذیری کمی دارند و حضور این عنصر در ساختار کانی‌های رسی سبب افزایش غلظت آن در خاک می‌شود [۱۳]. به طور کلی باید گفت که عنصر آلومینیم در محیط خاک عمدتاً دارای منشأ زمین‌زاد است و از سنگ مادر ناشی شده است. میانگین غلظت عنصر استرانسیم در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۴۹۳/۹ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. عنصر استرانسیم از نظر زمین شیمی خصوصیات مشابهی با عنصر کلسیم دارد؛ به همین دلیل غلظت این عنصر در خاک‌های آهکی به مراتب بیشتر از سایر خاک‌ها است. در شرایط معمول در محیط خاک، تحرک زمین‌شیمیایی این عنصر کم است. سمناکی این عنصر در خاک برای گیاهان بسیار نادر است [۱۴]. میانگین غلظت این عنصر در خاک‌های جهان ۱۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم است [۱۳].

میانگین غلظت عنصر کبالت در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۱۲ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می باشد. میانگین جهانی غلظت کبالت در خاک ۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که بیشترین غلظت آن در خاک‌های با بافت رسی و کمترین غلظت در خاک‌های ماسه‌ای و خاک‌های حاوی مواد آلی یافت می شود [۱۶]. میانگین غلظت عنصر روی در خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی، ۵۵/۴ میلی‌گرم‌برکیلوگرم می‌باشد. گسترهٔ غلظت روی در خاک معمولاً بین ۱تا ۳۰۰ و میانگین ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. روی در خاک با سیلیکات‌ها، کربنات‌ها، فسفات‌ها، اکسیدها و مواد آلی همراه است [۱۴]. فعالیت‌های صنعتی و حمل‌ونقل ممکن است باعث افزایش غلظت روی در خاک‌های

سطحی شود.

به طور کلی نتایج تحقیق حاضر حاکی از این است که فعالیت‌های صنعتی ناشی از شهرک صنعتی شیراز منجر به افزایش فلزات سنگین مس، سرب، کروم و منگنز در منطقهٔ مورد مطالعه شده است. در همین راستا، پژوهشگران [۲۹] اظهار داشتند مقادیر نسبتاً زیاد سرب و روی در شهرک صنعتی روی زنجان حاکی از نقش عوامل انسانی و مشخصا فعالیت‌های صنعتی می‌باشد. همچنین محققانی [۹] بیان داشتند فعالیت‌های صنعتی انجام گرفته در شهرک روی زنجان عامل اصلی افزایش غلظت عناصر روی و سرب در هوای شهر زنجان است.

بر اساس شاخص زمین انباشت، به طور کلی منطقهٔ مورد مطالعه نسبت به فلزات مس، سرب، روی، وانادیم، استرانسیم و کروم آلودگی متوسط و نسبت به فلز آلومینیم، نیکل، کبالت، آهن، آرسنیک و منگنز غیرآلوده می‌باشد. ضریب غنی‌شدگی محاسبه‌شده برای این عناصر در برخی از ایستگاه‌ها از ۲ کمتر است. عناصر مس، کروم، روی، وانادیم، استرانسیم و سرب در بسیاری از نمونه‌ها ضریب غنی شدگی بیشتر از ۵ نشان می‌دهند. در همین راستا، در تحقیقی در بررسی ارزیابی آلودگی فلزات سنگین خاک‌های سطحی شهرک صنعتی شمارهٔ ۲ اهواز گزراش شد فلز مس دارای غنی‌شدگی متوسط و فلز روی دارای غنی شدگی بسیار شدید می‌باشند [۲۸]. همچنین در مطالعه‌ای کروم، نیکل و سرب دارای غنی‌شدگی متوسط گزارش شد [۲۷]. در همین راستا، پژوهشگران در بررسی ارزیابی آلودگی شهرک صنعتی سمنان اظهار داشتند همبستگی‌معنی‌داری سرب و با روی وجود دارد که نشان دهندهٔ این است که این عناصر تحت تأثیر عوامل یکسانی در کل منطقه تغییر می‌کنند [۲۶].

نتایج همبستگی نشان داد عنصر مس با عناصر سرب همبستگی بالایی دارد. مقادیر بالای ضریب همبستگی بین فلزات سنگین، بیانگر یکسان‌بودن منبع انتشار این عناصر می‌باشد [۲۰، ۲۶ و ۳۴] در همین راستا، پژوهشگران [۳۰] منبع ورود عناصر سرب، روی و مس در خاک‌های سطحی چین را فعالیت‌های انسانی بیان نمودند. در مطالعه‌ای، محققان بیان داشتند همبستگی قوی میان عناصر مس، سرب، روی، باریت و منگنز وجود دارد [۲۸].

نتایج آزمون کروسکال-والیس نشان داد که از بین عناصر مختلف، میانگین غلظت عناصر مس، سرب، روی، منگنز، وانادیم و استرانسیم از نظر آماری تفاوت معنی‌داری را بین صنایع مختلف نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از نوع صنعت (منبع انتشار)، ژئوشیمی عنصر و ماهیت زمین‌شیمیایی خاک منطقهٔ مورد مطالعه باشد. لازم به ذکر است که صنایع مختلف، عناصر مختلفی را به محیط اطراف آزاد می‌کنند. اما ژئوشیمی عنصر و نوع خاک نیز نقش برجسته‌ای در افزایش یا کاهش غلظت عناصر ایفا می‌کنند.

بر اساس نتایج شاخص خطر، حدود ۶۶ درصد ایستگاه‌ها دارای شاخص خطر کم می‌باشند و نزدیک به ۳۴ در صد ایستگاه‌ها نیز دارای شاخص خطر متوسط تا بسیار زیاد می‌باشند.

به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که میانگین غلظت همهٔ عناصر به جز آلومینیم و اسکاندیم بسیار بیشتر از مقادیر غلظت این عناصر در خاک‌های جهانی است. همچنین، مقادیر میانهٔ غلظت این عناصر نیز بیشتر از خاک‌های جهانی است که نشان‌دهندهٔ نقش منابع انسان‌زاد در افزایش غلظت عناصر را نشان می‌دهد. علاوه بر این، در مقایسه با استانداردهای کشورهای چین و کانادا نیز عناصر مس، سرب، روی، وانادیم و کروم غلظت‌های بسیار بیشتری از مقادیر استاندارد را نشان می‌دهند. محاسبهٔ ضریب غنی‌شدگی عناصر مذکور در نمونه‌های خاک نشان‌دهندهٔ غنی‌شدگی زیاد عناصر مس، سرب، روی، استرانسیم، وانادیم و کروم است. نتایج حاصل از محاسبهٔ شاخص‌های زمین شیمیایی و روش‌های آماری نشان می‌دهد که عناصر آلومینیم، کبالت، اسکاندیم، کروم، وانادیم، نیکل و آهن دارای منشاء زمین‌زاد بوده ولی عناصر مس، سرب، روی و منگنز بیشتر تحت تأثیر منابع انسان‌زاد هستند. نتایج تحقیق حاضر گویای آن است که

خاک‌های منطقه آلوده به فلزات مس، سرب، وانادیم، منگنز و روی هستند. در همین راستا، بررسی اثرات خاک‌های صنعتی موجود در محدودهٔ مطالعاتی بر سلامت مردم منطقه پیشنهاد می‌شود. لذا پیشنهاد می‌شود با روش‌های مختلف سعی در کاهش فلزات در محیط داشت. با توجه به تنوع گونه‌های گیاهی در ایران، استفاده از فن‌آوری گیاه پالایی می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر و کاربردی در پالایش خاک‌های آلودهٔ منطقهٔ مورد مطالعه مطرح شود.

تقدیر و تشکر

مقالهٔ حاضر مستخرج از طرح پژوهشی با شمارهٔ ۹۷۰۰۵۵۷۴ و با عنوان شدت آلودگی، دسترس‌پذیری زیستی و اثرات زیست‌محیطی فلزات سنگین و ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای (PAH) در خاک‌های صنعتی شیراز می‌باشد که با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اجرا گردید. در اینجا مراتب قدردانی خود را از ریاست صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اعلام می‌داریم.

References

[1] Abanuz, G. Y. (2011). Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey. Micro chemical Journal, 99(1), 82-92.

[2] Ahmadi, B. (2012). The role of heavy metals in human health. July 20 2012. Available at: Resources heavy metals.

[3] Alloway, B. J. (ed.). (2012). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, Vol. 22. Springer Science & Business Media.

[4] Ashraf, M. A., Maah, M. J., and Yusoff, I. (2011). Heavy metals accumulation in plants growing in ex tin mining catchment. International Journal of Environmental Science & Technology, 8(2), 401-416.

[5] Bhuiyan, M. A. H., Karmaker, S. C., Bodrud-Doza, M., Rakib, M. A., and Saha, B. B. (2021). Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods. Chemosphere, 263, 128339.

[6] Boroujerdnia, A., Mohammadi Roozbahani, M., Nazarpour, A., Ghanavati, N., and Payandeh, K. (2020). Heavy Metal Pollution in Surface Soils of Ahvaz, Iran, Using Pollution Indicators and Health Risk Assessment. Archives of Hygiene Sciences, 9(4), 299-310.

[7] Chabukdhara, M., and Nema, A. K. (2012). Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: a chemometric and geochemical approach. Chemosphere, 87(8), 945-953.

[8] Eby, G. N. (2016). Principles of environmental geochemistry. Waveland Press.

[9] Farahmandkia, Z., Mehrasbi, M.R., Sekhawatju, M.S., Hasanalizadeh, A.Sh., and Ramezanzadeh, Z. (2009). Study of heavy metals in the atmospheric deposition in Zanjan, Iran. Iran. Journal of Health Environmental, 2(4), 240-249.

[10] Gaur, A., and Adholeya, A. (2004). Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Current Science, 528-534.

[11] Hasani Nekou, A., Karimi, A., Haghnia, G. H., and Gharaie, M. M. (2014). Effect of parent materials and pedogenic processes on distribution of Pb, Zn, Cu, and Ni in the residual soils of Binaloud zone, Western Mashhad. JWSS-Isfahan University of Technology, 18(67), 123-134. (In Persian)

[12] Jafari Haghighi, M. (2003). Methods of sampling and analysis of soil physical and chemical analysis with emphasis on theory and practical importance. Press Neda Zoha. 236 p.(In Persian).

[13] Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants, 3rd edn CRC Press. Boca Raton, FL, USA.

[14] Kabata-Pendias, A., and Sadurski, W. (2004). Trace elements and compounds in soil. Elements and their compounds in the environment: Occurrence, analysis and biological relevance, 79-99.

[15] Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.

[16] Kabata-Pendias, A., and Mukherjee, A. B. (2007). Trace elements of group 12 (Previously group IIb). Trace elements from soil to human, 283-319.

[17] Khan, S., Aijun, L., Zhang, S., Hu, Q., and Zhu, Y. G. (2008). Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in lettuce grown in the soils contaminated with long-term wastewater irrigation. Journal of hazardous materials, 152(2), 506-515.

[18] Khellaf, N., and Zerdaoui, M. (2010). Growth response of the duckweed *Lemna gibba* L. to copper and nickel phytoaccumulation. Ecotoxicology, 19(8), 1363-1368.

[19] Khorasanipour, M., and Aftabi, A. (2011). Environmental geochemistry of toxic heavy metals in soils around Sarcheshmeh porphyry copper mine smelter plant, Rafsanjan, Kerman, Iran. Environmental Earth Sciences, 62(3), 449-465.

[20] Li, X., Liu, L., Wang, Y., Luo, G., Chen, X., Yang, X., ... and He, X. (2013). Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. Geoderma, 192, 50-58.

[21] Madrid, L., Díaz-Barrientos, E., & Madrid, F. (2002). Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville. Chemosphere, 49(10), 1301-1308.

[22] Mai, B., Qi, S., Zeng, E.Y., Yang, Q., Zhang, G., Fu, J., Sheng, G., Peng, P. and Wang, Z. (2003). Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region off Macao, China: assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis. Environmental Science and Technology, 37(21), 4855-4863.

[23] McLennan, S. M., and Taylor, S. R. (1999). Earth's continental crust. Encyclopedia of geochemistry, 712.

[24] Merian, E., Anke, M., Ihnat, M., and Stoeppler, M. (2004). Elements and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance (No. Ed. 2). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

[25] Muller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. Geojournal, 2, 108-118.

[26] Nik Ravesh, M., Karimi, A., Esfandyarpur, E., and Fotovat, A. (2017). Assessment of surface soil pollution with selected heavy metals in Semnan industrial complex and surrounding areas. Journal of Natural Environment, 70(1), 211-226.

[27] Pournia, M., Moosavi, M. H., and Jassemi, Z. (2015). Survey of heavy metals pollution in surface soils around the industrial town of Ahvaz 2. Journal of environmental science and technology, 17(4), 23-32.

[28] Rostami Paydar, Gh., Rahnemarad, J. and Nazarpour, A. (2014). Assessment of heavy metal contamination in surface soils of Ahvaz Industrial Town No. 2-southwest of Iran. Geotechnical Geology, 10(1), 57-67.

[29] Safari, Y., Delavar, M.A., Esfandiarpour Borujeni, I., Salehi, M.H. and Owliaie, H.R. (2017). Mapping the overall soil pollution by heavy metals using limitation scores. Journal of soil management and sustainable production, 6(4), 56-70.

[30] Shi, G., Chen, Z., Xu, S., Zhang, J., Wang, L., Bi, C., and Teng, J. (2008). Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China. Environmental Pollution, 156(2), 251-260.

[31] Solgi, E., Esmaili-Sari, A. and Bakhtiari, A.R. (2013). Evaluation of mercury contamination in soils of industrial estates of Arak city. Journal of Health in the Field, 1(2).

[32] Suthar, S., Nema, A. K., Chabukdhara, M., and Gupta, S. K. (2009). Assessment of metals in water and sediments of Hindon River, India: impact of industrial and urban discharges. Journal of Hazardous materials, 171(1-3), 1088-1095.

[33] Taghipour, M., Ayoubi, S., and Khademi, H. (2011). Contribution of lithologic and anthropogenic factors to surface soil heavy metals in western Iran using multivariate geostatistical analyses. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 20(8), 921-937.

[34] Xie, S., Dearing, J. A., Boyle, J. F., Bloemendal, J., and Morse, A. P. (2001). Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications. Journal of Applied Geophysics, 48(2), 83-92.

[35] Yakovlev, E. Y., Zykova, E. N., Zykov, S. B., Malkov, A. V., and Bazhenov, A. V. (2020). Heavy metals and radionuclides distribution and environmental risk assessment in soils of the Severodvinsk industrial district, NW Russia. Environmental Earth Sciences, 79, 1-16.

[36] Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., and Liang, Z. (2010). Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. Science of the total environment, 408(4), 726-733.