

بررسی ژئوشیمیایی و زیست‌محیطی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه شهری اصفهان

مازیار میرتمیزدوست؛ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

علی مقیمی کندلوس*؛ استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

مژگان صلواتی؛ استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

سید جواد مرتضوی امیری؛ استادیار گروه ریاضی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۱

چکیده

در تابستان ۱۴۰۱ به منظور بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک مناطق شهری اصفهان از ۲۳ ایستگاه نمونه برداشت شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی با استفاده از روش ICPOES با هضم ۴ اسید تجزیه شیمیایی شدند. شاخص زمین‌بناشتگی نشان داد به ترتیب فلزات $As < Cd < Pb$ بیشترین میزان آلودگی را دارا هستند. نتایج حاصل از فاکتور غنی-شدگی تمام فلزات حاکی از زمین‌زاد بودن منشأ تمامی فلزات به جز Pb ، Cd و As مورد مطالعه در خاک مناطق شهری و زمین‌زاد بودن تجمع آن‌ها بود. نتایج فاکتور آلودگی بیشترین ضریب آلودگی را برای فلزات Pb و Cr نشان داد. نتایج حاصل از شاخص بار آلودگی نشان داد که ۸ نمونه دارای آلودگی و ۱۵ نمونه فاقد آلودگی در خاک مناطق شهری اصفهان می‌باشند. نتایج بررسی خطر اکولوژیکی و خطر محیط‌زیستی فلزات سنگین نشان داد، تمام نمونه‌های مورد بررسی به جز ۹ نمونه برای فلز Cd و ۱ نمونه برای فلز Pb ، دارای خطر اکولوژیک طبقه پایین هستند. همچنین یافته‌های بررسی شاخص خطر محیط‌زیستی با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای خاک مناطق شهری اصفهان نشان داد که خطر محیط‌زیستی فلزات سنگین پایین می‌باشد. طبق نتایج مشخص شد که پتانسیل خطرپذیری فلزات سنگین در خاک مناطق مورد مطالعه به بیماری‌های سرطانی و غیرسرطانی در کودکان بیش‌تر از بزرگسالان است.

واژگان کلیدی: آلودگی، فلزات سنگین، ژئوشیمیایی، زیست‌محیطی، شهر اصفهان.

مقدمه

امروزه آلودگی محیط زیست اعم از محیط‌های دریایی و خشکی از مسائل مهمی است که جوامع مختلف با آن روبه‌رو می‌باشند. در واقع تخریب و آلودگی محیط زیست، ثمره جوامع صنعتی و یکی از راه‌آورد‌های صنعتی‌شدن اجتماعات بشری است (Bineshpour et al., 2021). خاک به همراه آب و هوا اجزاء عمده محیط زیست تلقی می‌شوند، خاک علاوه بر اینکه پایگاه موجودات خشکی‌زی به ویژه تجمع انسانی است، محیط منحصر به فردی برای زندگی انواع موجودات مخصوصاً گیاهان به شمار می‌آید (Sparks et al., 2022). فعالیت‌های روزافزون انسان بر روی کره زمین سبب شده است که کارکرد بخش خاک که خود جزئی از پوسته زمین است در مواردی دچار اختلال گردد (Huang et al., 2020).

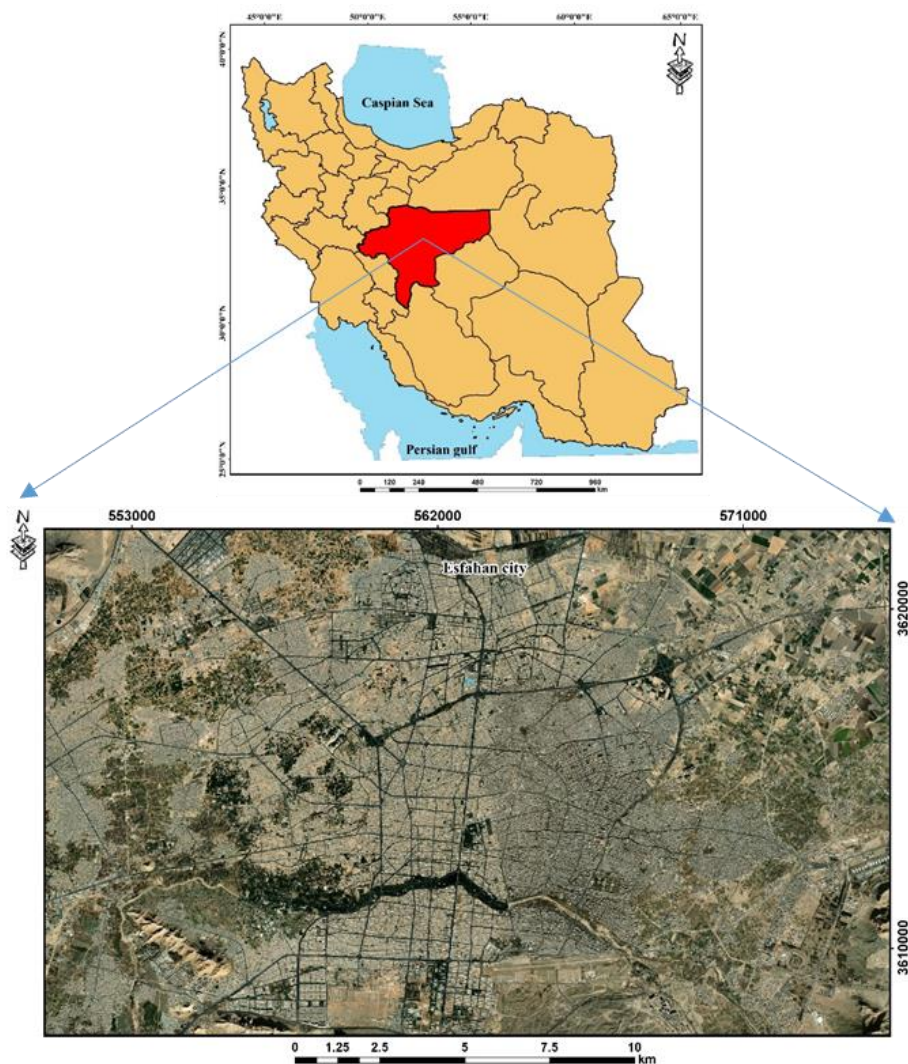
آلاینده‌ها از جمله عوامل مختل‌کننده خاک به شمار رفته که از میان آنها فلزات سنگین به دلیل تجزیه‌ناپذیری در غلظت‌های کم نیز حائز اهمیت هستند (Nazarpour et al., 2019). تغییرات مکانی محتویات فلزات سنگین در خاک‌های سطحی ممکن است تحت تأثیر مواد مادری خاک و یا منابع انسانی باشد. به عبارت دیگر این فلزات به طور طبیعی در خاک وجود داشته، اما در اثر فعالیت‌های انسانی نیز، به خاک افزوده می‌گردند. در حقیقت فعالیت‌های انسانی منجر به تجمع بیشتر فلزات سنگین در خاک می‌گردد (Emenike et al., 2020).

اکوسیستم شهری به عنوان مجموعه‌ای از فاکتورهای طبیعی و انسان‌زاد توصیف می‌شود. آب و هوای محلی، زمین‌شناسی و ویژگی‌های جغرافیایی به عنوان مهمترین فاکتورهای طبیعی تأثیرگذار بر محیط زیست شهری در نظر گرفته می‌شوند (Thakare et al., 2021). در حالی که فاکتورهای انسان‌زاد از قبیل الگوهای جمعیتی و شهرنشینی، نحوه استفاده از منابع و رفتار اجتماعی ساکنین شهری وابسته است که خود متاثر از شرایط اجتماعی و اقتصادی منطقه می‌باشد. شهرنشینی کلان به شکل تراکم افزایش جمعیت، صنعتی شدن شدید و بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع، از مشخصات یک شهر با یک سیستم منحصر به فرد می‌باشد که اثرات بسیار وخیمی بر روی ساختار و عملکرد اکوسیستم دارند (Hussein et al., 2021). خاک یکی از منابع پویای طبیعی برای زندگی انسان می‌باشد و به واسطه بافت پیچیده خود یکی از اولین دریافت‌کننده‌های آلودگی از جمله فلزات سنگین می‌باشد. خاک حاوی مقدار طبیعی از فلزات سنگین در خود می‌باشد که زمینه‌نامیده می‌شود. اندازه مقدار زمینه بستگی به ترکیب مواد سنگی مادر دارد که منشاء اصلی خاک می‌باشد. همچنین فعالیت‌های انسانی که مواد پسماندها را به خاک‌های شهری اضافه می‌کنند، بر غلظت عناصر تأثیر گذار هستند (Wu et al., 2021). عمده‌ترین منبع آلودگی خاک و محیط زیست به فلزات سنگین از راه، فعالیت‌های صنعتی و ساخت دست بشر نظیر معادن، ذوب فلزات، آبکاری‌ها، نیروگاه‌ها، خروجی از آگروز وسایل نقلیه موتوری، ایستگاه‌های نگهداری و عرضه بنزین و دیگر سوخت‌های فسیلی، محل‌های تولید و مصرف کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، استفاده از پساب و لجن فاضلاب در کشاورزی و مکان‌های دفن زباله به ویژه ضایعات صنعتی می‌باشد. همچنین یکی از مهمترین منابع انسان‌زاد آلودگی در محیط‌های شهری ترافیک می‌باشد (Gebeyehu et al., 2020). فلزات سنگین از قبیل سرب، روی، مس، کادمیم، آرسنیک و کرم به دلیل دارا بودن خاصیت سمی و تجمع‌زیستی از جمله مهمترین و جدی‌ترین آلودگی‌های تهدیدکننده محیط زیست ما می‌باشند. افزایش غلظت این فلزات اثرات منفی بسیار زیادی بر سلامت انسان دارد که عمدتاً از طریق هضم، تنفس و جذب پوستی صورت می‌گیرند (Zhang et al., 2020). فلزات سنگین قابل تجزیه‌زیستی نیستند و می‌توانند طی دوره‌های زمانی طولانی، در رسوبات، خاک و گرد و غبار باقی بمانند و در صورت ورود به بدن انسان، اثرات سمی زیانباری مانند سرطان را به وجود آورند (Wen et al., 2019). سرطان عامل اصلی مرگ و میر در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه جهان است. افزایش ابتلا به سرطان ممکن است ناشی از افزایش سن جمعیت یا رشد جمعیت، شیوه زندگی سرطان‌زا و به‌ویژه آلودگی‌های زیست محیطی باشد (Ku et al., 2021). توسعه صنایع و افزایش بی‌رویه جمعیت شهرها، روستاها و در پی آن توسعه مناطق کشاورزی، استفاده از کودها و سموم دفع آفات موجب می‌گردد تا میزان زیادی فاضلاب شهری، صنعتی و همچنین پساب‌های کشاورزی که دارای ترکیبات شیمیایی مختلف خصوصاً فلزات می‌باشند وارد اکوسیستم‌های آبی گردد (Xiao et al., 2021). در دهه‌های اخیر همراه با رشد و توسعه صنعتی، مناطق شهری به‌طور فزاینده‌ای در معرض آلودگی فلزات سنگین قرار گرفته‌اند، عناصری که به دلیل پایداری در محیط‌زیست، ویژگی زیست‌انباشت و توانایی جهت ورود به زنجیره غذایی، آلاینده جدی برای انسان محسوب می‌شوند (Ke et al., 2017).

شهر اصفهان که قطب تولید آهن، فولاد، مصالح ساختمانی و پتروشیمی در ایران بشمار می‌رود به واسطه همین تولیدات صنعتی دچار معضل بزرگی به نام آلاینده‌گی‌های زیست محیطی شده است (Gandomkar et al., 2020). یکی از این آلاینده‌ها رشد فلزات سنگین در این شهر است که به علت فعالیت‌های متعدد صنعتی، ترافیک، افزایش جمعیت و ... در این شهر رخ داده است. با توجه به مطالب گفته شده این احتمال وجود دارد که آلودگی‌های سمی موجود در خاک شهری به محصولات کشاورزی و سپس به چرخه اکوسیستم وارد شوند. تحقیق حاضر با هدف بررسی ژئوشیمیایی و زیست‌محیطی آلودگی فلزات سنگین As, Cr, Cu, Ni, Pb, V و Zn در مناطق شهری اصفهان با استفاده از شاخص‌های زمین‌انباشت ژئوشیمیایی (Igeo)، فاکتور غنی‌شدگی (EF)، فاکتور آلودگی (CF)، فاکتور بار آلودگی (PLI)، درجه آلودگی (Cd)، ارزیابی ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین (ER)، بررسی ریسک محیط زیستی (RI) و شاخص‌های سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی آن‌ها در اثر مواجهه پوستی، استنشاقی و گوارشی کودکان و بزرگسالان انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند امکان ارزیابی مناسب آثار ناشی از ورود فلزات سنگین به محیط زیست را فراهم کند.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شهر اصفهان می‌باشد که از نظر جغرافیایی بین مختصات با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۴ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). متوسط ارتفاع از سطح دریا ۱۶۰۵ متر و مساحت آن ۹۰ کیلومتر مربع می‌باشد. شهر اصفهان با توجه به افزایش روزافزون جمعیت، مصرف انرژی و ایجاد آلودگی ناشی از سیستم حمل و نقل، افزایش تعداد وسایل نقلیه و گسترش فعالیت‌های معدنی و صنعتی در زمره شهرهایی است که مسائل زیست محیطی به ویژه آلودگی خاک در آن اهمیتی دوچندان دارد. در قسمت‌های جنوبی اراضی منطقه مسکونی سپاهان‌شهر، چندین معدن دولتی و خصوصی وجود دارد که غنی از رگه‌های سرب و روی می‌باشند و از سال‌های قبل فرآیند استخراج از آنها شروع شده و تا کنون هم ادامه دارد.



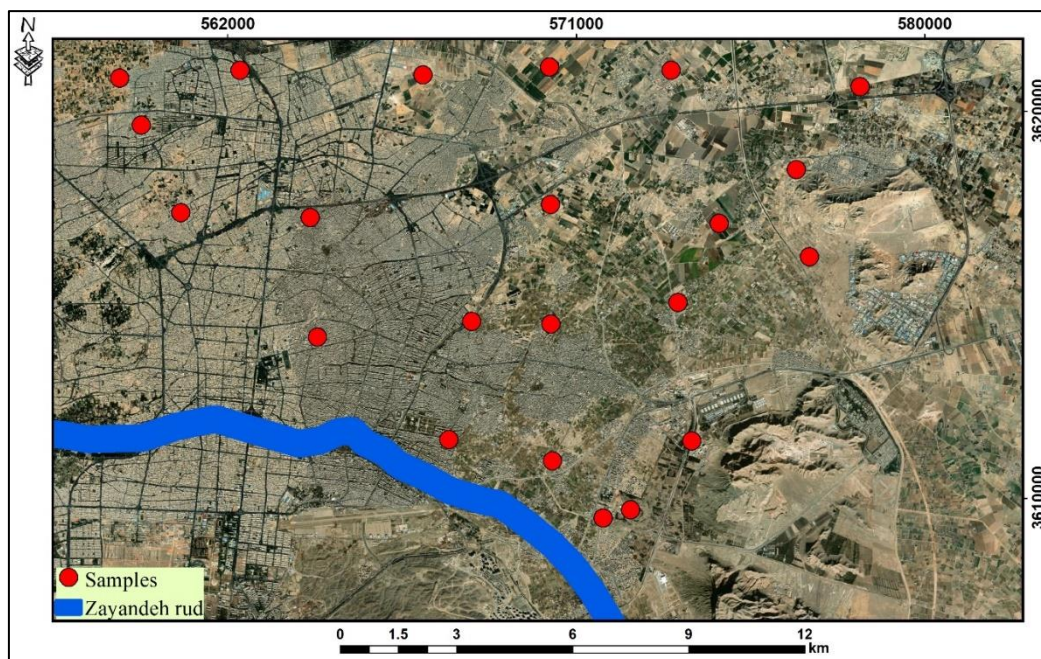
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

نمونه‌برداری و آنالیز آزمایشگاهی

جهت تعیین ایستگاه‌های مطالعاتی داشتن اطلاعات کافی از شرایط منطقه لازم و ضروری است. در این مطالعه کیفیت خاک شهر اصفهان در ۲۳ نقطه مورد اندازه‌گیری و کنترل قرار گرفته است (شکل ۲). بدین منظور ابتدا موقعیت کلی منطقه با استفاده از نقشه مورد بررسی قرار گرفت. سپس با ارزیابی اطلاعات موجود، ایستگاه‌های مورد نظر با توجه به در معرض بودن بیشترین آلودگی ناشی از فعالیت‌های زمین‌زاد و انسان‌زاد مشخص و در فصل تابستان ۱۴۰۱ مورد آنالیز قرار گرفتند. برای ارزیابی و ردیابی فلزات سنگین و فاکتورهای کنترل‌کننده تحرک و حمل آن‌ها با توجه به موقعیت مکانی کارخانه‌ها، موقعیت زمین‌شناسی ناحیه و راه‌های دسترسی موجود نمونه‌برداری سیستماتیک انجام شده است.

در این پژوهش نمونه‌برداری به وسیله دستگاه پترسون گرب انجام گرفت. وزن نمونه‌های برداشت شده از محل هر ایستگاه نمونه‌برداری، حدوداً ۵ کیلوگرم بود. برای آماده کردن خاک‌های برداشت شده در دمای ۲۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد هوا خشک، بعد الک شدند.

اعمال خشک کردن، آسیاب و تقسیم بر روی آنها انجام شد تا به پودر ۲۰۰ مش تبدیل شوند. آنگاه نمونه‌ها به آزمایشگاه آرایشیمی در کرج منتقل شدند. به قصد تعیین ترکیب خاک مورد بررسی با دستگاه ICPOES با هضم ۴ اسید مورد تجزیه قرار گرفتند. نمونه‌های خاک توسط دستگاه گرب مدل ون‌وین جمع‌آوری و تا زمان آماده‌سازی در داخل فریزر نگهداری شدند. نمونه‌ها بر اساس شماره ایستگاه و تکرار (۲ تکرار و هر تکرار شامل ۴ ترکیب) در ظروف پلاستیکی قرار گرفته و در دمای اتاق خشک گردید. نمونه‌های خاک خشک شده بوسیله هاون سنگی خرد و از الک با مش ۲۳۰ عبور داده شدند.



شکل ۲: موقعیت نقاط نمونه‌برداری در مناطق شهری اصفهان.

شاخص‌های زیست‌محیطی

شاخص زمین‌انباشت مولر I_{geo}

از این روش برای ارزیابی آلودگی خاک با فلزات سنگین، مقایسه غلظت اندازه‌گیری شده هر فلز سنگین در نمونه با غلظت پس‌زمینه ژئوشیمیایی آن در رسوب استفاده می‌شود. به منظور تعیین شدت آلودگی، می‌توان از شاخص زمین‌انباشتگی که توسط Muller (1969) پیشنهاد شده، استفاده کرد. این شاخص با علامت I_{geo} نشان داده شده و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2 [Cn/Bn \times 1.5] \quad \text{رابطه ۱}$$

بر اساس شاخص زمین‌انباشتگی مولر I_{geo} (شاخص شدت آلودگی در خاک) Cn : غلظت عنصر مورد نظر در رسوب Bn : غلظت عنصر در سنگ شیل 1.5 فاکتور تصحیح شیل می‌باشد. در این فرمول به لحاظ آنکه غلظت پیشین عنصر از طریق تجزیه کامل به دست نمی‌آید، باید از غلظت شیل که یک نوع سنگ رسوبی است، استفاده می‌گردد. چون متوسط غلظت عناصر در شیل نسبت به متوسط غلظت عناصر در خاک غیرآلوده کمتر است، بنابراین باید برای متعادل‌سازی آن را در عدد 1.5 ضرب می‌کنند. بر اساس این شاخص، مطابق جدول ۱ خاک از

نظر درجه آلودگی به هفت گروه تقسیم‌بندی می‌شوند (Muller, 1969).

جدول ۱: مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی مورد استفاده در تعیین آلودگی خاک (Muller, 1969).

شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo})	شدت آلودگی
کمتر یا برابر با صفر	غیر آلوده
صفر تا یک	غیر آلوده تا کمی آلوده
۱ تا ۲	کمی آلوده
۲ تا ۳	کمی آلوده تا خیلی آلوده
۳ تا ۴	خیلی آلوده
۴ تا ۵	خیلی آلوده تا شدیداً آلوده
بیشتر از ۵	شدیداً آلوده

فاکتور غنی‌شدگی EF

از این شاخص برای ارزیابی تأثیرات انسان‌زاد احتمالی از فاکتور غنی‌شدگی فلزات استفاده شد. ضریب غنی‌شدگی بیانگر شدت تأثیر عامل خارجی (اغلب انسان‌زاد) بر خاک است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Li et al., 2021):

$$EF = \frac{(Cx/Cref)_{Sample}}{(Cx/Cref)_{Background}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در اینجا Cx غلظت اندازه‌گیری در نمونه‌های خاک و $Cref$ عنصر مرجع است که در این رابطه از عنصر Al استفاده شده است. طبقه‌بندی شاخص EF به شرح زیر است (جدول ۲).

جدول ۲: رابطه میان EF و درجه غنی‌شدگی (Li et al., 2021).

فاکتور غنی‌شدگی (EF)	شدت غنی‌شدگی
کمتر از ۱	بدون غنی‌شدگی
بین ۱ تا ۳	غنی‌شدگی کم
بین ۳ تا ۵	غنی‌شدگی متوسط
بین ۵ تا ۱۰	غنی‌شدگی نسبتاً شدید
بین ۱۰ تا ۲۵	غنی‌شدگی شدید
بین ۲۵ تا ۵۰	غنی‌شدگی خیلی شدید
بیشتر از ۵۰	غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید

فاکتور آلودگی (CF)

برای تحقیق بیشتر چگونگی آرایش فلزهای سنگین، برای همه ایستگاه‌ها، عامل آلودگی (CF) (لحاظ شدت تا میزان آرایش به فلزات سنگین، در ایستگاه‌های متفاوت، روشن گردد. با این قصد، مقدار عامل آرایش (CF) از تقسیم مقدار چگالی فلز مورد نظر در نمونه خاک بر میزان شیل متوسط، حساب شد که بر طبق آن، CF بیشتر از ۱ ($CF > 1$) مشخص‌کننده آرایش و CF پایین‌تر از ۱ ($CF < 1$) مشخص‌کننده آلوده نبودن ایستگاه به آن عنصر فلزی است. آنگاه با توجه به فرمول زیر میزان فاکتور بار آلودگی حساب شد (Magni et al., 2021):

$$CF = \frac{C_m \text{ Sample}}{C_m \text{ Background}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن $C_m \text{ Sample}$ چگالی فلز سنگین در نمونه خاک مورد نظر و $C_m \text{ Background}$ مقدار فلز معادل با متوسط سنگهای سطحی نشان داده شده توسط مارتین و می‌بک ۱۹۷۹ می‌باشد. تقسیم‌بندی عامل آرایش (CF) در جدول ۳ مشخص گردیده است (Magni et al., 2021).

جدول ۳: فاکتور آلودگی (CF) و سطح آلودگی (Magni et al., 2021).

سطح آلودگی	ضریب آلودگی
آلودگی پایین	$CF < 1$
آلودگی متوسط	$1 \leq CF < 3$
آلودگی قابل توجه	$3 \leq CF < 6$
آلودگی خیلی زیاد	$CF > 6$

فاکتور بار آلودگی (PLI)

PLI فاکتور بار آلودگی از رابطه زیر به دست می‌آید (Zhang et al., 2021):

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n} \quad (\text{رابطه ۴})$$

n تعداد فلزهای سنگین و CF ضریب آلودگی است. فاکتور بار آلودگی بالاتر از یک ($PLI > 1$) مشخص کننده آلودگی، کمتر از یک ($PLI < 1$) مشخص کننده آلوده نبودن و فاکتور بار آلودگی نزدیک به ۱ مشخص کننده چگالی مشابه با زمینه می‌باشد.

درجه آلودگی Cd (Degree of contamination)

اصولاً مجموع ضرایب آلودگی آلاینده‌های مورد مطالعه، درجه کلی آلودگی خاک را بیان می‌کند که به آن درجه آلودگی هاکنسون گفته می‌شود و طبق رابطه ۵ محاسبه و جدول ۴ تفسیر می‌شود (Hakanson, 1980). که در آن n تعداد عناصر در یک ایستگاه نمونه‌برداری می‌باشد.

$$Cd = \sum_{i=1}^n CF^i \quad (\text{رابطه ۵})$$

جدول ۴: فاکتور آلودگی (Cd) و سطح آلودگی (Hakanson, 1980).

سطح آلودگی	درجه آلودگی
آلودگی پایین	$6 \geq Cd$
آلودگی متوسط	$12 \geq Cd \geq 6$
آلودگی قابل توجه	$24 \geq Cd \geq 12$
آلودگی خیلی زیاد	$Cd \geq 24$

ارزیابی خطر اکولوژیکی خطر اکولوژیکی (ER) و ریسک محیط زیستی (RI) فلزات سنگین

در منطقه مورد مطالعه

شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی اولین بار توسط هاکنسون به منظور ارزیابی خطر آلودگی خاک به وسیله فلزات سنگین استفاده گردید. که براساس میزان سمیت فلزات روش‌های اصلاحی به وسیله افراد مختلفی همچون Wang et al (2013) و Yi et al (2011) بکار گرفته شده است. دو شاخص ER و RI طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$E_r^i = \frac{c^i}{c_0^i} \times T_r^i \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RI = \sum_{i=2}^n E_r^i \quad (\text{رابطه ۷})$$

در معادلات فوق E_r^i : شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی، c^i و c_0^i : به ترتیب مقدار عنصر اندازه‌گیری شده در رسوب مورد مطالعه و مقدار طبیعی (Background Value) و T_r^i : برابر فاکتور پاسخ سمیت فلز است. در مطالعه حاضر n برابر با تعداد عناصر مورد مطالعه (معادل ۷) در نظر گرفته شد. براساس رویکرد Hakanson (1980) فاکتور پاسخ سمیت برای فلزات As, Cr, Cu, Ni, Pb و Zn برابر ۱۰، ۲، ۵، ۵، ۵ و ۱ می‌باشد. گفتنی است این شاخص برای عنصر V تعیین نشده است. در جدول ۵ میزان خطر اکولوژیکی و محیطی فلزات سنگین مورد بررسی را نمایش داده می‌شود.

جدول ۵: کلاس‌بندی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین (Hakanson, 1980).

E_r^i	خطر اکولوژیکی هر فلز	شاخص خطر (RI)	خطر اکولوژیکی و محیط زیستی
$40 \geq E_r^i$	خطر پایین	$150 \geq RI$	خطر پایین
$80 \geq E_r^i \geq 40$	خطر متوسط	$300 \geq RI \geq 150$	خطر متوسط
$160 \geq E_r^i \geq 80$	خطر قابل ملاحظه	$600 \geq RI \geq 300$	خطر زیاد
$320 \geq E_r^i \geq 160$	خطر زیاد	$RI \geq 600$	خطر خیلی زیاد
$E_r^i \geq 320$	خطر خیلی زیاد		-

ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی

برای ارزیابی ریسک‌های سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین موجود در خاک مناطق شهری اصفهان از روش ارزیابی ریسک بهداشتی ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) استفاده شد (USEPA, 1997). در بررسی ریسک‌های سرطان‌زایی فلزات سنگین، مواجهه کودکان و بزرگسالان با فلزات از هر سه مسیر بلع، تنفس و جذب پوستی مد نظر قرار گرفت. با توجه به اینکه میزان مواجهه با یک دوز (غلظت) روزانه برای هر فلز به صورت جداگانه بیان می‌شود، متقارن‌جذب روزانه فتلزات (Average Daily Dose (ADD)) در هریک از مسیرها با استفاده از معادلات ۸ تا ۱۰ محاسبه شد.

$$ADD_{ingestion} = C_{soil} \frac{InR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$ADD_{inhalation} = C_{soil} \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$ADD_{dermal} = C_{soil} \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن $ADD_{ingestion}$ ، $ADD_{inhalation}$ و ADD_{dermal} به ترتیب مقدار میانگین جذب روزانه فلزات (برحسب میلی گرم بر کیلوگرم در روز) از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی است. C غلظت فلزات در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)، $InhR$ و $Ingr$ به ترتیب نرخ بلع و نرخ تنفس خاک (میلی گرم در روز و متر مکعب در روز)، EF فراوانی قرارگیری در معرض فلزات (روز در سال)، ED مدت قرارگیری در معرض فلزات (سال)، BW وزن بدن شخص قرار گرفته در معرض فلزات (کیلوگرم)، AT مدت زمان قرارگیری در معرض هر مقدار از فلزات به طور میانگین (روز)، PEF فاکتور انتشار فلزات از خاک به هوا (متر مکعب بر کیلوگرم)، SA ناحیه‌ای از سطح پوست قرار گرفته در معرض فلزات (سانتی متر مربع)، AF فاکتور چسبندگی خاک به پوست (میلی گرم بر سانتی متر در روز)، ABS فاکتور جذب سطحی پوست (بدون واحد) (Gupta et al., 2021).

پس از محاسبه مقدار جذب روزانه فلزات برای هر یک از مسیرها، شاخص خطر غیرسرطان‌زایی (HQ) کل مسیرها برای کارگران صنعتی، کودکان و بزرگسالان از تقسیم مجموع میزان ADD_i هر مسیر به مقدار مرجع سمیت آن فلز تعیین خواهد شد (رابطه ۱۱). در رابطه ۴، HQ (Hazard Quotient) ریسک غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین در هر مسیر، $RfDi$ مقدار مرجع سمیت فلز در هر مسیر (mg/kg.day) است. اگر $HQ \leq 1$ باشد، با سلامت انسان ناسازگار نیست و اگر $HQ > 1$ باشد، اثرات نامطلوب و نگران کننده‌ای بر سلامت انسان دارد. این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Thongyuan et al., 2021):

$$HQ = \sum \frac{ADD_i}{RfDi} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

مقدار شاخص ریسک تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI) کل فلزات سنگین برای بزرگسالان و کودکان طبق رابطه ۱۲ بدست می‌آید (Wu et al., 2021):

$$HI = \sum HQ = \sum \frac{ADD_i}{RfDi} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

ارزیابی خطر سرطان‌زایی در هر یک از مسیرهای سه گانه فقط با استفاده از رابطه ۱۳ انجام خواهد شد (Wu et al., 2021).

$$Risk(RI) = \sum ADD_i \times SF_i \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

در معادله فوق، Risk (RI) خطر سرطان‌زایی، ADD_i مقادیر جذب روزانه فلزات در هر یک از مسیرهای قرارگیری در معرض فلزات (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) و SF_i فاکتور احتمال ابتلا به سرطان در هر واحد قرارگیری در معرض فلزات (میلی گرم بر کیلوگرم در روز) است (Wu et al., 2021).

یافته‌ها

نتایج آنالیز نمونه‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. آمارهای توصیفی غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده موجود در خاک منطقه شهری اصفهان به صورت حداقل، حداکثر، میانگین، میانه و ... بر حسب ppm در جدول ۷ خلاصه شده است. در بین فلزات سنگین مورد سنجش، بالاترین غلظت (Max) فلزات در خاک محدوده مورد مطالعه مربوط به فلز Zn با ppm 775 و پایین‌ترین (Min) مربوط به فلز Cd با ppm 0.08 اختصاص یافت (جدول ۷). غلظت فلزات سنگین به‌ترتیب میانگین (Aver) به‌صورت $As < V < Cr < Ni < Pb < Cu < Cd$ افزایش یافت.

ضریب تغییرات (CV)، میزان نسبی تغییرات (نرمال بودن) عناصر در نمونه‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد (Sungur et al., 2019). اگر $CV \leq 20$ باشد نشان دهنده تغییرات کم، $20 < CV \leq 50$ نشان دهنده تغییرات حد واسطه، $50 < CV \leq 100$ نشان دهنده تغییرات بالا، در حالی که CV بالای ۱۰۰٪ بسیار بالا (نرمال نبودن) محسوب می‌شود (Keshavarzi and Kumar, 2019). با توجه به جدول ۷ ضرایب تغییرات غلظت عناصر مورد بررسی به ترتیب $V < Cr < Ni < Cu < As < Cd < Pb < Zn$ افزایش یافت. بیشترین میانگین ضریب تغییرات در خاک شهر اصفهان مربوط به عنصر Zn با ۱۲۸/۴۵ درصد بود. مقادیر بالای ضریب تغییرات عنصر Zn نشان می‌دهد که غلظت این عنصر به‌طور قابل توجهی در ایستگاه‌های مختلف نمونه برداری متفاوت است؛ همچنین نمایانگر توزیع ناهمگن آن‌ها (نرمال نبودن) به دلیل فعالیت‌های انسانی است. از طرفی مقدار کم میانگین ضریب تغییرات V با ۱۱/۱۳ درصد توزیع نرمال این عنصر در خاک منطقه شهری اصفهان را نشان می‌دهد.

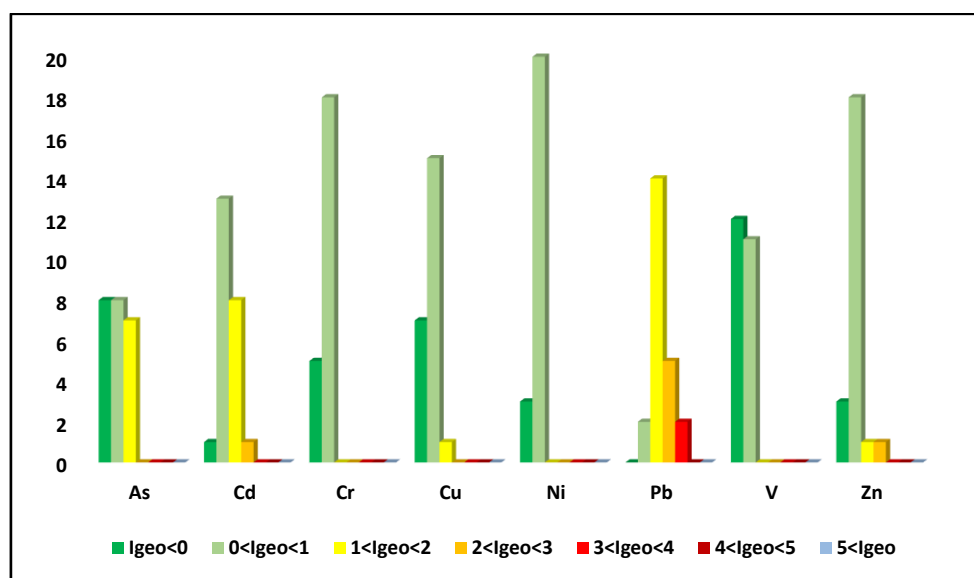
جدول ۶: نتایج آنالیز نمونه‌های خاک مناطق شهری اصفهان (ppm).

Stations	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
S1	10.5	0.2	73	47.7	61	34.9	80	73.8
S2	8.1	0.4	67	72.8	58	43.1	80	88.8
S3	8	0.4	80	39.1	54	67.7	76	92.4
S4	7.8	0.4	83	51.8	62	22.2	81	77.6
S5	7.8	0.4	86	47.6	54	41.1	71	88.8
S6	9.2	0.4	65	39.4	58	36.7	75	86.5
S7	9.1	0.2	59	30	59	25.3	72	84.8
S8	21.1	1.9	84	34.9	64	196	82	755
S9	6.3	0.4	71	35.1	64	25.1	71	86.6
S10	7.9	0.4	77	30.6	65	15.9	88	68.8
S11	16.7	0.5	61	24.7	51	31.5	90	91.2
S12	19.7	0.6	53	24.8	50	16	82	55.6
S13	12.3	0.5	61	34.5	57	19.7	92	75.1
S14	18.8	0.7	61	31.7	57	27.6	92	63.8
S15	13.2	0.4	66	29.4	53	22.1	89	65.9
S16	21.6	0.4	57	23.4	32	26.3	107	101
S17	7.2	0.3	55	22.2	45	16.9	100	72.7
S18	23.9	0.5	61	40.4	60	20.5	95	77.6
S19	12.7	0.5	67	30.4	58	23.6	95	62.7
S20	16.7	0.6	66	39.5	56	26.6	90	76.2
S21	21.9	0.8	73	31.7	49	34.2	95	212
S22	24.7	0.4	67	24.6	48	22.1	85	67.5
S23	6.8	0.075	56	24.1	30	17.5	83	46.9

جدول ۷: آمارهای توصیفی غلظت فلزات مناطق شهری اصفهان و شیل جهانی (Meybeck, 2013).

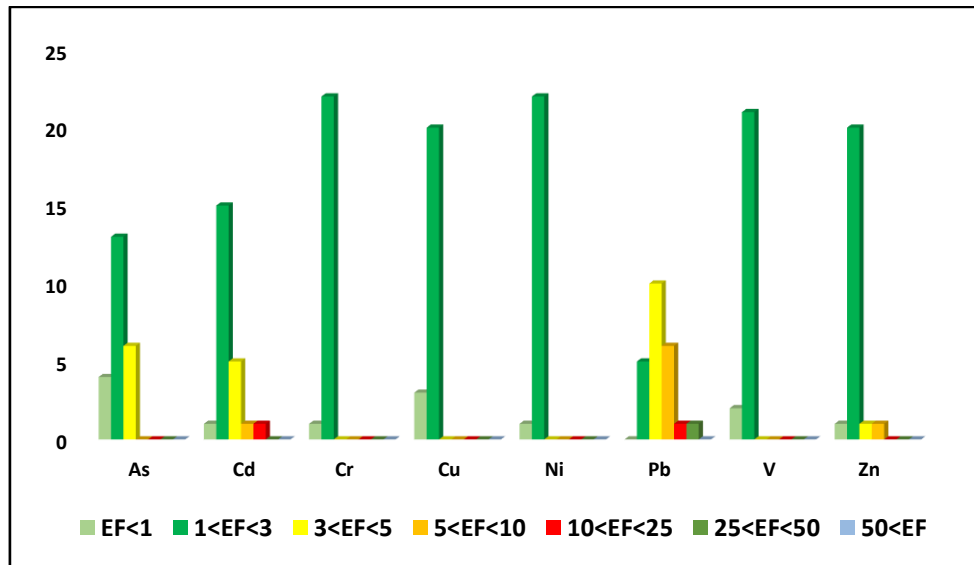
Metal (ppm)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
Min	6.30	0.08	53	22.20	30	15.90	71	46.90
Max	24.70	1.90	86	72.80	65	196	107	755
Aver	13.57	0.49	67.35	35.23	54.13	35.33	85.70	111.80
Stev	6.24	0.34	9.62	11.62	9.03	36.88	9.54	143.60
Var	38.89	0.12	92.51	134.99	81.48	1360.46	90.95	20620.71
CV (%)	45.97	69.64	14.28	32.98	16.68	104.40	11.13	128.45
Kur	-1.33	13.35	-0.67	3.82	2.21	18.11	-0.37	20.61
Skew	0.49	3.26	0.52	1.66	-1.46	4.10	0.23	4.47

یافته‌های حاصل از نتایج محاسبه میزان شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) در شکل ۳، آورده شده است. بر اساس این شاخص بیشترین مقدار برای فلز Pb و کمترین مقدار برای V بدست آمد. میانگین حاصل از شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) فلزات سنگین در خاک مناطق شهری اصفهان به ترتیب $Cd < Pb(1.83) < Zn(0.45) < As(0.49) < Ni(0.23) < Cu(0.16) < Cr(0.15) < V(-0.2)$ بدست آمد.



شکل ۳: مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) فلزات مورد مطالعه در خاک مناطق شهری اصفهان.

شکل ۴ نتایج بررسی فاکتور غنی‌شدگی (EF) را نشان می‌دهد. میانگین حاصل از فاکتور غنی‌شدگی (EF) فلزات سنگین در خاک مناطق شهری اصفهان به ترتیب $Cd(3.12) < Pb(5.58) < Zn(2.23) < As(1.98) < Ni(1.48) < Cu(1.46) < Cr(1.40) < V(1.23)$ بدست آمد. مطابق شکل ۴ مقدار EF بدست آمده برای تمامی فلزات مورد مطالعه به جز فلزات Pb و Cd کم‌تر از ۳ شد که نشان‌دهنده عدم فعالیت انسانی و زمین‌زاد بودن تمرکز فلزات سنگین در خاک مناطق شهری می‌باشد. میزان غنی‌شدگی متوسط عناصر Cd, Pb و تا حدودی Zn می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسان‌زاد منطقه مثل فعالیت کشاورزی، معدن‌کاری و ورود فاضلاب‌ها، کودها و ... به خاک مناطق شهری اصفهان باشد.

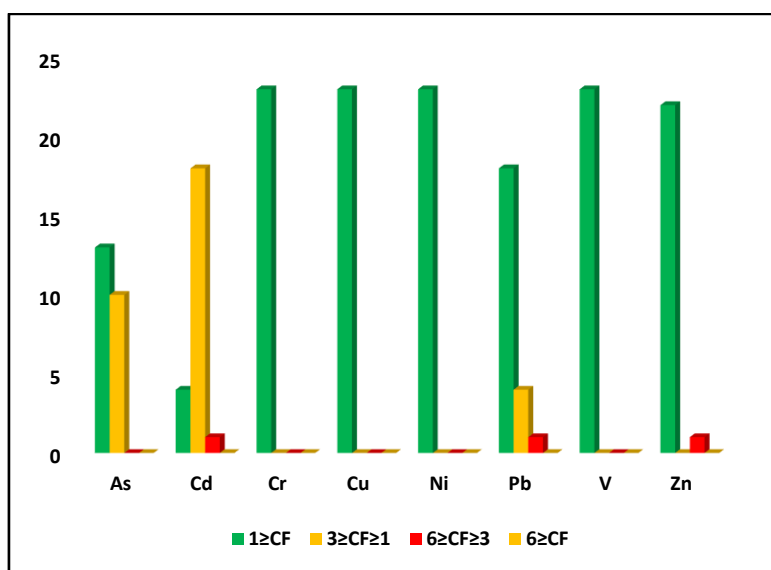


شکل ۴: مقادیر فاکتور غنی‌شدگی (EF) فلزات مورد مطالعه در خاک مناطق شهری اصفهان.

نتایج بررسی فاکتور آلودگی (CF) نشان داد اکثر نمونه‌ها در طبقه ضریب آلودگی پایین تا متوسط قرار دارند (جدول ۸). به طوری که برای فلزات Cr، Cu، V و Ni تمامی نمونه‌ها دارای آلودگی پایین، برای فلز Zn به ترتیب ۲۲ نمونه آلودگی پایین و ۱ نمونه آلودگی قابل توجه، برای فلز Pb ۱۸ نمونه آلودگی پایین، ۴ نمونه آلودگی متوسط و ۱ نمونه آلودگی قابل توجه، برای Cd ۴ نمونه آلودگی پایین، ۱۸ نمونه آلودگی متوسط و ۱ نمونه آلودگی قابل توجه و در نهایت برای فلز As ۱۳ نمونه آلودگی کم و ۱۰ نمونه آلودگی متوسط را نشان دادند (شکل ۵). بطور کلی اکثر فلزات بجز As، Cd و Pb در خاک مناطق شهری اصفهان روند آلودگی کم را نشان می‌دهد. به طور کلی بر اساس جدول ۱۰ بررسی شاخص بار آلودگی (PLI) فلزات سنگین منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد ۸ نمونه دارای آلودگی و ۱۵ نمونه فاقد آلودگی در خاک منطقه شهری اصفهان می‌باشد.

جدول ۸: نتایج فاکتور آلودگی (CF)، درجه آلودگی (Cd) و شاخص بار آلودگی (PLI) نمونه‌های خاک مناطق شهری اصفهان.

Stations	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	CD	PLI
S1	0.81	0.67	0.81	1.06	0.90	2.91	0.62	0.78	9.11	0.88
S2	0.62	1.33	0.74	1.62	0.85	3.59	0.62	0.93	10.86	1.00
S3	0.62	1.33	0.89	0.87	0.79	5.64	0.58	0.97	12.22	0.98
S4	0.60	1.33	0.92	1.15	0.91	1.85	0.62	0.82	8.79	0.91
S5	0.60	1.33	0.96	1.06	0.79	3.43	0.55	0.93	10.14	0.94
S6	0.71	1.33	0.72	0.88	0.85	3.06	0.58	0.91	9.56	0.91
S7	0.70	0.67	0.66	0.67	0.87	2.11	0.55	0.89	7.64	0.77
S8	1.62	6.33	0.93	0.78	0.94	16.33	0.63	7.95	36.11	1.91
S9	0.48	1.33	0.79	0.78	0.94	2.09	0.55	0.91	8.44	0.84
S10	0.61	1.33	0.86	0.68	0.96	1.33	0.68	0.72	7.77	0.83
S11	1.28	1.67	0.68	0.55	0.75	2.63	0.69	0.96	9.73	0.93
S12	1.52	2.00	0.59	0.55	0.74	1.33	0.63	0.59	8.42	0.82
S13	0.95	1.67	0.68	0.77	0.84	1.64	0.71	0.79	8.63	0.90
S14	1.45	2.33	0.68	0.70	0.84	2.30	0.71	0.67	10.24	0.98
S15	1.02	1.33	0.73	0.65	0.78	1.84	0.68	0.69	8.34	0.86
S16	1.66	1.33	0.63	0.52	0.47	2.19	0.82	1.06	9.18	0.88
S17	0.55	1.00	0.61	0.49	0.66	1.41	0.77	0.77	6.85	0.72
S18	1.84	1.67	0.68	0.90	0.88	1.71	0.73	0.82	9.80	1.00
S19	0.98	1.67	0.74	0.68	0.85	1.97	0.73	0.66	8.88	0.90
S20	1.28	2.00	0.73	0.88	0.82	2.22	0.69	0.80	10.02	1.00
S21	1.68	2.67	0.81	0.70	0.72	2.85	0.73	2.23	12.94	1.19
S22	1.90	1.33	0.74	0.55	0.71	1.84	0.65	0.71	9.14	0.91
S23	0.52	0.25	0.62	0.54	0.44	1.46	0.64	0.49	5.64	0.57



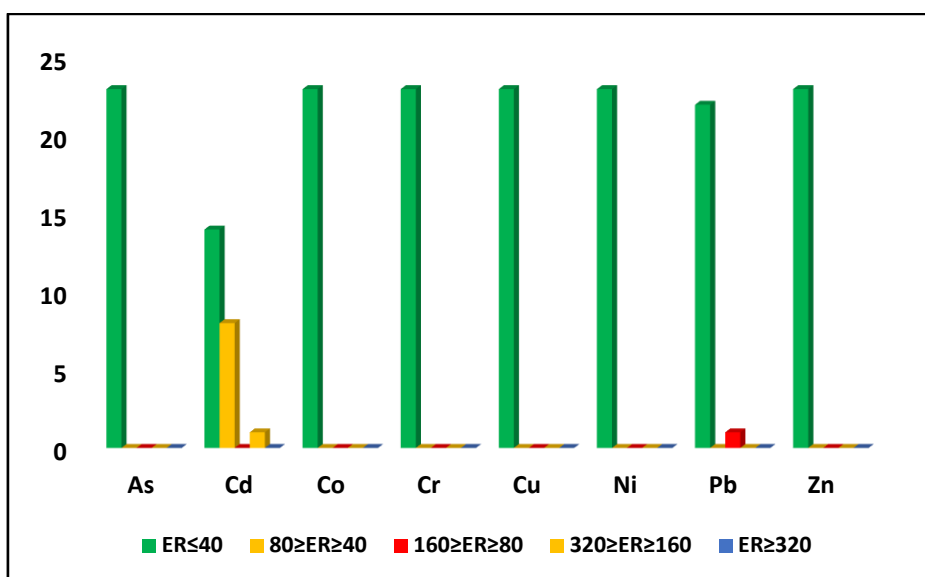
شکل ۵: فاکتور آلودگی (CF) فلزات مورد مطالعه در خاک مناطق شهری اصفهان.

ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

نتایج بررسی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در شکل ۶ و جدول ۹ آورده شده است. نتایج بررسی خطر اکولوژیکی این یافته‌ها نشان می‌دهد تمام فلزات به جز ۹ نمونه از فلز Cd و ۱ نمونه از فلز Pb مورد بررسی از نظر خطر اکولوژیکی (ER) فلزات سنگین در طبقه خطر پایین قرار دارند. به علاوه روند تغییرات خطر کلی هر فلز در منطقه نشان می‌دهد به ترتیب $Cd > Pb > As > Ni > Cu > Cr > Zn$ ارزیابی می‌گردد. در واقع بیشترین و کمترین خطر به ترتیب مربوط به فلز Cd و Zn است. همچنین طبق جدول ۹ یافته‌های بررسی ریسک محیط زیستی (RI) فلزات سنگین نشان داد به جز یک ایستگاه با توجه به مقادیر به دست آمده (کمتر از ۱۵۰) خطر محیط زیستی فلزات سنگین پایین بوده است.

جدول ۹: خطر اکولوژیکی (ER) و ریسک محیط زیستی (RI) فلزات سنگین نمونه‌های خاک مناطق شهری اصفهان.

Stations	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	RI
S1	8.08	20	1.62	5.30	4.49	14.54	0	0.78	54.80
S2	6.23	40	1.49	8.09	4.26	17.96	0	0.93	78.97
S3	6.15	40	1.78	4.34	3.97	28.21	0	0.97	85.43
S4	6.00	40	1.84	5.76	4.56	9.25	0	0.82	68.23
S5	6.00	40	1.91	5.29	3.97	17.13	0	0.93	75.23
S6	7.08	40	1.44	4.38	4.26	15.29	0	0.91	73.37
S7	7.00	20	1.31	3.33	4.34	10.54	0	0.89	47.42
S8	16.23	190	1.87	3.88	4.71	81.67	0	7.95	306.30
S9	4.85	40	1.58	3.90	4.71	10.46	0	0.91	66.40
S10	6.08	40	1.71	3.40	4.78	6.63	0	0.72	63.32
S11	12.85	50	1.36	2.74	3.75	13.13	0	0.96	84.78
S12	15.15	60	1.18	2.76	3.68	6.67	0	0.59	90.02
S13	9.46	50	1.36	3.83	4.19	8.21	0	0.79	77.84
S14	14.46	70	1.36	3.52	4.19	11.50	0	0.67	105.70
S15	10.15	40	1.47	3.27	3.90	9.21	0	0.69	68.69
S16	16.62	40	1.27	2.60	2.35	10.96	0	1.06	74.86
S17	5.54	30	1.22	2.47	3.31	7.04	0	0.77	50.34
S18	18.38	50	1.36	4.49	4.41	8.54	0	0.82	88.00
S19	9.77	50	1.49	3.38	4.26	9.83	0	0.66	79.39
S20	12.85	60	1.47	4.39	4.12	11.08	0	0.80	94.70
S21	16.85	80	1.62	3.52	3.60	14.25	0	2.23	122.08
S22	19.00	40	1.49	2.73	3.53	9.21	0	0.71	76.67
S23	5.23	7.50	1.24	2.68	2.21	7.29	0	0.49	26.64



شکل ۶: بررسی خطر اکولوژیکی (ER) فلزات مورد مطالعه در خاک مناطق شهری اصفهان

ریسک سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی

ارزیابی ریسک سلامت مواجهه با فلزات سنگین خاک مناطق شهری اصفهان از سه مسیر اصلی بلع، تنفس و جذب پوستی برای کودکان و بزرگسالان در جدول ۱۰ ارائه شده است. مطابق نتایج HQ در گروه سنی کودکان و بزرگسالان تمامی فلزات مورد مطالعه به ترتیب مسیر بلع < جذب پوستی < تنفس بود. همچنین میزان HQ در مسیرهای جذب پوستی، تنفس و بلع برای کودکان بیشتر از بزرگسالان بوده است. برای هر دو گروه سنی بیشترین میزان HQ مربوط به فلز As و از طریق مسیر بلع بود. بررسی HQ فلزات سنگین در هر سه مسیر بلع، جذب پوستی و تنفس به جز برای فلزات As، Cr و Cd کمتر از ۱ تخمین زده شده است، لذا سلامت انسان را تهدید نخواهد کرد. بررسی خطر غیرسرطان‌زایی (HQ) فلزات سنگین در هر مسیر حاکی از آن است که فلزات As (کودکان و بزرگسالان) Pb (کودکان) در مسیر بلع، و فلز Cr کودکان در مسیر بلع و بزرگسالان در مسیر پوست خطر غیرسرطان‌زایی بیشتر از ۱ داشتند. بالاترین میزان HQ برای As در مسیر بلع و برای کودکان مشاهده شد. همچنین بیشترین میزان HQ برای هر دو گروه نیز به فلز As در مسیر بلع اختصاص پیدا کرد. خطر غیرسرطان‌زایی (HQ) هر یک از مسیرهای جذب فلزات در مسیر بلع برای کودکان بیش از بزرگسالان و در مسیر جذب تنفسی به جز برای فلز Ni برای کودکان بیش از بزرگسالان و در مسیر پوستی به جز برای فلز As (بزرگسالان) بیش از کودکان است. نتایج ارزیابی خطر غیرسرطان‌زایی کل مسیرهای سه‌گانه (HI) برای تک‌تک فلزات به تفکیک کودکان و بزرگسالان در شکل ۷ آورده شده است. طبق جدول ۱۱ مقادیر شاخص خطر غیرسرطان‌زایی (HI) کل مسیرهای جذب در گروه سنی کودکان بیشتر از بزرگسالان است که این امر نشان‌دهنده مواجهه بیشتر کودکان نسبت به بزرگسالان در برابر فلزات سنگین است. این شاخص به ترتیب برای $Pb < Cr < As$ در گروه کودکان بیشترین مقدار را نشان داد. HI کل مسیرهای جذب در گروه‌های سنی کودکان و بزرگسالان در جدول ۱۱ و شکل ۸ ارائه شده است.

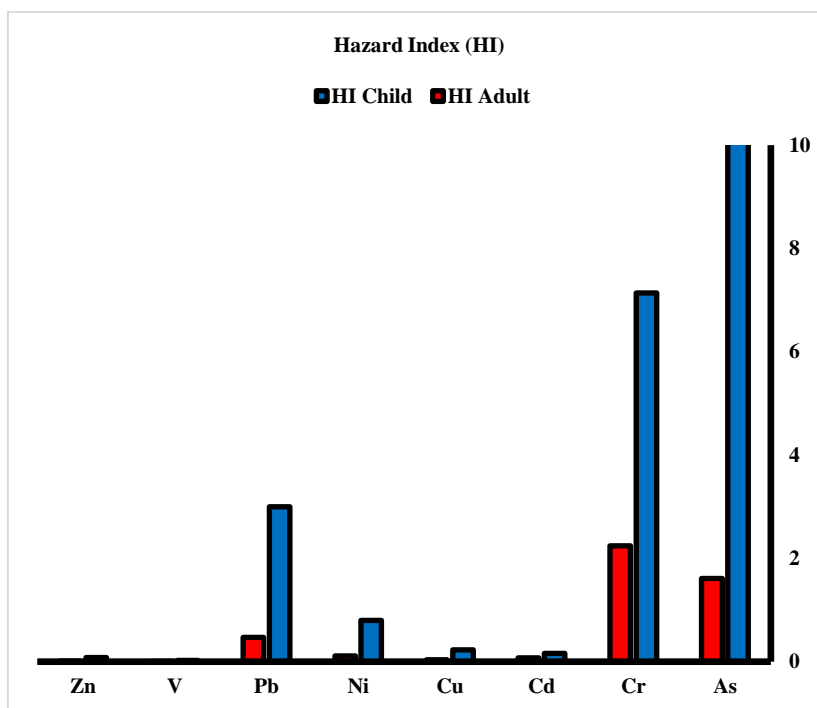
نتایج ارزیابی خطر سرطان‌زایی (RI) فلزات سنگین به تفکیک کودکان و بزرگسالان در جدول ۱۱ و شکل ۸ ارائه شده است. بررسی خطر سرطان‌زایی (RI) فلزات سنگین خاک مناطق شهری اصفهان حاکی از آن بود که به ترتیب فلزات $Cr < Ni < V$ در بین سایر فلزات و در گروه کودکان بیشترین خطر سرطان‌زایی را دارا هستند.

جدول ۱۰: ریسک غیرسرطان‌زایی (HQ) فلزات سنگین موجود در خاک مناطق شهری اصفهان (در سه مسیر ورود به بدن انسان شامل بلع، تنفس و پوست) به تفکیک بزرگسالان و کودکان.

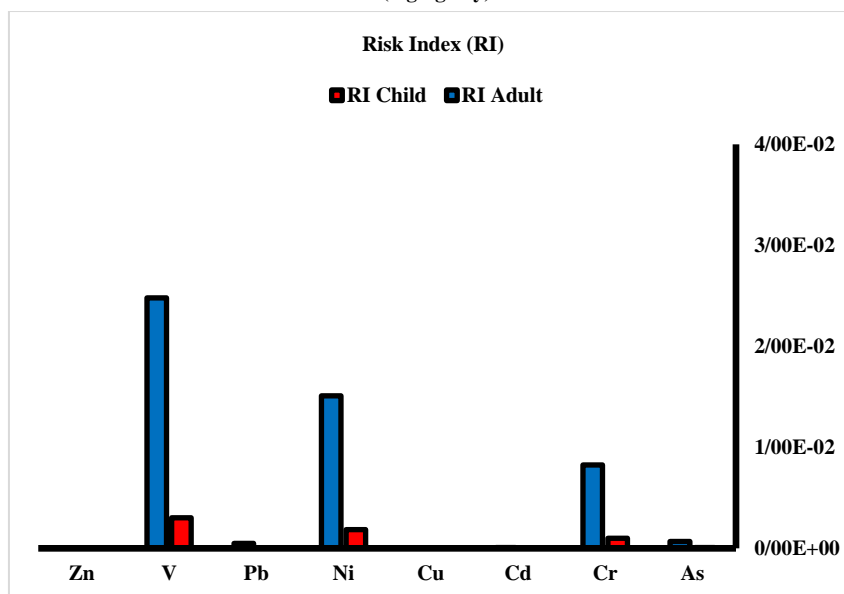
Metal	HQ _{Ingestion}		HQ _{Inhalation}		HQ _{Dermal}	
	Child	Adult	Child	Adult	Child	Adult
As	13.29	1.47	0.00036	0.00016	0.51	0.13
Cr	6.60	0.88	0.019	0.0087	0.52	1.57
Cd	0.16	0.02	4.71E-06	2.12E-06	0.026	0.06
Cu	0.23	0.031	6.51E-06	2.93E-06	0.0012	0.0031
Ni	0.79	0.10	2.16E-05	9.75E-06	0.0047	0.01
Pb	2.96	0.39	8.27E-05	3.72E-05	0.031	0.08
V	0.02	0.0033	1.69E-09	3.53E-11	3.49E-07	8.92E-07
Zn	0.08	0.01	2.37E-06	1.06E-06	0.00067	0.0017

جدول ۱۲: ریسک تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI) و ریسک سرطان‌زایی (RI) فلزات سنگین موجود در خاک مناطق شهری اصفهان به تفکیک بزرگسالان و کودکان.

Metal	Hazard Index (HI)		Risk Index (RI)	
	Child	Adult	Child	Adult
As	13.34	1.61	6.84E-04	8.32E-05
Cr	7.14	2.24	8.25E-03	1.004E-03
Cd	0.16	0.075	9.17E-05	1.26E-05
Cu	0.23	0.034	-	-
Ni	0.80	0.11	1.51E-02	1.84E-03
Pb	3	0.47	4.95E-04	6.03E-05
V	0.025	0.0033	2.48E-02	3.01E-03
Zn	0.08	0.01	-	-



شکل ۷: خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی کل مسیره‌های جذب فلزات سنگین خاک مناطق شهری اصفهان به تفکیک بزرگسالان و کودکان (mg/kg.day)



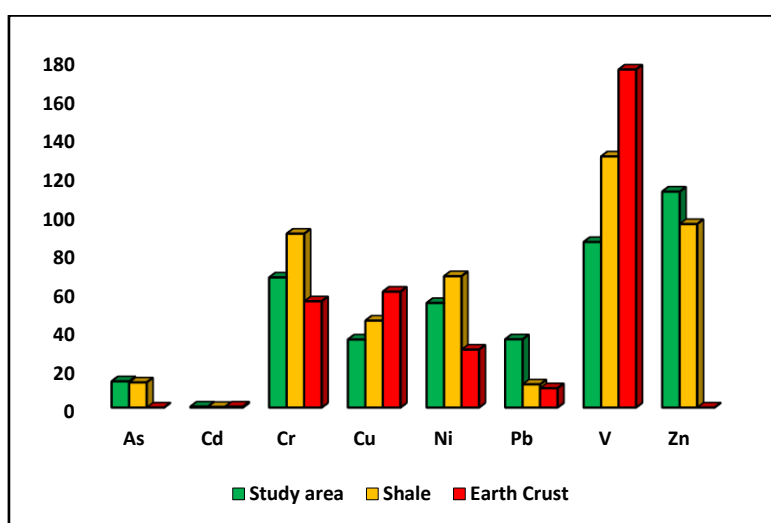
شکل ۸: خطر سرطان‌زایی فلزات سنگین خاک مناطق شهری اصفهان به تفکیک بزرگسالان و کودکان (mg/kg.day)

با توجه به اهمیت آثار تخریبی فلزات سنگین در تهدید حیات زیست‌شناختی موجودات ساکن بررسی و پایش وضعیت خاک‌های مناطق شهری از اهم ملاحظات زیست‌محیطی مرتبط محسوب می‌شود. آنالیز خاک نقش مهمی را در ارزیابی شرایط آلودگی در اکوسیستم‌های خاکی دارا می‌باشند از طرفی خاک‌ها توانایی بالقوه جذب و ته‌نشین کردن آلودگی‌های فلزی را دارا می‌باشند. از طرف دیگر با توجه به وجود منابع طبیعی و مصنوعی برای آلودگی فلزات سنگین Zn و V، Pb، Ni، Cu، Cd، Cr، As در خاک مناطق شهری اصفهان، که متأثر از انواع پساب‌های کشاورزی و صنعتی در کنار تأثیرپذیری از انواع کارخانه‌ها، دود حاصل از وسایل نقلیه و شرایط زمین‌شناسی (وجود معادن سرب و روی) در منطقه می‌باشد لذا آلودگی این فلزات در خاک منطقه امری اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود به همین جهت استانداردهایی برای خاک‌ها تدوین گردیده که می‌توان از آنها جهت شناسایی خاک‌های آلوده استفاده نمود.

به همین جهت به منظور تعیین میزان آلودگی خاک‌های منطقه مورد مطالعه به فلزات سنگین، مقدار میانگین غلظت آنها با استانداردهای میانگین شیل جهانی (Shale) و پوسته زمین (Earth Crust) مقایسه شد (شکل ۹). بر مبنای استاندارد میانگین شیل جهانی، فلزات As، Cd، Pb و Zn بیش از استاندارد میانگین شیل جهانی می‌باشد. بر مبنای استاندارد مربوط به میانگین پوسته زمین، فلزات Ni، Cr و Pb بیش از استاندارد میانگین پوسته زمین بودند (جدول ۱۲).

جدول ۱۲: مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک مناطق شهری اصفهان در مقایسه با استانداردهای شیل جهانی و پوسته زمین (27).

Metal (metal)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
Study area	13.57	0.49	67.35	35.23	54.13	35.33	85.70	111.80
Shale	13	0.30	90	45	68	12	130	95
Earth Crust	-	0.5	55	60	30	10	175	-



شکل ۹: مقایسه میانگین فلزات سنگین در نمونه‌های برداشت‌شده با میانگین شیل جهانی و پوسته زمین در خاک مناطق شهری اصفهان.

بحث

بر اساس شاخص انباشت ژئوشیمیایی مولر (Igeo) کیفیت خاک برای اکثر فلزات مورد مطالعه غیرآلوده تا کمی آلوده را نشان می‌دهد. با توجه به میانگین شاخص زمین‌انباشتگی و نیز درصد طبقات این شاخص، می‌توان بیان داشت که بیشترین ضریب انباشت به ترتیب برای فلزات $As < Cd < Pb$ در نمونه‌های خاک منطقه اتفاق افتاده است. نتایج حاصل از فاکتور غنی‌شدگی (EF) تمام فلزات حاکی از زمین‌زاد بودن منشأ تمامی فلزات به جز As، Cd، Pb و As مورد مطالعه در خاک مناطق شهری و زمین‌زاد بودن تجمع آنها بود. با توجه به میانگین شاخص زمین‌انباشتگی و نیز درصد طبقات این شاخص، می‌توان بیان داشت که بیشترین ضریب غنی‌شدگی برای فلز Pb در نمونه‌های خاک منطقه اتفاق افتاده است.

نتایج فاکتور آلودگی (CF) نشان داد تمام نمونه‌ها به جز As، Cd، Pb و Zn در طبقه آلودگی پایین تا آلودگی متوسط قرار دارند. به طوری که برای فلزات Pb و Cr بیشترین ضریب آلودگی را در بین فلزات از خود نشان دادند. میانگین حاصل از فاکتور آلودگی (CF) فلزات سنگین در خاک مناطق شهری اصفهان به ترتیب $Pb(2.94) < Cd(1.64) < Zn(1.17) < As(1.04) < Ni(0.79) < Cu(0.78)$ $V(0.65) < Cr(0.74)$ بدست آمد. همچنین بررسی درجه آلودگی (Cd) فلزات مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که غالب نمونه‌ها دارای درجه آلودگی متوسط می‌باشند. شاخص بار آلودگی (PLI) به عنوان یک سیستم استاندارد برای تشخیص آلودگی است که

مقایسه میزان آلودگی میان سایت‌های مختلف و در زمان‌های مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. این شاخص امکان ارزیابی کلی از وضعیت سمیت ناشی از سهم چند فلز را در یک نمونه خاک به محققین می‌دهد.

نتایج حاصل از شاخص بار آلودگی (PLI) نشان داد که ۸ نمونه دارای آلودگی و ۱۵ نمونه فاقد آلودگی در خاک مناطق شهری اصفهان می‌باشند. که این موضوع نشان‌دهنده آلودگی کم منطقه به فلزات سنگین است.

نتایج بررسی خطر اکولوژیکی (ER) و خطر محیط‌زیستی (RI) فلزات سنگین نشان داد، تمام نمونه‌های مورد بررسی به جز ۹ نمونه برای فلز Cd و ۱ نمونه برای فلز Pb، دارای خطر اکولوژیک طبقه پایین هستند. همچنین یافته‌های بررسی شاخص خطر محیط‌زیستی (RI) با توجه به مقادیر به‌دست آمده (کمتر از ۱۵۰) برای خاک مناطق شهری اصفهان نشان داد که خطر محیط‌زیستی فلزات سنگین پایین می‌باشد.

طبق استاندارد حفاظت محیط زیست آمریکا، اگر خطر غیرسرطان‌زایی (HQ) فلزات سنگین در هر مسیر بیش‌تر از یک باشد، سمیت آن عنصر ممکن است اثرات سوء بر سلامتی انسان بگذارد (Li et al., 2014). در این مطالعه As (کودکان و بزرگسالان)، Cr (کودکان) و Pb (کودکان) در مسیر بلع و Cr (بزرگسالان) در مسیر تنفس دارای چنین وضعیتی هستند. با توجه به این که میزان HQ در مسیر بلع از HQ در مسیرهای تنفس و جذب پوستی برای تمام فلزات بالاتر بوده است لذا مهم‌ترین مسیر قرارگیری در معرض فلزات سنگین برای کودکان و بزرگسالان مسیر بلع است که این موضوع توسط Qing et al (2015) تأیید شده است. نتایج مطالعه Yin et al (2021) نشان داد که آلودگی Cd در رسوبات رودخانه در درجه اول از تصفیه فاضلاب و خروجی بر اساس جهت جریان رودخانه و رفتارهای ژئوشیمیایی ایزوتوپ Cd در شرایط طبیعت مشتق شده است. این مطالعه بیشتر تأیید کرد که تجزیه و تحلیل ایزوتوپ‌های Cd می‌تواند یک ابزار قدرتمند برای ردیابی منشأ و مقصد Cd محیطی برای منابع متعدد با غلظت Cd مشابه باشد. در مطالعه Emenike et al (2020) مشخص شد که با توجه به ضریب خطر فلزات خاص از طریق راه بلع، خطرات به ترتیب $Co \gg As \gg Pb > Cr > Cd > Al$ و $Ni > Cu > Zn > Fe$ برای هر دو فصل است و خطر سرطان‌زایی برای کودکان از طریق راه بلع بیش از محدوده ایمن Cr, Cd, As و Ni در هر دو فصل بود. این نتیجه نیاز به اقدام فوری در جهت بازسازی کیفیت محیط زیست برای جوامع اطراف رودخانه آتوارا را نشان می‌دهد. در این مطالعه مشخص شد که بیشترین خطر غیرسرطان‌زایی کل مسیره‌ها (HI) در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان مربوط به Cr و کم‌ترین آن مربوط به V است. در این پژوهش نتایج خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی (HI) فلزات As (بزرگسالان و کودکان)، Cr (بزرگسالان و کودکان) و Pb (کودکان) بیش‌تر از یک بود. این مقادیر، عددهای خیلی بزرگ و خطرناکی هستند که عواقب مضرری به ویژه برای کودکان به همراه دارند. در مطالعه حاضر مشخص شد که مقدار خطر سرطان‌زایی (RI) در کودکان بیش از بزرگسالان است که با نتایج Qing et al (2015) تطابق دارد. بطور کلی، مطابق با استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا اگر خطر سرطان‌زایی (RI) کمتر از 1×10^{-6} (احتمال سرطان یک نفر از هر یک میلیون نفر) باشد، این خطر قابل اغماض است؛ در حالی که خطر سرطان‌زایی (RI) بیش‌تر از 1×10^{-4} غیرمجاز و برای سلامت انسان مخاطره‌آمیز است. خطر سرطان‌زایی بین محدوده 1×10^{-6} و 1×10^{-4} نشان‌دهنده خطرپذیری مجاز تحت شرایط کنترل و نظارت است (Qing et al., 2015; Yin et al., 2021). در این پژوهش، خطر سرطان‌زایی (RI) فلزات V، Ni و Cr در بزرگسالان و کودکان در حد بحرانی بدست آمد.

نتیجه‌گیری

با توجه به این که در حال حاضر اکثر افراد در محیط شهری زندگی می‌کنند کیفیت زیست‌محیطی خاک‌های شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. از آن جایی که فلزات سنگین شاخص‌های مفید از آلودگی محیط‌زیستی هستند، تعیین سطح فلزات سنگین و پراکنش مکانی آن‌ها برای درک بهتر منابع آلودگی و خطرات احتمالی برای محیط‌زیست و سلامت انسان ضروری به نظر می‌رسد. یافته‌های پژوهش در واقع نشان‌دهنده تاثیر فعالیت‌های شهرنشینی و صنعتی در سطح شهر اصفهان می‌باشد که منجر به افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی شهر نسبت به دیگر شهرهای دنیا با وجود جمعیت بیشتر شده است. نتایج توزیع فضایی فلزات نشان داد که بیشترین غلظت فلزات در مکان‌های با قدمت شهرنشینی بالا که فاصله کمتری با صنایع دارند و همچنین مناطقی با حجم ترافیک بالاتر می‌باشد. از مقایسه غلظت فلزات سنگین در خاک منطقه مورد مطالعه و میانگین شیل جهانی و پوسته زمین می‌توان چنین نتیجه گرفت

که فلزات سنگین Pb-Zn در منطقه مورد مطالعه از سایر استانداردها بیشتر بوده و همین امر نشان‌دهنده غلظت غیر استاندارد این فلزات در خاک‌های شهر اصفهان می‌شود. با بررسی شاخص‌های زیست‌محیطی مشخص شد به ترتیب فلزات Cd، Pb، As و Zn بیشترین خطر آلودگی زیست‌محیطی را نسبت به سایر فلزات سنگین در خاک مناطق شهری اصفهان دارا می‌باشند.

منشأ عناصر Cd، Pb و Zn به علت گردوغبار حاصل از فعالیت‌های معدن‌کاری سرب و روی در اطراف شهر اصفهان است که توسط باد و وسایل نقلیه به سطح شهر اصفهان وارد شده‌اند و منشأ فلز As در محدوده مورد مطالعه می‌تواند به علت ورود فاضلاب‌های خانگی و ورود کودهای شیمیایی کشاورزی به درون آن‌ها باشد.

نتایج ارزیابی خطرات بهداشتی فلزات سنگین در خاک مناطق شهری اصفهان بازتاب این واقعیت است که ریسک غیرسرطان‌زایی کل مسیره‌ها (HI) و خطر سرطان‌زایی این فلزات زمینه تهدید جدی سلامت کودکان و بزرگسالان را فراهم می‌سازد. طبق نتایج مشخص شد که پتانسیل خطرپذیری به بیماری‌های سرطانی و غیرسرطانی در کودکان بیش‌تر از بزرگسالان است و با تخمین ریسک غیرسرطان‌زایی کل مسیره‌ها (HI) به ترتیب فلزات $Pb > Cr > As$ و ریسک سرطان‌زایی (RI) به ترتیب فلزات $V > Ni > Cr$ در ناحیه مورد مطالعه غیرمجاز بوده و برای سلامت ساکنین مخاطره‌آمیز است.

تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر قسمتی از رساله دکتری با عنوان "تحلیل ژئوشیمیایی و زیست‌محیطی فلزات سنگین در رسوبات بخش شرقی رودخانه زاینده‌رود و خاک‌های منطقه شهری-مسکونی اصفهان" می‌باشد که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان صورت پذیرفته است. بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان قدردانی می‌گردد.

References

- Bineshpour, M., Payandeh, K., Nazarpour, A., & Sabzalipour, S. 2021. Status, source, human health risk assessment of potential toxic elements (PTEs), and Pb isotope characteristics in urban surface soil, case study: Arak city, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 4939-4958. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00778-x>
- Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. 2022. *Environmental soil chemistry*. Elsevier.
- Huang, Y., Zhang, S., Chen, Y., Wang, L., Long, Z., Hughes, S. S., ... & Liu, C. 2020. Tracing Pb and possible correlated Cd contamination in soils by using lead isotopic compositions. *Journal of Hazardous materials*, 385, 121528. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121528>
- Nazarpour, A., Watts, M. J., Madhani, A., & Elahi, S. 2019. Source, spatial distribution and pollution assessment of Pb, Zn, Cu, and Pb, isotopes in urban soils of Ahvaz City, a semi-arid metropolis in southwest Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41787-w>
- Emenike, P. C., Tenebe, I. T., Neris, J. B., Omole, D. O., Afolayan, O., Okeke, C. U., & Emenike, I. K. 2020. An integrated assessment of land-use change impact, seasonal variation of pollution indices and human health risk of selected toxic elements in sediments of River Atuwara, Nigeria. *Environmental Pollution*, 265, 114795. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114795>
- Thakare, M., Sarma, H., Datar, S., Roy, A., Pawar, P., Gupta, K., ... & Prasad, R. 2021. Understanding the holistic approach to plant-microbe remediation technologies for removing heavy metals and radionuclides from soil. *Current Research in Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.02.004>
- Hussein, M., Yoneda, K., Mohd-Zaki, Z., Amir, A., & Othman, N. 2021. Heavy metals in leachate, impacted soils and natural soils of different landfills in Malaysia: An alarming threat. *Chemosphere*, 267, 128874. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128874>
- Wu, Q., Hu, W., Wang, H., Liu, P., Wang, X., & Huang, B. 2021. Spatial distribution, ecological risk and sources of heavy metals in soils from a typical economic development area, Southeastern China. *Science of The Total Environment*, 780, 146557. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146557>
- Gebeyehu, H. R., & Bayissa, L. D. 2020. Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. *PloS one*, 15(1), e0227883. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227883>
- Zhang, J., Yang, R., Li, Y. C., Peng, Y., Wen, X., & Ni, X. 2020. Distribution, accumulation, and potential risks of heavy metals in soil and tea leaves from geologically different plantations. *Ecotoxicology and environmental safety*, 195, 110475. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110475>
- Wen, J., Xing, L., Wang, Y., & Zeng, G. 2019. Chemical and microbiological responses of heavy metal contaminated sediment subject to washing using humic substances. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(26), 26696-26705. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05900-w>
- Ku, M. S., Liu, C. Y., Hsu, C. Y., Chiu, H. M., Chen, H. H., & Chan, C. C. 2021. Association of ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) with elevated fecal hemoglobin concentration and colorectal carcinogenesis: a population-based retrospective cohort study. *Cancer Control*, 28, 10732748211041232. <https://doi.org/10.1177/10732748211041232>
- Xiao, L., Liu, J., & Ge, J. 2021. Dynamic game in agriculture and industry cross-sectoral water pollution governance in developing countries. *Agricultural Water Management*, 243, 106417. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106417>
- Ke, X., Gui, S., Huang, H., Zhang, H., Wang, C., & Guo, W. 2017. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China. *Chemosphere*, 175, pp 473-481. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.029>
- Gandomkar, A., Rahmani, H., & ZAMANI KEBRABADI, B. A. H. M. A. N. 2020. Evaluation the Cd, Pb and As content in soil, water, leaves and fruit of olive trees at some of Esfahan industrial zones and highways. *Journal of Environmental Science Studies*, 5(4), 2990-3001.
- Muller, G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- Li, Y., Zhou, H., Gao, B., & Xu, D. 2021. Improved enrichment factor model for correcting and predicting the evaluation of heavy metals in sediments. *Science of The Total Environment*, 755, 142437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142437>

- Magni, L. F., Castro, L. N., & Rendina, A. E. 2021. Evaluation of heavy metal contamination levels in river sediments and their risk to human health in urban areas: A case study in the Matanza-Riachuelo Basin, Argentina. *Environmental Research*, 197, 110979. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110979>
- Zhang, J., Shi, Q., Fan, S., Zhang, Y., Zhang, M., & Zhang, J. 2021. Distinction between Cr and other heavy-metal-resistant bacteria involved in C/N cycling in contaminated soils of copper producing sites. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123454. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123454>
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8), 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Wang J, Liu W, Yang R, et al. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in reclaimed soils at an opencast coal mine. *Disaster Adv* 2013; 6(S3): 366-77.
- Yi, Y., Yang, Z., & Zhang, S. 2011. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environmental pollution*, 159(10), 2575-2585. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.011>
- USEPA. Exposure Factors Handbook: National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Assessment. EPA/600/C-99/001. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1997.
- Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Krishnan, S., Kumar, S., Nejad, Z. D., ... & Alam, J. 2021. Evaluating heavy metals contamination in soil and vegetables in the region of North India: Levels, transfer and potential human health risk analysis. *Environmental toxicology and pharmacology*, 82, 103563. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103563>
- Thongyuan, S., Khantamoon, T., Aendo, P., Binot, A., & Tulayakul, P. 2021. Ecological and health risk assessment, carcinogenic and non-carcinogenic effects of heavy metals contamination in the soil from municipal solid waste landfill in Central, Thailand. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 27(4), 876-897. <https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1786666>
- Wu, H., Xu, C., Wang, J., Xiang, Y., Ren, M., Qie, H., ... & Lin, A. 2021. Health risk assessment based on source identification of heavy metals: A case study of Beiyun River, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213, 112046. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112046>
- Sungur, A., Soylak, M., & Ozcan, H. 2019. Fractionation, source identification and risk assessments for heavy metals in soils near a small-scale industrial area (Çanakkale-Turkey). *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 28(2), 213-227. <https://doi.org/10.1080/15320383.2018.1564735>
- Keshavarzi, A., & Kumar, V. 2019. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran. *International journal of environmental health research*, 29(5), 544-560. <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1555638>
- Meybeck, M. I. C. H. E. L. 2013. Heavy metal contamination in rivers across the globe: an indicator of complex interactions between societies and catchments. *Proceedings of H04 Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World*, 361, 3-16.
- Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T. J., Yuan, Z., & Huang, L. 2014. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Science of the total environment*, 468, 843-853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>
- Qing, X., Yutong, Z., & Shenggao, L. 2015. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 120, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.06.019>
- Yin, X., Wei, R., Chen, H., Zhu, C., Liu, Y., Wen, H., ... & Ma, J. 2021. Cadmium isotope constraints on heavy metal sources in a riverine system impacted by multiple anthropogenic activities. *Science of The Total Environment*, 750, 141233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141233>