

ارزیابی نظام‌مند و فراتحلیل خطر، پتانسیل سمّیت و خطرات سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی عناصر بالقوه سمّی در خاک شهر اراک

فوزیه بیگ‌محمدی^۱، عیسی سلگی^{۱*}، محسن سلیمانی^۲ و علی اصغر بسالت‌پور^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۶)

چکیده

حضور صنایع و نزدیکی آنها به مراکز مسکونی در شهر اراک و آلودگی ناشی از عناصر بالقوه سمّی (PTEs= Potentially toxic elements) تهدید جدی برای سلامتی انسان و موجودات زنده در این منطقه محسوب می‌شود. در این میان آلودگی خاک به PTEs یکی از چالش‌های مطرح‌شده در این منطقه است و مطالعات متنوعی در این زمینه انجام شده است. مطالعات فراتحلیل، ارزیابی جامع از نتایج موجود در یک موضوع ارائه می‌دهند. در بررسی حاضر نتایج مطالعات آلودگی خاک به PTEs در دوره ۱۱ ساله (۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰) در شهر اراک مورد تحلیل قرار گرفت. در این بررسی خطر، پتانسیل سمّیت و خطرات سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی PTEs به کمک شاخص‌ها و روابط ریاضی ارزیابی شد. بر اساس نتایج حاصل از شاخص‌های آلودگی، خاک منطقه مورد مطالعه از نظر PTEs شامل As, Ni, Cr, Cd, Zn، Pb، Cu و Hg در طبقه آلوده و بسیار آلوده قرار داشت. خطر اکولوژیک PTEs در منطقه قابل توجه بوده و خاک منطقه از نظر پتانسیل سمّیت PTEs دارای سمّیت حاد برآورد شد. سهم کادمیوم، آرسنیک و جیوه به ترتیب ۴۹/۳، ۲۳/۲ و ۱۸/۳ درصد از خطر اکولوژیک منطقه و نیکل، کروم و آرسنیک به ترتیب ۳۴/۷، ۲۳/۰۳ و ۲۲/۰۷ درصد از پتانسیل سمّیت PTEs در خاک منطقه برآورد شد. آرسنیک، نیکل و کروم بیشترین خطر سرطان‌زایی برای کودکان از هر دو مسیر بلع و تنفس را داشته و در مورد بزرگسالان کروم، آرسنیک و نیکل بیشترین خطر سرطان‌زایی را از مسیر تنفس داشتند. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات صورت گرفته، نگران‌کننده‌ترین PTEs در منطقه مورد مطالعه شامل As، Pb و Cd و مهم‌ترین منشأ انتشار آنها در شهر اراک منابع انسان‌زاد و صنایع هستند.

واژه‌های کلیدی: شهر اراک، عناصر بالقوه سمّی، پتانسیل سمّیت، دستیابی زیستی، فراتحلیل

۱. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳. گروه مدیریت منابع آب و خاک، مؤسسه علمی- پژوهشی مدیریت منابع 3 inter، برلین، آلمان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: e.solgi@yahoo.com

مقدمه

در گذشته فلزات سنگین را بر اساس وزن اتمی، عدد اتمی و دانسیته (وزن مخصوص) تعریف کرده‌اند. در این مطالعه به جای واژه فلزات سنگین از اصطلاح عناصر بالقوه سمی (Potentially toxic elements) استفاده می‌شود که این اصطلاح بهتر می‌تواند خواص و رفتار این دسته از فلزات را نشان دهد (۳۵). خاک در خدمت بسیاری از عملکردهای اساسی در محیط طبیعی است؛ نیازهای اساسی جامعه بشری را برآورده می‌کند (۵۵) و به‌عنوان مخزن PETS در محیط زیست و هم به‌عنوان منبع انتقال فلزات، اثرات مضر بر سلامت انسان و محیط زیست دارند (۳). PTEs از طریق منابع مختلف انسانی وارد خاک می‌شوند و بنابراین خاک شاخص خوبی برای آلودگی فلزات است و این موضوع به دلیل ارتباط خاک با هوا و آب بسیار مهم است (۴۱).

با افزایش صنعتی شدن و رشد شهرنشینی آلودگی محیط زیست ناشی از PETS به یک مشکل جهانی تبدیل شده است. در این میان، آلودگی خاک به PETS از مهم‌ترین چالش‌های اساسی دنیا به شمار می‌رود (۴۸)، زیرا این آلاینده‌ها به علت توزیع گسترده، تجمع زیستی بالا و مدت زمان طولانی در خاک باقی می‌مانند که سبب تهدید جنبه‌های کمی و کیفی امنیت غذایی شده و سلامتی موجودات زنده را به خطر می‌اندازند (۵۳). از طرفی با توجه به این که بیشتر مردم در سراسر جهان در شهرها زندگی می‌کنند کیفیت محیط شهری از اهمیت حیاتی برخوردار است و آلودگی محیط زیست این مناطق نیاز به نظارت دقیق دارد (۴۴). خاک در محیط شهری از مهم‌ترین منابع آلودگی PETS و همچنین مخزنی برای تجمع و انتقال این آلاینده در شهر است (۲۸). تراکم بالای جمعیت در مناطق شهری منتج به آلودگی خاک‌های شهری و اثرات بالقوه بر سلامت انسان و سیستم‌های زیستی شده است (۹).

PETS موجود در خاک‌های سطحی شهرها ناشی از منابع مختلف (مانند ترافیک، انتشارات صنعتی و فرسایش ناشی از ساختمان‌ها) می‌تواند از طریق تنفس، بلع و جذب پوستی در

بدن انسان تجمع یافته و برای سلامتی خطرناک باشد چون هیچ مکانیسم دفعی مؤثری در بدن ندارند (۴۹). در واقع PETS به خاطر سمیت آشکار، پایداری و انباشته شدن در بافت‌های زیستی، در میان آلاینده‌ها از اولویت برخوردارند (۵۴). با توجه به نگرانی‌های محیط زیستی و سلامت انسان در ارتباط با PETS، همچنین نقش اساسی خاک و کیفیت آن در سلامت اکوسیستم، آگاهی از غلظت این عناصر به‌عنوان شاخصی مهم در پیش‌بینی خطرات و بیماری‌های منتج شده از این فلزات و تعیین استانداردهای کیفیت ضروری به نظر می‌رسد (۳۶). با توجه به خطرات سرطان‌زایی برخی PETS از جمله سرب، کادمیوم، آرسنیک و جیوه، ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی PETS، اطلاعات ارزشمندی در اختیار پژوهشگران قرار خواهد داد.

اندازه‌گیری غلظت مطلق PETS همیشه برای ارزیابی آلودگی خاک کافی نیست (۲۵). استفاده از شاخص‌ها برای ارزیابی آلودگی خاک به PETS ارزیابی مناسبی از وضعیت آلودگی منطقه خواهد بود (۴۲). استفاده از شاخص‌ها به‌منظور ارزیابی سمیت و خطر PETS بسیار اهمیت دارد از جمله این شاخص‌ها می‌توان به فاکتور آلودگی، درجه آلودگی، شاخص آلودگی اصلاح شده، شاخص بار آلودگی، شاخص آلودگی تجمعی، شاخص نمره، شاخص خطر بالقوه محیط زیستی و پتانسیل سمیت حاد اشاره کرد.

یک مرور نظام‌مند تلاش می‌کند تا تمام پژوهش‌های تجربی موجود را با استفاده از روش‌های مشخص و نظام‌مند برای به‌دست آوردن پاسخ به یک سؤال خاص جمع‌آوری کند (۴). فراتحلیل یک روش آماری برای تجزیه و تحلیل جامع حجم زیادی از داده‌های مطالعات متعدد و ادغام نتایج آنها با هم است (۳۰). در این روش مطالعات مشابه از نظر منطقه مورد مطالعه، روش انجام پژوهش و... با هم ارزیابی و نتایج آنها ادغام و تحلیل می‌شود (۴). به‌تازگی از فراتحلیل به‌طور فزاینده‌ای برای تحلیل اطلاعات استخراج شده از مطالعات مختلف و تعیین روند کلی و افزایش قدرت استنباط در موضوع مورد بررسی

چنین مطالعاتی در اراک انجام نشده است و مطالعه حاضر نخستین بررسی نظام‌مند و فراتحلیل در این خصوص است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شهر اراک است که در $34^{\circ} 5' 12''$ عرض شمالی و $49^{\circ} 41' 33''$ طول شرقی واقع شده است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه به همراه برخی صنایع و مراکز مسکونی ارائه شده است.

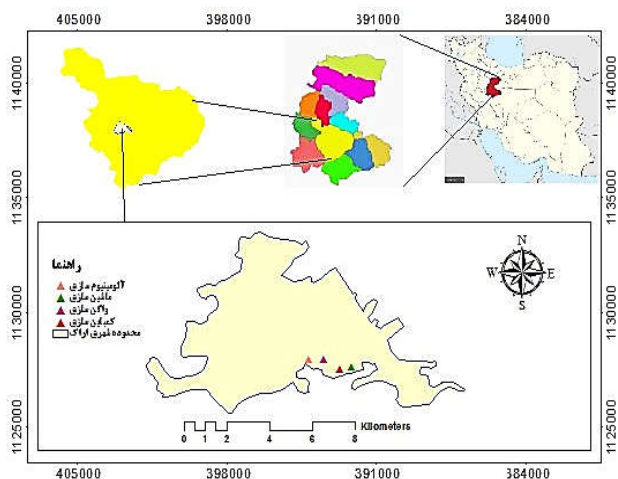
روش مطالعه

مطالعات مختلفی در خصوص آلودگی خاک شهر اراک به PETs در سال‌های مختلف صورت گرفته است. اما تاکنون مطالعه نظام‌مند و فراتحلیل در این زمینه انجام نشده است. بیشتر مطالعات روی پارک‌ها و اطراف صنایع انجام شده‌اند در مطالعه حاضر بر اساس نتایج مطالعات مختلف در بازه زمانی ۱۱ ساله (۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰) به ارزیابی خطر و سمیت PETs در خاک شهر اراک پرداخته می‌شود. از بین PETs مورد بررسی، روی، کادمیوم، کروم، نیکل، آرسنیک، سرب، مس و جیوه از اطلاعات کامل‌تری برخوردار بودند و در این بررسی نتایج آنها تحلیل شد. در شکل ۲ روند انتخاب مقالات و استخراج اطلاعات برای مطالعه حاضر آورده شده است.

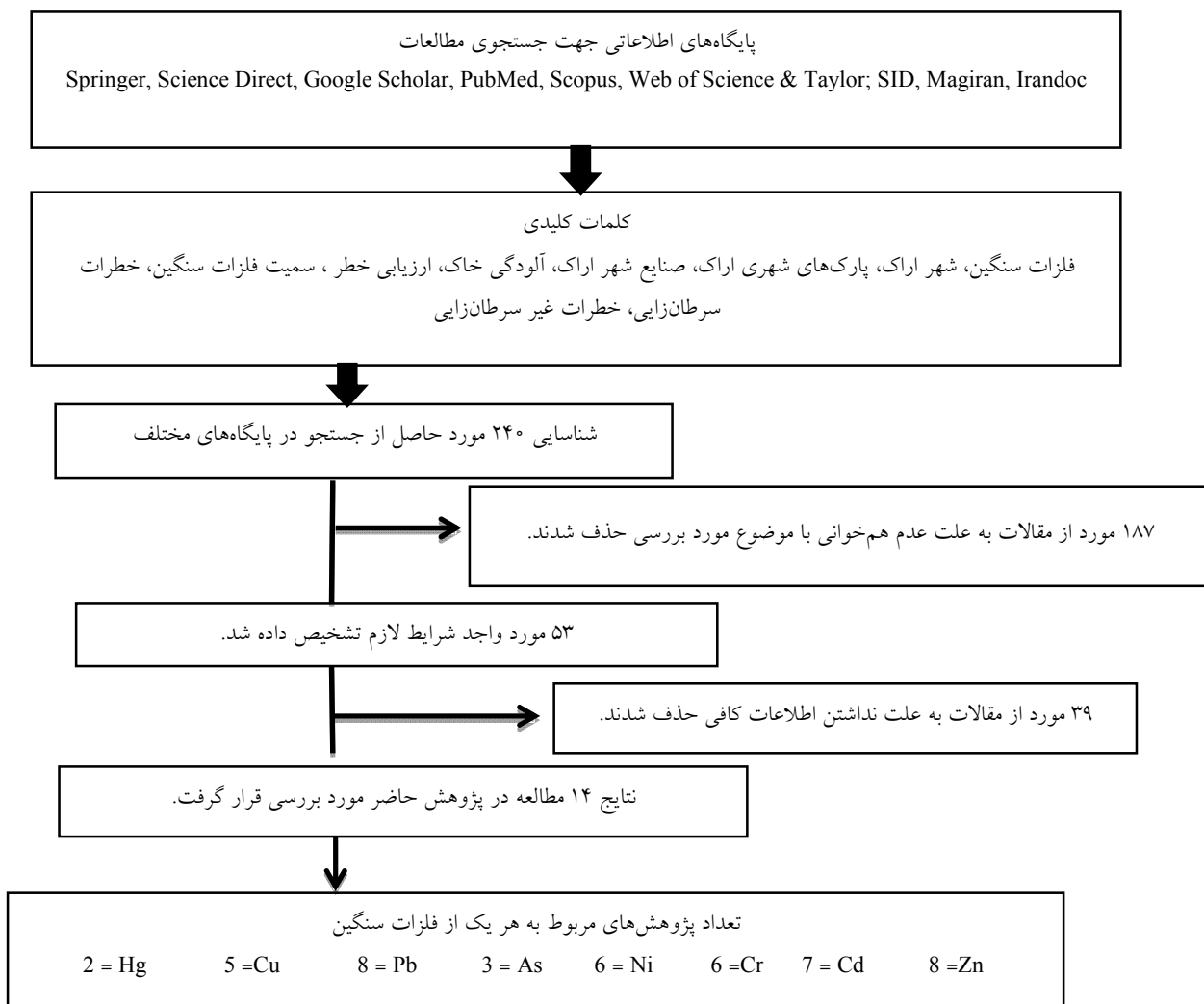
بر اساس شکل ۲، از بین ۲۴۰ مطالعه در نهایت ۱۴ مطالعه که با اهداف مورد بررسی مطابقت داشته و از اطلاعات کافی برخوردار بودند انتخاب شدند (جدول ۲). با این وجود در برخی از سال‌های بازه زمانی مورد بررسی هیچ مطالعه‌ای انجام نشده بود از جمله سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸. به علاوه در برخی سال‌ها اطلاعات مربوط به بعضی PETs موجود نبود. به طوری که Sn، Al، Fe، Mn و Co از بین PETs مورد بررسی حذف شدند. همچنین، از بین PETs مورد بررسی آرسنیک و جیوه کمتر از سایر PETs مورد توجه قرار گرفته‌اند اما با توجه به

استفاده شده است و اطلاعات جامع در ارتباط با موضوع در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. اگر مطالعات حاوی داده‌هایی در مورد یک موضوع باشد که می‌توان آنها را با هم ترکیب کرد، یک فراتحلیل حتی می‌تواند با استفاده از داده‌های تنها دو مطالعه انجام شود (۴). پیش از این از فراتحلیل به طور گسترده‌ای در زمینه‌های پزشکی استفاده شده و به تدریج در علوم محیط زیست به کار گرفته شده است (۲۲). از این روش در مطالعات متعددی برای تجزیه و تحلیل داده‌های آلودگی محیط زیست استفاده شده است تا امکان تجزیه و تحلیل جامع آلودگی فراهم شود (۳، ۲۴ و ۳۲).

شهر اراک یکی از شهرهای صنعتی ایران است که صنایع متعددی شامل صنایع فلزی، شیمی، نساجی، سلولزی، مواد معدنی غیر فلزی، برق و الکترونیک، دارویی، آرایشی و بهداشتی در شهرک‌های صنعتی که در کنار مراکز مسکونی واقع شده‌اند در حال فعالیت هستند. این صنایع محصولاتمانند کاغذ، شیشه، مواد غذایی، مبلمان، حشره‌کش، علف‌کش‌ها، رنگ، ضد عفونی‌کننده‌ها، انواع شوینده‌ها، لوله‌های پی وی سی، ظروف پلاستیکی و غیره تولید می‌کنند که صنایع نزدیک به مراکز مسکونی واقع شده‌اند (۴۸). از مشکلات مربوط به فرایند تولید در این صنایع می‌توان به انتشار PETs در محیط زیست اشاره کرد به عنوان مثال فلزات مختلفی مانند Cu، Pb، Cr، Cd، Ni و Zn در تولید آلیاژها و فولادها مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۳). این شهر که صنایع مختلف آن در کنار مراکز مسکونی احداث شده‌اند همواره با مسائل مختلفی در آلودگی‌ها بخش‌های مختلف (آب، خاک و هوا) روبه‌رو بوده است و ارزیابی خطر این آلاینده‌ها اهمیت بسیاری دارد. بر این اساس در مطالعه حاضر به بررسی نظام‌مند و فراتحلیل داده‌های حاصل از دوره ۱۱ ساله (۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰) آلودگی PETs در خاک شهر اراک پرداخته می‌شود و پتانسیل سمیت، خطر اکولوژیک و خطرات سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی این آلاینده‌ها بررسی می‌شود. با وجود ارزشمندبودن مطالعات نظام‌مند و فراتحلیل در ارزیابی وضعیت آلودگی مناطقی با قدمت چندین ساله آلودگی، تاکنون



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۲. روند کلی استخراج اطلاعات در مطالعه حاضر

جدول ۱. خلاصه مطالعات بکار گرفته شده در مطالعه نظام مند فراتحلیل

عنوان	منطقه مورد مطالعه	عناصر مورد بررسی	نحوی نمونه برداری	رفرنس
Soil Contamination of Metals in the Three Industrial Estates, Arak, Iran	شهرک صنعتی شماره ۱، ۲ و ۳	Pb و Ni, Cr, Cd, As	عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر	(۴۳)
Origin and concentrations of heavy metals in agricultural land around aluminium industrial complex	اطراف آلومینیوم سازی اراک	Al و Zn, Sn, Ni, Cr, Cd	عمق ۰ تا ۲۵ سانتی متر	(۱۷)
Assessment of the sources of chemical elements in sediment from Arak Mighan Lake	دریاچه میقان	Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, Sr, Zr, Zn	عمق ۰ تا ۱۰ سانتی متر	(۱۵)
بررسی میزان آلودگی جیوه در خاک شهرک های صنعتی اراک	شهرک صنعتی ۱، ۲، و ۳	Ag	عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر	(۴۵)
Assessment of Copper and Zinc Contamination in Soils of Industrial Estates of Arak Region (Iran)	شهرک صنعتی ۱، ۲، و ۳	Cu, Zn	عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر	(۴۱)
ارزیابی آلودگی به عناصر سمی و سنگین خاک های اطراف نیروگاه حرارتی شازند به روش تحلیل آماری و زمین آماری	اطراف نیروگاه حرارتی شازند	Cu و Co, Cd, Cr, Zn, Pb	عمق ۵ تا ۱۵ سانتی متر	(۱۴)
سنجش غلظت سرب و کادمیوم موجود در خاک شهر اراک در سال ۱۳۹۶ و ارزیابی خطرات غیرسرطانی آنها	سطح شهر اراک	Cd, Pb	عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر	(۶)
Spatial Distribution of Mercury in the Surface Soils of the Urban Areas, Arak, Iran	سطح شهر اراک	Hg	عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر	(۴۶)
آلودگی خاک به آرسنیک در مناطق شهری: مطالعه موردی شهر اراک	سطح شهر اراک (پارک، فضای سبز، مناطق کشاورزی و...)	As	عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر	(۴۷)
بررسی غلظت فلزات سنگین (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb) در برگ درختان (زبان گنجشک، توت و سرو) و خاک پارک ها و صنایع شهر اراک	سطح شهر اراک (پارک ها، اطراف صنایع و...)	Cu و Pb, Ni, Cr, Zn	عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متر	(۲۹)
Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Arak industrial City, Iran	سطح شهر اراک	As, Pb, Zn, Cr and Co	عمق ۵ تا ۱۰ سانتی متر	(۱۳)
Pollution assessment and spatial distribution of trace elements in soils of arak industrial area, Iran: Implications for human health	سطح شهر اراک در اطراف صنایع	As, Zn, Ni, Pb, Cu و Cd	عمق ۰ تا ۵ سانتی متر	(۵۰)
ارزیابی آلودگی خاک های اطراف کارخانه آلومینیوم سازی اراک به عناصر آلومینیوم، آهن، منگنز و سرب	اطراف کارخانه آلومینیوم سازی	Pb و Mn, Fe, Al	عمق ۰ تا ۱۵ سانتی متر	(۳۷)
Prediction of Degree of Soil Contamination Based on Support Vector Machine and K-Nearest Neighbor Methods: A Case Study in Arak, Iran	سطح شهر اراک	As, Cr Pb, Cu, Ni, Zn, و Ni	عمق ۵ تا ۱۰ سانتی متر	(۱۶)

حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) از طریق تنفس؛ Csoil: غلظت فلز سنگین در خاک؛ Inhr: نرخ تنفس خاک بر اساس مترمکعب در روز که برای کودکان و بزرگسالان به ترتیب برابر ۷/۶۳ و ۱۲/۸ است؛ EF: فراوانی قرارگیری در معرض فلزات (روز در سال) که برای کودکان و بزرگسالان فرض بر این است که ۳۵۰ روز از سال در تماس با خاک آلوده قرار دارند؛ ED: مدت قرارگیری در معرض فلزات (سال) که برای کودکان و بزرگسالان ۶ و ۲۴ سال در نظر گرفته شد؛ BW: وزن شخص قرار گرفته در معرض فلزات برای کودکان ۱۵ کیلوگرم و برای بزرگسالان ۵۵/۹ کیلوگرم در نظر گرفته شد؛ AT: مدت زمان قرارگیری در معرض فلزات به‌طور میانگین (روز) که ۳۶۵×ED است؛ EF: فاکتور انتشار فلزات از خاک به هوا (متر مکعب بر کیلوگرم) که برابر ۱۰^۹×۳۶/۱ برای هر دو گروه سنی است (۶).

خطر سرطان‌زایی PETs از رابطه ۲ محاسبه شد که در آن ADD: مقدار میانگین جذب روزانه فلزات (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز)؛ SFi: فاکتور احتمال ابتلا در هر واحد قرارگیری در معرض فلزات (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) و CR: خطر سرطان‌زایی PETs است.

$$CR = \sum ADD_i \times SFi \quad (2)$$

خطر غیر سرطان‌زایی از رابطه (۳) محاسبه شد که در آن HQi: خطر غیر سرطان‌زایی PETs و RFDi: مقدار مرجع سمیت فلزات است.

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RFD_i} \quad (3)$$

با توجه به اینکه برای خاک‌های آلوده، بلع مهم‌ترین مسیر در معرض قرارگیری برای کودکان است (۴۳)، به همین منظور در این ارزیابی در کنار مسیر تنفسی برای کودکان جذب فلزات سنگین توسط بلع خاک نیز در نظر گرفته شد. که از رابطه ۴ استفاده شد.

$$ADD = \frac{(C_{soil} \times Inhr \times EF \times ED)}{(BW \times AT) \times 10 - 6} \quad (4)$$

سمیت آنها و اهمیت ارزیابی خطر آنها در بین اطلاعات مورد بررسی گنجانده شدند. به‌طور کلی با وجود خلأ اطلاعاتی موجود ۱۴ مطالعه برای Cu, Pb, As, Ni, Cr, Cd, Zn, PETs و Hg مورد بررسی قرار گرفتند.

ارزیابی خطر و پتانسیل سمیت عناصر بالقوه سمی

به‌منظور ارزیابی خطر و سمیت PETs از شاخص‌های مختلف استفاده شد که در جدول ۲ روابط آنها و توضیح اجزای این روابط ارائه شده است.

برای ارزیابی آلودگی از شاخص‌های CD, mCd, PLI, IPI و PInemerow استفاده شد و ارزیابی خطر اکولوژیکی به کمک Eri و PER انجام شد و پتانسیل بالقوه سمیت PETs با استفاده از ΣTU برآورد شد. بر اساس مقدار عدد به‌دست آمده برای هر یک از این شاخص‌ها طبقه‌بندی کیفی از وضعیت آلودگی، خطر و سمیت PETs در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. در جدول ۳ مقادیر مورد نیاز برای محاسبه این شاخص‌ها شامل مقادیر مرجع در پوسته زمین، سطوح اثرات احتمالی (PEL) و فاکتور پاسخ-سمیت (Tr) برای PETs مورد بررسی آورده شده است.

در این مطالعه از محاسبه درصد نسبت Erri/PER و همچنین TU/ΣTU جهت تفکیک و تعیین درصد سهم نسبی هر کدام از PETs در خطر بالقوه محیط زیستی و پتانسیل سمیت PETs (۳۲) در منطقه مطالعاتی استفاده شد.

ارزیابی خطرات سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی عناصر بالقوه سمی

به‌منظور ارزیابی خطر بهداشتی سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی PETs روابط ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، مورد استفاده قرار گرفت (۶).

$$ADD = \frac{(C_{soil} \times Inhr \times EF \times ED)}{(PEF \times BW \times AT)} \quad (1)$$

که در آن ADD: مقدار میانگین جذب روزانه فلزات (بر

جدول ۲. شاخص‌های بکارگرفته‌شده برای ارزیابی آلودگی، خطر و پتانسیل سمیت PETs

شاخص	رابطه	توضیحات	رفرنس
فاکتور آلودگی	$CF = \frac{C_{metal}}{C_{background}}$	C_{metal} : غلظت فلز سنگین $C_{background}$: غلظت زمینه فلز سنگین	(۲۰)
درجه آلودگی	$CD = \sum_{i=1}^n CF$	CF: شاخص فاکتور آلودگی	(۲۰)
شاخص خطر بالقوه محیط زیستی	$C_{fi} = \frac{cn}{Bn}$ $E_{ri} = Tri \times C_{fi}$ $PER = \sum_{i=1}^n E_{ri}$	C_{fi} : شاخص فاکتور آلودگی C_n : غلظت فلز سنگین B_n : غلظت زمینه فلز سنگین E_{ri} : فاکتور خطر بالقوه Tri : فاکتور پاسخ سمی	(۱۹)
شاخص آلودگی اصلاح شده	$mCd = \frac{\sum_{i=1}^n Cd}{n}$	CD: شاخص درجه آلودگی n: تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه	(۱)
پتانسیل سمیت حاد	$Toxicity\ Unit = \frac{C_i}{PEL_i}$ $\Sigma TU = TU_{Cr} + TU_{Mn} + TU_{Zn} + \dots$	C_i : غلظت فلز سنگین PEL_i : سطح اثر احتمالی TU: واحد سمیت	(۲۵)
شاخص بار آلودگی	$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n}$	CF: شاخص فاکتور آلودگی n: تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه	(۵)
شاخص آلودگی تجمعی	$IPI = (\sum_{i=1}^n PI)^{\frac{1}{n}}$ $PI = \frac{C_i}{B_i}$	C_i : غلظت فلزات سنگین B_i : غلظت زمینه فلز سنگین n: تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه	(۲۱)
شاخص نمره	$PI = \sqrt{\frac{(C_{f_{average}})^2 + (C_{f_{max}})^2}{2}}$	$C_{f_{max}}$: بزرگ‌تر شاخص فاکتور آلودگی $C_{f_{average}}$: میانگین شاخص فاکتور آلودگی	(۳۱)

جدول ۳. مقادیر PEL، Tri و غلظت در پوسته زمین PETs

غلظت در پوسته زمین	فاکتور پاسخ سمی	سطح اثر احتمالی	
۷۲	۱	۳۱۵	Zn
۰/۲	۳۰	۳/۵۳	Cd
۱۰۰	۲	۹۰	Cr
۷۵	۵	۳۶	Ni
۱/۸	۵	۱۷	As
۱۲/۵	۵	۹۱/۳	Pb
۵۵	۵	۱۹۷	Cu
۰/۰۸	۴۰	۰/۴۸	Hg
(۵۱)	(۳۲)	(۲۷)	مرجع

نتایج

در جدول ۴ نتایج توصیفی غلظت PETs بر اساس مطالعات جمع‌آوری شده در دوره آماری مورد بررسی آمده است. بر اساس این نتایج از بین PETs مورد بررسی کروم و روی بیشترین مقدار و کادمیوم و جیوه از کمترین غلظت برخوردار بودند. غلظت همه PETs بیشتر از مقدار زمینه آنها (۵۱) در پوسته زمین بوده و در مورد کادمیوم، سرب و آرسنیک غلظت PETs در خاک شهر اراک در دوره آماری مورد بررسی به ترتیب بیش از ۴، ۳ و ۱۲ برابر مقدار زمینه آنها در پوسته زمین برآورد شد.

به منظور بررسی وضعیت آلودگی، خطر اکولوژی و پتانسیل سمیت PETs از شاخص‌های مختلف استفاده شد. نتایج مربوط به مقادیر شاخص‌های محاسبه شده در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس این نتایج شهر اراک از نظر طبقه‌بندی آلودگی، خطر و پتانسیل سمیت در بالاترین طبقه ارائه شده برای هر یک شاخص‌ها قرار دارد و طی دوره آماری ۱۱ ساله مورد بررسی از نظر آلودگی خاک به PETs در سطح بالایی از آلودگی قرار دارد. خطر اکولوژیکی منطقه از نظر PETs قابل توجه بوده و خاک منطقه از نظر پتانسیل سمیت PETs دارای سمیت حاد است.

در شکل ۳ خطر اکولوژی PETs نشان داده شده است که برای کادمیوم بالاتر از ۴۰ و دارای خطر اکولوژی قابل توجه، برای آرسنیک و جیوه بین ۴۰ تا ۸۰ و دارای خطر اکولوژیکی متوسط و در مورد سایر PETs (روی، کروم، نیکل، سرب و مس) خطر اکولوژیکی کم برآورد شد.

در شکل‌های ۴ و ۵ درصد نسبت Eri/PER و $TU/\sum TU$ برای PETs مورد بررسی ارائه شده است. بر اساس این نتایج درصد Eri/PER برای کادمیوم، آرسنیک و جیوه به ترتیب ۴۹/۳، ۲۳/۲ و ۱۸/۳ درصد به دست آمد. بر این اساس کادمیوم، آرسنیک و جیوه بیشترین سهم را در خطر اکولوژی بالقوه PETs در خاک منطقه داشت. این در حالی است که درصد $TU/\sum TU$ برای نیکل، کروم و آرسنیک بالاترین مقدار را داشته

و این فلزات به ترتیب ۳۴/۷، ۲۳/۰۳ و ۲۲/۰۷ درصد از پتانسیل سمیت PETs را در خاک منطقه بر عهده داشتند. در جدول ۶ نتایج مربوط به مقدار میانگین جذب روزانه فلزات سنگین (برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز) از طریق تنفس برای کودکان و بزرگسالان و بلع برای کودکان و خطر سرطان‌زایی PETs و در جدول ۷ خطرات غیر سرطان‌زایی PETs ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول ۶ جیوه، کادمیوم، مس و آرسنیک کمترین مقادیر جذب روزانه را برای کودکان و بزرگسالان از طریق تنفس داشتند. همچنین، آرسنیک، نیکل و کروم بیشترین خطر سرطان‌زایی (CR) برای کودکان و کروم، آرسنیک و نیکل بیشترین خطر سرطان‌زایی را برای بزرگسالان داشتند. برای کودکان و از طریق بلع کمترین میزان جذب روزانه مربوط به جیوه، کادمیوم و مس بود و خطر سرطان‌زایی کودکان از طریق بلع در مورد کروم، آرسنیک و نیکل بیش از سایر PETs بود. خطرات غیر سرطان‌زایی کروم، آرسنیک و سرب برای دو گروه کودکان و بزرگسالان از مسیر تنفس بیشتر از سایر PETs برآورد شد و برای کودکان از طریق بلع خطر غیر سرطان‌زایی آرسنیک، سرب و نیکل بیشتر از سایر PETs بود (جدول ۷).

بحث

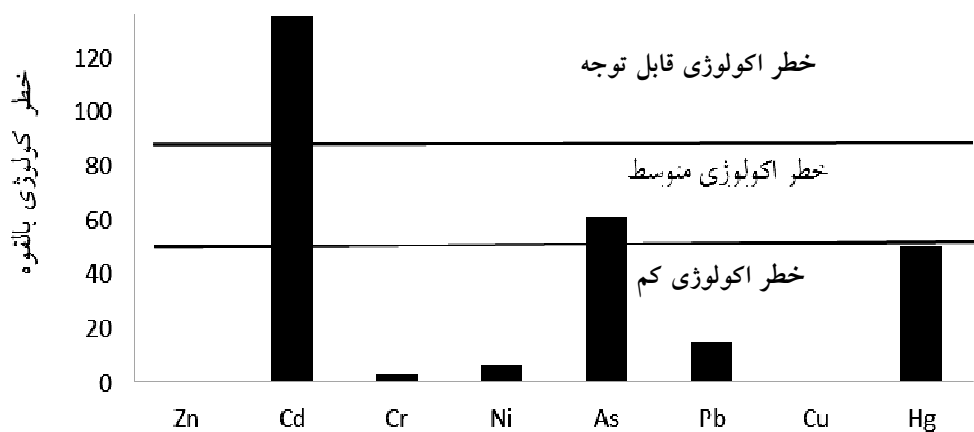
بر اساس مقدار شاخص‌های به کار گرفته شده خاک شهر اراک از نظر $Zn, Cd, Cr, Ni, As, Pb, Cu$ و Hg دارای آلودگی است و وضعیت آلودگی در بالاترین طبقات هر یک از شاخص‌های $PI_{Nemerow}$ و IPI, PLI, mCd, CD قرار گرفته است (جدول ۵) که با نتایج لین و همکاران (۲۴)، تاتی و همکاران (۵۰)، سلگی و همکاران (۴۶)، بقائی و عقیلی (۶)، سلگی و همکاران (۴۱) و صابری کرهرودی و همکاران (۳۷) همخوانی دارد که در هر یک از این مطالعات تعدادی از فلزات مورد بررسی در مطالعه حاضر در خاک شهر اراک بررسی شده است و نتایج آنها نشان داد بر اساس شاخص‌های مورد بررسی آلودگی خاک شهر اراک به PETs در طبقات بالای هر شاخص

جدول ۴. آمار توصیفی PETs در دوره ۱۱ ساله مورد بررسی

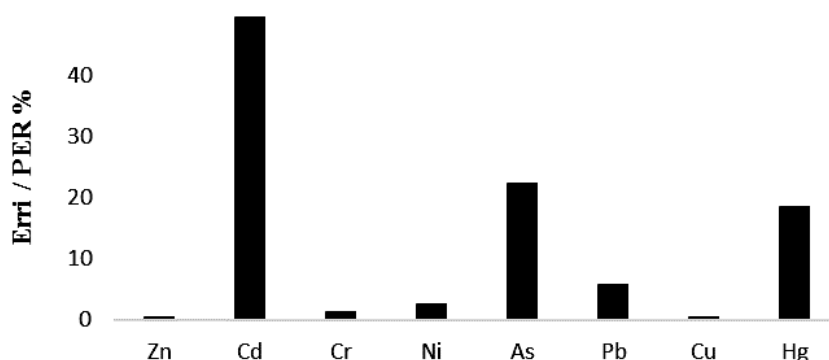
انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	
۴۷/۹۶	۷۸/۰۹	۱۰۸/۸۸	۱/۳۴	Zn
۰/۸۳	۰/۹۰	۳/۰۱	۰/۲۵	Cd
۲۳۳/۹۹	۱۲۱/۲۹	۶۹۳	۶/۷۱	Cr
۱۱/۵۰	۷۳/۱۷	۹۳	۶۲/۴۷	Ni
۴۸/۷۷	۲۱/۹۵	۱۵۲	۴/۶۰	As
۲۱/۴۱	۳۸/۲۰	۶۹/۳۷	۰/۲۱	Pb
۵/۸۲	۹/۱۳	۱۴/۰۶	۱/۷۱	Cu
۱۹/۱۷	۰/۱	۰/۱۴	۰/۰۸	Hg

جدول ۵. وضعیت آلودگی، خطر اکولوژی و پتانسیل سمیت PETs در منطقه مورد مطالعه

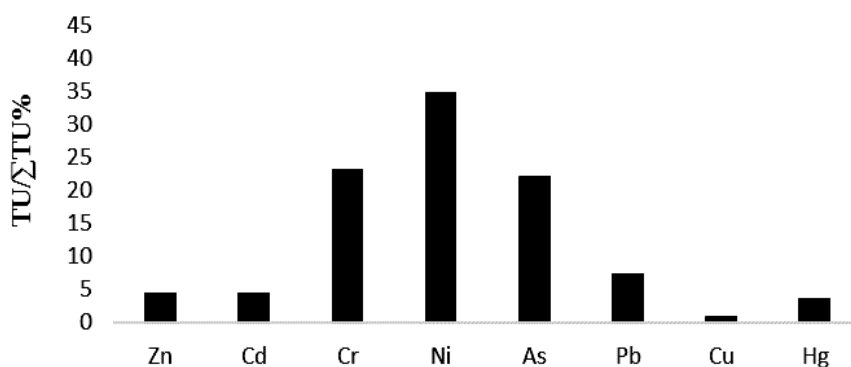
شاخص‌ها	مقادیر شاخص‌ها	طبقه آلودگی
CD	۲۵/۴۳	آلودگی بسیار بالا
mCD	۳/۱۷	آلودگی بالا
PLI	۱/۷۶	آلوده
IPI	۱/۴۹	آلودگی متوسط
PI _{Nemerow}	۳/۴۲	سطح بالای آلودگی
PER	۲۷۳/۸۸	خطر اکولوژیکی قابل توجه
ΣTU	۵/۸۵	سمیت حاد



شکل ۳. مقایسه خطر اکولوژیکی PETs در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴. سهم نسبی PETs در خطر اکولوژیک بالقوه



شکل ۵. سهم نسبی PETs در مجموع واحدهای سمیت

جدول ۶. میزان جذب روزانه (ADD) و خطر سرطان‌زایی (CR) عناصر بالقوه سمی در منطقه مورد مطالعه

تنفس		بلع		کودکان
کودکان		بزرگسالان		
ADD	CR	ADD	CR	
2.8×10^{-9}	—	1.26×10^{-9}	—	Zn
0.3×10^{-9}	0.2×10^{-8}	0.1×10^{-9}	0.009×10^{-7}	Cd
4.35×10^{-9}	1.8×10^{-8}	1.96×10^{-9}	8.2×10^{-7}	Cr
2.62×10^{-9}	2.2×10^{-8}	1.18×10^{-9}	0.09×10^{-7}	Ni
7.9×10^{-9}	1.18×10^{-8}	3.5×10^{-9}	0.5×10^{-7}	As
1.37×10^{-9}	0.02×10^{-8}	6.2×10^{-9}	0.003×10^{-7}	Pb
3.3×10^{-9}	—	1.5×10^{-9}	—	Cu
0.035×10^{-9}	—	0.01×10^{-9}	—	Hg

جدول ۷. ارزیابی خطر غیر سرطان‌زایی (HQi) برای عناصر بالقوه سمی در منطقه مورد مطالعه

	تنفس		بلع
	کودکان	بزرگسالان	
Zn	$93/3 \times 10^{-9}$	42×10^{-9}	$19/9 \times 10^{-4}$
Cd	$32/3 \times 10^{-8}$	$14/5 \times 10^{-8}$	$69/1 \times 10^{-4}$
Cr	$17/06 \times 10^{-4}$	$76/7 \times 10^{-5}$	$6/2 \times 10^{-4}$
Ni	$12/73 \times 10^{-7}$	$57/3 \times 10^{-8}$	$2/8 \times 10^{-2}$
As	$25/3 \times 10^{-6}$	$11/4 \times 10^{-6}$	$5/6 \times 10^{-1}$
Pb	$38/9 \times 10^{-9}$	$17/5 \times 10^{-7}$	$8/3 \times 10^{-2}$
Cu	$81/4 \times 10^{-9}$	$36/7 \times 10^{-9}$	$17/5 \times 10^{-4}$
Hg	$46/8 \times 10^{-8}$	$21/08 \times 10^{-8}$	$25/5 \times 10^{-4}$

(۴۸). در مطالعه تاتی و همکاران (۵۰) نیز آرسنیک و کادمیوم بیشترین خطر را داشتند و پس از آنها نیکل در جایگاه سوم قرار گرفت.

درصد Eri/PER برای کادمیوم، آرسنیک و جیوه به ترتیب ۴۹/۳، ۲۳/۲ و ۱۸/۳ درصد و $TU/\Sigma TU$ برای نیکل، کروم و آرسنیک به ترتیب ۳۴/۷، ۲۳/۰۳ و ۲۲/۰۷ درصد به دست آمد و کادمیوم، آرسنیک و جیوه بیشترین سهم را در خطر اکولوژی بالقوه و نیکل، کروم و آرسنیک بیشترین سهم را در پتانسیل سمیت بر عهده داشتند. غلظت جیوه در خاک بین ۰/۰۱ تا ۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، با میانگین ۰/۰۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در سطح دنیا گزارش شده است (۳۹). بر اساس مطالعات صورت گرفته در دوره آماری ۱۱ ساله غلظت آن در خاک شهر اراک ۰/۰۸ تا ۰/۱۴ و با میانگین ۰/۱ برآورد شده است، که میانگین آن بیشتر از غلظت متوسط گزارش شده در سطح جهان است. جیوه سبب ایجاد اثرات کلیوی و عصبی در انسان و حیات وحش می‌شود که به عنوان یک ماده سمی با اولویت در بسیاری از کشورها شناخته شده است (۱۲). ۶۰ تا ۹۰ درصد از جیوه منتشر شده در محیط زیست از منابع انسان‌زاد و فعالیت‌های صنعتی است (۳۳).

بر اساس نتایج مطالعات انجام شده در دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ میانگین غلظت آرسنیک در خاک شهر اراک ۲۱/۹

قرار دارد. خطر بالقوه PTEs به منبع انتشار آنها بستگی دارد (۴۰)؛ به طوری که تحرک بالقوه این آلاینده‌ها در محیط‌هایی که منبع آلودگی آنها انسان‌زاد باشد، بیشتر است (۳۴). As, Cu, Cr, Cd, Ni, Zn و Hg در پی فعالیت صنایع مختلف وارد محیط زیست می‌شود (۷). بنابراین در منطقه مورد مطالعه عامل اصلی انتشار PTEs صنایع هستند که نزدیک به مراکز جمعیتی احداث شده اند و از دستیابی زیستی بالاتر و پتانسیل خطر بیشتری برخوردار هستند. همچنین، وجود سرب، کادمیوم، نیکل، منگنز و کروم با آلودگی‌های ناشی از خودروها مرتبط است این مواد اغلب در اثر استفاده به عنوان مواد افزودنی جزئی به بنزین در محیط منتشر می‌شوند (۲۶). بنابراین، حضور صنایع در مراکز شهری و از طرفی ترافیک شهری می‌تواند عوامل اصلی آلودگی خاک شهر اراک به PTEs باشد.

همچنین، بررسی نتایج مطالعات آلودگی خاک اراک به فلزات سنگین در دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ نشان داد که غلظت همه PTEs مورد بررسی بیشتر از مقدار پس زمینه آنها در پوسته زمین بود و در مورد سرب، کادمیوم و آرسنیک این تفاوت بسیار بیشتر و به ترتیب بیش از ۳، ۴ و ۱۲ برابر مقدار زمینه آنها در پوسته زمین برآورد شد. بنابراین، نگران‌کننده‌ترین PTEs در منطقه مورد مطالعه As, Cd و Pb هستند و مهم‌ترین منشأ انتشار آنها در شهر اراک منابع انسان‌زاد و صنایع هستند

میلی‌گرم بر کیلوگرم برآورد شد که ۱۲/۱۹ برابر مقدار پس‌زمینه در پوسته زمین است. در مطالعه سلگی و همکاران (۴۷) ایستگاه‌های واقع در مرکز شهر اراک آلودگی بیشتری را نشان دادند و وجود صنایع زیاد در این شهر از جمله تولید آلومینیوم ثانویه در شرکت آلومینیوم صنعتی ایران و نیز دیگ‌های بخار صنعتی که منابع انتشار آرسنیک و سایر فلزات هستند به نظر می‌رسد که بر افزایش مقادیر آرسنیک در نواحی مرکزی شهر مؤثر بوده است. مهم‌ترین منشأ انتشار کادمیوم، کروم و نیکل منابع انسان‌زاد و صنایع تولید آلیاژها و فولاد است (۲۳) که این صنایع در شهر اراک وجود دارند و در کنار مصرف سوخت‌های فسیلی در حمل و نقل عامل انتشار این آلاینده‌ها به محیط زیست هستند. از جمله صنایعی که احتمالاً در انتشار این آلاینده‌ها مؤثرند می‌توان به آلومینیوم‌سازی ایران، واگن‌سازی و کمباین‌سازی اشاره کرد. کادمیوم یک عامل تحریک کننده شدید ریوی و دستگاه گوارش است که در صورت استنشاق یا مصرف خوراکی آن می‌تواند کشنده باشد و سرطان ریه مهم‌ترین مشکل ناشی از تماس با کادمیوم است (۵۲).

بر اساس نتایج به‌دست آمده برای گروه کودکان آرسنیک، نیکل و کروم و برای بزرگسالان کروم، آرسنیک و نیکل از مسیر تنفس بیشترین خطر سرطان‌زایی (CR) را داشتند و برای کودکان کروم، آرسنیک و نیکل از مسیر بلع بیشترین خطر سرطان‌زایی را داشتند. بروز انواع سرطان‌ها از شاخص‌ترین مشکلات در معرض قرار گرفتن انسان توسط PTEs است و بر اساس طبقه‌بندی IARC (International Agency for Research on Cancer)، آرسنیک در گروه یک سرطان‌زایی قرار دارد (۱۸). آرسنیک به دلیل سمیت زیاد برای سیستم‌های مختلف بدن (مانند عصبی، تنفسی، قلبی و عروقی، خون‌ساز، ایمنی، غدد درون ریز، کبدی، کلیوی و تولید مثلی) و همچنین قابلیت ایجاد سرطان‌های متفاوت (انواع سرطان پوست، ریه و مثانه)، نگرانی زیادی در سطح جهان ایجاد کرده است (۱۱). کروم و نیکل دارای خواص سرطان‌زایی هستند و روی DNA اثرات منفی می‌گذارند بر این اساس IARC، نیکل را در گروه

۲B از نظر سرطان‌زایی طبقه‌بندی کرد (۳۸).

خطرات غیر سرطان‌زایی کروم، آرسنیک و سرب برای دو گروه کودکان و بزرگسالان از مسیر تنفس و آرسنیک، سرب و نیکل برای کودکان از طریق بلع بیشتر از سایر PTEs بود و بطور کلی مقدار شاخص غیر سرطان‌زایی برای همه PTEs و در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان کمتر از یک برآورد شد. اگر HQ بزرگ‌تر از یک باشد اثرات نامطلوب و نگران کننده‌ای بر سلامتی انسان دارد و اگر کوچک‌تر از یک باشد با سلامت انسان ناسازگار نیست (۸). بر این اساس خطرات غیر سرطان‌زایی PTEs در مطالعه حاضر با سلامتی انسان ناسازگار نیست. در مطالعه تاتی و همکاران (۵۰) نیز خطر غیر سرطان‌زایی کمتر از یک برآورد شد. این در حالی است که در مطالعه بقائی و عقیلی (۶) در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه در شهر اراک برای دو عنصر سرب و کادمیوم HQ بزرگ‌تر از یک برآورد شد. با این وجود با توجه به مشکلات و اثراتی که تجمع PTEs در بدن انسان دارند همواره باید در بخش‌های محیط زندگی انسان در شهر (آب، خاک و هوا) پایش شوند و باید به تفاوت اثرات برای گروه‌های مختلف توجه کرد. کروم برای انسان سرطان‌زا بوده و سرب روی عملکرد اعصاب تأثیر دارد (۱۰). کودکان نسبت به بزرگسالان بیشتر مستعد ابتلا به اثرات عصبی ناشی از سرب هستند زیرا بدن آنها تمایل به جذب بیشتر و دفع به نسبت کمتر سرب دارد و از طرفی تماس زیاد دست با دهان در کودکان آنها را در برابر مسمومیت سرب آسیب پذیرتر می‌کند (۲).

نتیجه‌گیری

حضور شهرک‌های صنعتی در حاشیه مراکز مسکونی در شهر اراک عامل اصلی آلودگی خاک این شهر به PTEs محسوب می‌شود. PTEs از جمله جیوه، آرسنیک، کروم، نیکل، کادمیوم و سرب در اندام‌های مختلف ایجاد سرطان می‌نمایند. نتایج این پژوهش نشان داد خاک شهر اراک بر اساس شاخص‌های آلودگی به این PTEs آلوده بوده و در کلاس آلودگی بالا قرار

سیاسگذاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۰۱۹۱۷ انجام شده است و مستخرج از رساله دکتری است.

دارد و برای ساکنان شهر اراک از پتانسیل خطر بالایی برای اثرات غیر سرطان‌زایی و سرطان‌زایی برخوردار است. از بین PETs مورد بررسی، آرسنیک، نیکل و کروم بیشترین خطرات سرطان‌زایی را برای دو گروه کودکان و بزرگسالان داشتند که در پایش‌های مکانی و زمانی خاک باید مورد توجه قرار گیرند.

منابع مورد استفاده

1. Abraham, G. M. S. and R. J. Parker. 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment* 136: 227-238.
2. Ackah, M. 2019. Soil elemental concentrations, geo-accumulation index, non-carcinogenic and carcinogenic risks in functional areas of an informal e-waste recycling area in Accra, Ghana. *Chemosphere* 235: 908-917.
3. Acosta, J. A., M. Gabarron, A. Faz, S. Martinez-Martinez, R. Zornoza and J. M. Arocena. 2015. Influence of population density on the concentration and speciation of metals in the soil and street dust from urban areas. *Chemosphere* 134: 328-337.
4. Ahn, E. and H. Kang. 2018. Introduction to systematic review and meta-analysis. *Korean Journal of Anesthesiology* 71:103- 112.
5. 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 Total Environment* 187: 19-56.
6. Baghaie, A. and F. Aghili. 2018. Evaluation of lead and cadmium concentration of Arak city soil and their non-cancer risk assessment in 2017. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences* 17:769-780 (In Farsi).
7. Banerjee, A., M. K. Jhariya, D. K. Yadav and A. Raj. 2018. Micro-remediation of Metals: A New Frontier in Bioremediation. PP: 1-36. In: Hussain, C. M. (Ed.). Handbook of Environmental Materials Management. Springer Inc, Switzerland.
8. Chabukdhara, M. and A. K. Nema. 2013. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 87: 57-64.
9. De Silva, S., A. S. Ball, T. Huynh and S. M. Reichman. 2016. Metal accumulation in roadside soil in Melbourne, Australia: Effect of road age, traffic density and vehicular speed. *Environmental Pollution* 208: 102-109.
10. Duruibe, J. O., M. O. C. Ogwuegbu and J. N. Ekwurugwu. 2007. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences* 2: 112-118.
11. Gamboa-Loira, B., M. E. Cebrián F. Franco-Marina and L. López-Carrillo. 2017. Arsenic metabolism and cancer risk: a meta-analysis. *Environmental Research* 156:551-558.
12. Gaudet, C., S. Lingard, P. Cureton, K. Keenleyside, S. Smithe and G. Raju. 1995. Canadian environmental quality guidelines for mercury. *Water, Air and Soil Pollution* 80: 1149-59.
13. Ghadimi, F. 2014. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Arak industrial City, Iran. *Journal of Tethys* 2: 196-209.
14. Ghadimi, F., M. Ghomi., and E. Mohammadi Vali Kandi. 2019. Evaluation of Soil Contamination to Heavy Metals around the Shazand power plants using statistical and geo statistical analysis. *Journal of Environmental Science and Technology* 21(6): 139-153 (In Farsi).
15. Ghadimi, F. 2014. Assessment of the sources of chemical elements in sediment from Arak Mighan Lake. *International Journal of Sediment Research* 29:159-170.
16. Ghadimi, F. 2014. Prediction of degree of soil contamination based on support vector machine and k-nearest neighbor methods: a case study in Arak, Iran. *Iranian Journal of Energy and Environment* 5: 345-353.
17. Ghiyasi, S., A. Karbassi., F. Moattar., S. Modabberi. and M. B. Sadough. 2017. Origin and concentrations of heavy metals in agricultural land around aluminium industrial complex. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 8: 1237-1240.
18. González, N., J. Calderón, A. Rúbies, I. Timoner, V. Castell, J. L. Domingo and M. Nadal. 2019. Dietary intake of arsenic, cadmium, mercury and lead by the population of Catalonia, Spain: Analysis of the temporal trend. *Food and Chemical Toxicology* 132: 110721.
19. Gurumoorthi, K. and R. Venkatachalapathy. 2016. Spatial and seasonal trend of trace metals and ecological risk

- assessment along Kanyakumari coastal sediments, southern India. *Pollution* 2: 269-87.
20. Hankanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research* 14: 975-1001.
21. He, J., Y. Yang, G. Christakos, Y. Liu and X. Yang. 2019. Assessment of soil heavy metal pollution using stochastic site indicators. *Geoderma* 337: 359-367.
22. Huang, Y., L. Wang, W. Wang, T. Li, Z. He and X. Yang. 2019. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis. *Science of The Total Environment* 651: 3034-3042.
23. Li, F. Y., Z. P. Fan, P. F. Xiao, K. Oh, X. P. Ma and W. Hou. 2009. Contamination, chemical speciation and vertical distribution of heavy metals in soils of an old and large industrial zone in Northeast China. *Environmental Geology* 54: 1815-1823.
24. Lin, Z., J. Li, Y. Luan and W. Dai. 2020. Application of algae for heavy metal adsorption: A 20-year meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 190: 110089.
25. Long, E. R., D. D. Macdonald, S. L. Smith and F. D. Calder. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19: 81-97.
26. Lytle, C. M., B. N. Smith and C. Z. Mckinwu. 1995. Manganese accumulation along the Utah roadways. A possible indication of motor exhaust pollution. *Science of The Total Environment* 162: 1056-109.
27. MacDonald, D. D., C. G. Ingersoll and T. A. Berger. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of environmental contamination and toxicology* 39: 20-31.
28. Mielke, H. W., C. R. Gonzales, M. K. Smith and P. W. Mielke. 1999. The urban environment and children's health: soils as an integrator of lead, zinc, and cadmium in New Orleans, Louisiana, U.S.A. *Environmental Research* 81: 117-129.
29. Motamed Ayar, M. 2017. Investigation of the concentration of heavy metals (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb) in the leaves of trees (sparrow, mulberry and cypress) and the soil of parks and industries in Arak. Master Thesis, Environment Group. Faculty of Natural Resources and Environment. Malayer University, Hamedan, Iran (In Farsi).
30. Moher, D., L. Shamseer, M. Clarke, D. Ghersi, A. Liberati, M. Petticrew and L. A. Stewart. 2015. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic reviews* 4: 1-9.
31. Nemerow, N. L. 1991. Stream, Lake, Estuary, and Ocean Pollution. New York, United States.
32. Niu, Y., X. Jiang, K. Wang, J. Xia, W. Jiao, Y. Niu and H. Yu. 2020. Meta-analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China. *Science of The Total Environment* 700: 134509.
33. Pacyna, E. G. and J. M. Pacyna. 2001. Global emissions of mercury from anthropogenic sources in 1995. *Water, Air and Soil Pollution* 137: 149-65.
34. Palansooriya, K. N., S. M. Shaheen, S. S. Chen, D. C. Tsang, Y. Hashimoto, D. Hou, N. S. Bolan, J. Rinklebe and Y. S. Ok. 2020. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environment International* 134: 105046.
35. Pourret, O. and A. Hursthouse, 2019. It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16: 1-6.
36. Ravankhah, N., R. Mirzaei and S. Masoum. 2016. Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences* 26: 109-120. (In Farsi)
37. Saberi kerahrodi, H., A. golchin and P. alamdari. 2020. Evaluation of soils contamination around Aluminum smelting plant of Arak city by Aluminum, Iron, Manganese and Lead. *Journal of Environmental Science and Technology* 22: 315-332 (In Farsi).
38. Salnikow, K. and A. Zhitkovich. 2008. Genetic and epigenetic mechanisms in metal carcinogenesis and cocarcinogenesis: nickel, arsenic, and chromium. *Chemical research in toxicology* 21: 28-44.
39. Santos-Frances, F., A. Garcia-Sa nchez, P. Alonso-Rojo and F. Contreras. 2011. Distribution and mobility of mercury in soils of a gold mining region, Cuyuni river basin. Venezuela. *Journal of Environmental Management* 92: 1268-1276.
40. Shaheen, S. M., A. A. Balbaa, A. M. Khatab and J. Rinklebe. 2017. Compost and sulfur affect the mobilization and phyto-availability of Cd and Ni to sorghum and barnyard grass in a spiked fluvial soil. *Environmental Geochemistry and Health* 39: 1305-1324.
41. Solgi, E. 2015. Assessment of copper and zinc contamination in soils of industrial estates of Arak region (Iran). *Iranian Journal of Toxicology* 9: 1277-1283.
42. Solgi, E. 2016. Contamination of two heavy metals in topsoils of the urban parks Asadabad, Iran. 2013. *Archives of Hygiene Sciences* 5: 92-101.
43. Solgi, E. and M. Keramaty. 2016. Assessment of Health Risks of Urban Soils Contaminated by Heavy Metals

- (Bojnourd City). *Journal of North Khorasan University of Medical Sciences* 7: 813-827 (In Farsi).
44. Solgi, E. and R. Konani. 2016. Assessment of lead contamination in soils of urban parks of Khorramabad, Iran. *Health Scope* 5: 1-8.
 45. Solgi, E., A. Esmaili-Sari and A. Riyahi Bakhtiari. 2013. Evaluation of mercury contamination in soils of industrial estates of Arak city. *Journal of Health in the Field* 1: 22-28 (In Farsi).
 46. Solgi, E., A. Esmaili-Sari and A. Riyahi-Bakhtiari. 2014. Spatial distribution of mercury in the surface soils of the urban areas, Arak, Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 93: 710-715.
 47. Solgi, E., A. Esmaili-Sari, A. Riyahi Bakhtiari and M. Hadipour. 2015. Soil contamination by Arsenic in urban areas: A case study of Arak city. *Iranian Journal of Health and Environment* 8: 1-10 (In Farsi).
 48. Solgi, E., A. Esmaili-Sari, A. Riyahi-Bakhtiari and M. Hadipour. 2012. Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 88: 634-638.
 49. Solgi, E., N. Roohi and M. Kouroshi-Gholampou. 2016. A comparative study of metals in roadside soils and urban parks from Hamedan metropolis, Iran. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 6: 169-175.
 50. Taati, A., M. H. Salehi, J. Mohammadi, R. Mohajer and S. Díez. 2020. Pollution assessment and spatial distribution of trace elements in soils of Arak industrial area, Iran: Implications for human health. *Environmental Research* 109577.
 51. Taylor, S. R. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28: 1273-1285.
 52. Tchounwou, P. B., C. G. Yedjou, A. K. Patlolla and D. J. Sutton. 2012. Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* 133-164.
 53. Yousaf, B., G. Liu, Q. Abbas, H. Ullah, R. Wang, M. Zia-ur-Rehman and Z. Niu. 2017. Addition of biochar nano-sheets to soil alleviate health risks of potentially toxic elements via consumption of wheat grown in an industrially contaminated soil. *Chemosphere* 1: 161-170.
 54. Zhang, J., P. Hua and P. Krebs. 2017. Influences of land use and antecedent dry-weather period on pollution level and ecological risk of heavy metals in road-deposited sediment. *Environmental Pollution* 228: 158-168.
 55. Zhang, X., W. Sun, Y. Cena, L. Zhang and N. Wang. 2019. Predicting cadmium concentration in soils using laboratory and field reflectance spectroscopy. *Science of the Total Environment* 650: 321-334.

Systematic Evaluation and Meta-Analysis of Risk, Toxicity Potential, and Carcinogenic and Non-Carcinogenic Risks of Potentially Toxic Elements in Arak City

F. Beigmohammadi¹, E. Solgi^{1*}, M. Soleimani² and A. A. Besalatpour³

(Received: May 24-2021 ; Accepted: December 27-2021)

Abstract

The industrial areas are located near residential centers in the city of Arak and potentially toxic elements (PTEs) pollution is a serious threat to human health and living organisms in this area. Meanwhile, soil contamination by PTEs is one of the challenges in this region and various studies have been conducted in this area. Meta-analysis studies provide a comprehensive evaluation of the results of a subject. In the present study, soil contamination data for PTEs in the 11 years (2009 to 2020) were studied through the studies conducted in Arak. In this study, the risk, potential toxicity, and carcinogenic and non-carcinogenic risks of PTEs were assessed using indices and mathematical relationships. Based on the results of pollution indices, the soil of Arak city in terms of PTEs including Zn, Cd, Cr, Ni, As, Pb, Cu, and Hg were categorized into the polluted and highly polluted classes. The soil of the region in terms of PTEs has significant ecological risk and acute toxicity. Cadmium, arsenic, and mercury showed the ecological risk of 49.3%, 23.2%, and 18.3% respectively, and nickel, chromium, and arsenic were responsible for 34.7%, 23.03%, and 22.07% of the toxicity potential of PTEs in the soil. Arsenic, nickel, and chromium have the highest carcinogenic risk for children in both the ingestion and inhalation pathways, and chromium, arsenic, and nickel have the highest carcinogenic risk from the inhalation pathway for adults. According to the results, the most considerable PTEs in the study area including As, Cd, and Pb, and the most important source of their emission in Arak are anthropogenic resources and industries.

Keywords: Arak city, Potentially toxic elements, Potential toxicity, Bioavailability, Meta-analysis

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran.

2. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3. Department of Water and Soil Resources Management, Inter 3 Institute für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany.

*: Corresponding author, Email: e.solgi@yahoo.com