



منشاء یابی و ارزیابی خطر بالقوه بوم‌شناختی برخی فلزهای سنگین در خاک سطحی اطراف مجتمع دفع و پردازش پسماند جامد شهری آرادکوه تهران

سیده مریم محمدی^۱، بهاره لرستانی^{۱*}، سهیل سبحان اردکانی^۱، مهرداد چراغی^۱ و لیما طیبی^۲

^۱ گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

^۲ گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۲

محمدی، س.م.، ب. لرستانی، س. سبحان اردکانی، م. چراغی و ل. طیبی. ۱۴۰۰. منشاء‌یابی و ارزیابی خطر بالقوه بوم‌شناختی برخی فلزهای سنگین در خاک سطحی اطراف مجتمع دفع و پردازش پسماند جامد شهری آرادکوه تهران. فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۳): ۱-۲۲.

سابقه و هدف: فلزهای سنگین از شایع‌ترین آلاینده‌های خاک هستند که از قابلیت ایجاد خطر برای سلامت انسان و بویژه کودکان برخوردارند. از این‌رو، این پژوهش با هدف منشاء‌یابی و ارزیابی خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر آهن، روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی اطراف مجتمع دفع و پردازش پسماند جامد شهری آرادکوه تهران در سال ۱۳۹۹ انجام یافت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه توصیفی، پس از جمع‌آوری ۳۰ نمونه خاک سطحی از ۱۰ ایستگاه منتخب واقع در مجاور مجتمع آرادکوه و سپس آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوی عناصر به‌روش طیف‌سنجی نوری پلاسمای جفت‌شده القایی^۱ خوانده شد. همچنین، نسبت به محاسبه سنجه‌های ارزیابی درجه آلودگی خاک، خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی^۲ و خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی^۳ اقدام شد. برای شناسایی منابع بالقوه عناصر در نمونه‌های خاک از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۴ و برای تشخیص گروه‌بندی عناصر از خوشه‌بندی سلسله مراتبی^۵ استفاده شد. پردازش آماری نتایج نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام یافت.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که میانگین غلظت عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) در نمونه‌های خاک برابر با ۲۶۶۵۱/۶ برای آهن، ۷۱/۷ برای روی، ۲۷/۷ برای سرب، ۱/۲۲ برای کادمیم، ۲۲/۳ برای کروم و ۳۲/۸ برای نیکل بوده است. از طرفی، کیفیت خاک سطحی منطقه مورد مطالعه بنابر مقادیر فاکتور غنی‌شدگی از "غنی‌شدگی جزئی" تا "غنی‌شدگی متوسط به بالا"، بنابر مقادیر سنجه آلودگی از "آلودگی ناچیز" تا "آلودگی زیاد"، برطبق مقادیر سنجه درجه آلودگی در "درجه متوسط آلودگی"، برطبق مقادیر سنجه ژئوشیمیایی مولر از "غیرآلوده" تا "آلودگی متوسط" متغیر بوده است. نتایج محاسبه سنجه Er نشان داد که خطر بالقوه بوم‌شناختی برای عناصر روی، سرب، کروم و نیکل "کم" و برای عنصر کادمیم "متوسط" بوده است. از طرفی، با توجه به این‌که میانگین مقدار سنجه RI برابر با ۱۷۰/۹ بود، بنابراین، سنجه خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی عناصر در نمونه‌های خاک مورد مطالعه در دسته "مخاطره بوم‌شناختی متوسط" قرار داشت. نتایج آزمون همبستگی پیرسون و سنجه‌های

* Corresponding Author: Email Address: lorestanib@iauh.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.1005>

ژئوشیمیایی مولر، PI و IPI در تطابق با نتایج PCA و HCA، بیان‌گر آن بود که عناصر روی، کادمیم، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک احتمالاً از منابع انسان‌ساخت و سرب نیز از منبع طبیعی نشأت گرفته است.

نتیجه‌گیری: هر چند میانگین مقادیر سنجه RI عناصر در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه در محدوده خطر بوم‌شناختی متوسط قرار داشت، ولی از آن‌جا که عنصر کادمیم با ۹۳/۳٪ بیش‌ترین سهم را در ایجاد مخاطره بوم‌شناختی داشته است، از این‌رو، توجه به شناسایی و کنترل منابع انتشار این عنصر در محیط خاک با قابلیت انتقال آلاینده‌ها به زنجیر غذایی و یا ایجاد خطر برای سلامت شهروندان از طریق تماس پوستی و یا تنفس ذرات آلوده برای حفظ سلامت شهروندان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک سطحی، خطر بالقوه بوم‌شناختی، درجه آلودگی، فلزهای سنگین، مجتمع پردازش و دفع پسماند آرادکوه

مقدمه

اندک نیز سمی و مخاطره‌آمیز هستند (El-Gammal *et al.*, 2011; Sobhanardakani, 2018a). به‌عنوان نمونه، از مهم‌ترین آثار مسمومیت سرب در بدن می‌توان به بروز اختلال در عملکرد دستگاه گوارش، دستگاه عصبی مرکزی، اعصاب محیطی و سیستم خونساز، اثر بر مغز، اختلالات کلیوی، ناتوانی در یادگیری و تأخیر در رشد شناختی کودکان، اغماء و حتی مرگ اشاره کرد (Muhammad *et al.*, 2011; Hosseini *et al.*, 2015). همچنین، تجمع کادمیم در بدن می‌تواند به کم‌خونی و فشار خون بالا، پوکی استخوان، صدمه‌های کلیوی و کبدی، آسیب به ریه‌ها، بیماری‌های قلبی - عروقی، دیابت و سرطان منجر شود (Ju *et al.*, 2012; Aghelan *et al.*, 2020). این در حالی است که، کروم ۶ ظرفیتی، عنصری سمی است که خونریزی داخلی، سوزش و خارش در مخاط گوارشی، نکروز کبدی، التهاب کلیه‌ها، مشکلات تنفسی، سرطان دستگاه گوارش و در نهایت مرگ از عوارض جذب و قرار گرفتن در معرض مقادیر بیشتر از حد مجاز این عنصر است (Sobhanardakani *et al.*, 2014; Mohammadi *et al.*, 2018).

عناصر کمیاب سنجه‌های مفیدی برای ارزیابی آلودگی در محیط‌های سطح خاک هستند و تمایل دارند که در اثر رسوب‌گذاری، فشردگی و فرورنشست جوی در خاک سطحی جمع شوند و اگر مقادیر آن‌ها در حد قابل توجهی باشد، به‌طوریکه آلاینده‌های سمی را تشکیل دهند، ممکن است بر سلامت افراد تأثیر سوء بگذارند (Tokalhog and Kartal, 2006; El-Gammal *et al.*, 2011).

فلز سنگین به عنصر شیمیایی فلزی اطلاق می‌شود که از چگالی به‌نسبت زیاد برخوردار بوده و به‌دلیل برخورداری از نیم‌عمر طولانی، توانایی تجمع زیستی، غیر قابل تجزیه بودن و پایداری زیاد در محیط و باقی گذاشتن اثرهای فیزیولوژیکی برای زندگی موجودات زنده حتی در مقادیر اندک نیز سمی است. عوامل طبیعی و انسانی، مانند رواناب‌ها، فرسایش خاک، فعالیت‌های صنعتی و معدنی، آبکاری فلزها، کشاورزی و احتراق سوخت فسیلی می‌تواند به تخلیه فلزهای سنگین به منابع آب سطحی و زیرزمینی، خاک، هوا و در نهایت زیست‌کره منجر شود (Sobhanardakani *et al.*, 2015; Sobhanardakani, 2018a).

هرچند عناصر ضروری از جمله آهن، روی و نیکل نقش ساختاری و کارکردی در سیستم‌های زیستی دارند، ولی قرار گرفتن در معرض مقادیر بیش‌تر از حد مجاز این عناصر می‌تواند پیامدهای سوء بهداشتی برای افراد به‌دنبال داشته باشد. به‌عنوان نمونه، مواجهه با مقادیر بیش‌تر از حد مجاز آهن می‌تواند به بروز مسمومیت و یا کاهش تکثیر لنفوسیت‌های B و همچنین کاهش پاسخ آنتی‌بادی‌های سلول‌های T منجر شود (Sobhanardakani and Jafari, 2014). از طرفی، مواجهه با مقادیر بیش‌تر از حد مجاز نیکل می‌تواند به آسیب به سیستم عصبی، احساس خستگی و کاهش تحرک، التهاب، جهش‌زایی، ناهنجاری‌زایی، اختلالات قلبی و سرطان ریه منجر شود (Qu *et al.*, 2013; Sobhanardakani, 2019). افزون بر این، سرب، کادمیم و کروم از عناصر غیرضروری و سمی بوده که حتی در مقادیر

به‌روش ذخیره روباز دیو می‌شوند و هیچ سیستم زهکشی زیرسطحی برای جمع‌آوری شیرابه در این مرکز وجود ندارد. در نتیجه، شیرابه‌ها با حرکت به سمت شمال محل دفن زباله، یک حوضچه بزرگ شیرابه را ایجاد کرده‌اند (Gholamalifard *et al.*, 2017; Majlessi *et al.*, 2019).

نمونه‌برداری از خاک

در این پژوهش توصیفی - مقطعی، به‌منظور بررسی محتوی فلزهای سنگین در نمونه‌های خاک، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مالی و زمانی، نسبت به انتخاب ۱۰ ایستگاه نمونه‌برداری شامل ۱ نقطه در خلاف جهت وزش باد غالب (غرب به شرق)، ۶ نقطه در مجاورت لندفیل و ۳ نقطه در جهت وزش باد غالب و با فاصله‌های مشخص از مرکز مجتمع آرادکوه و برداشت ۳۰ نمونه خاک سطحی از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری هر کدام به‌وزن یک کیلوگرم با استفاده از بیلچه چوبی اقدام شد. همچنین موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها توسط دستگاه GPS مدل ETREX 32X ساخت شرکت گارمین ثبت شد. نمونه‌ها پس از انتقال به کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار برچسب‌گذاری و به آزمایشگاه منتقل شدند (Sobhanardakani, 2018b). نقشه موقعیت استقرار ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ آورده شده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین برخی ویژگی‌های

فیزیکوشیمیایی و محتوی عناصر در آن‌ها

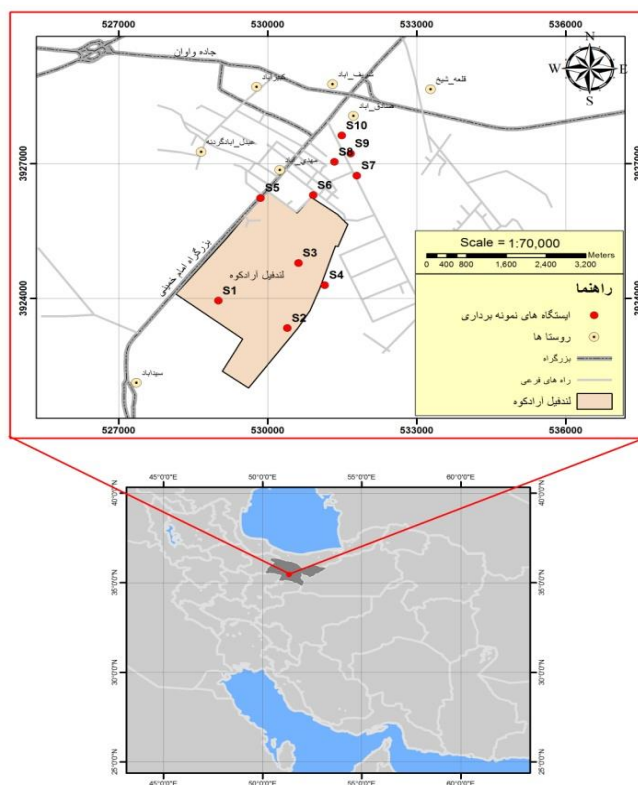
در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌های خاک به‌مدت سه روز در هوای آزاد خشک شده و سپس پسماند نمونه‌ها شامل شاخ و برگ و سنگ و سنگریزه با استفاده از الک ۰/۹ میلی‌متری جدا شدند (Hazratzadeh and Sobhanardakani, 2018). پس از آن، نمونه‌ها توسط هاون چینی همگن شدند. در این مطالعه، بافت خاک به‌روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986) و همچنین مقادیر pH در گل اشباع با استفاده از pH متر مدل ۳۵۲۰ Jenway (Kelepertsis *et al.*, 2001)، EC در عصاره ۱ به ۵ توسط دستگاه هدایت‌سنج مدل ۴۵۲۰ Jenway (Davodpour *et al.*, 2019) و کربن آلی کل به‌روش تیتراسیون اکسایش - کاهش (Gerritse and Driel, 1984) تعیین شدند.

مطالعات زیادی در مورد تعیین محتوی فلزهای سنگین در نمونه‌های خاک (Cai *et al.*, 2015; Mohammadi, 2015; Roozbahani *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2016; Ersoy and Yünsel, 2018; Sobhanardakani, 2018b; Zantor *et al.*, 2019; Sabet Aghlidi *et al.*, 2020; Sobhanardakani and Jamshidi, 2015; Soliman *et al.*, 2015; Sobhanardakani and Ghoochian, 2016; Ebo Duncan *et al.*, 2018; Algül and Beyhan, 2020) گردوغبار (Saeedi *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014; Iwegbue *et al.*, 2017; Mazloomi *et al.*, 2017; Sabzevari and Sobhanardakani, 2018; Sadeghdoust *et al.*, 2020) فرونشست‌های خشک اتمسفری (Moaref *et al.*, 2014; Naderizadeh *et al.*, 2016; Shokri Ragheb and Sobhanardakani, 2016; Sobhanardakani, 2018a, ; Sobhanardakani, 2019) در ایران و سایر کشورها انجام یافته است. ولی، از آن‌جا که تاکنون در مورد تعیین محتوی، منشاء‌یابی، ارزیابی خطر بالقوه بوم‌شناختی و خطر سلامت فلزهای سنگین در خاک سطحی اطراف مراکز دفن پسماند مطالعات اندکی انجام شده است (Kanmani and Gandhimathi, 2013; Makuleke and Ngole-Jeme, 2020). این پژوهش برای اولین بار با هدف منشاء‌یابی و ارزیابی خطر بالقوه بوم‌شناختی فلزهای سنگین آهن، روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی اطراف مجتمع دفع و پردازش پسماند جامد شهری آرادکوه تهران در سال ۱۳۹۹ انجام یافت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

مجتمع پردازش و بازیافت زباله آرادکوه در سال ۱۳۵۳ در زمینی به مساحت ۱۴۰۰ هکتار با هدف مدیریت و دفن پسماند جامد شهری تهران در ۳۰ کیلومتری جنوب این شهر تأسیس شد. در حال حاضر، روزانه بیش‌تر از ۸۰۰۰ تن انواع پسماند برای امحاء و دفع به این مرکز ارسال می‌شود. گفتنی است که در این مرکز زباله‌ها



شکل ۱- نقشه موقعیت استقرار ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Fig. 1- Map of sampling sites

استفاده از مرجع استاندارد SQC-001 (SRM) ساخت شرکت سیگما - آلد ریچ اسپانیا تعیین شدند (Lu *et al.*, 2010). نتایج نشان داد که دقت خوب با نرخ بازیابی^۸ ۹۵/۹-۱۰۱/۲٪ برای آهن، ۹۵/۷-۱۰۱/۵٪ برای روی، ۹۶/۶-۱۰۰/۴٪ برای سرب، ۹۵/۱۰۲-۸۱/۵٪ برای کادمیم، ۹۷/۳-۱۰۱/۲٪ برای کروم و ۹۵/۱۰۰-۴/۷٪ برای نیکل حاصل شده است.

ارزیابی درجه آلودگی خاک

فاکتور غنی‌شدگی^۹

در این پژوهش، از فاکتور غنی‌شدگی (*EF*) برای تشخیص منشاء عناصر موجود در خاک از جمله تأثیرات انسانی و غلظت زمینه طبیعی استفاده (Han *et al.*, 2006) و مقادیر آن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$EF = \left(\frac{C_n}{C_{ref}} \right)_{soil} / \left(\frac{B_n}{B_{ref}} \right)_{background}, \quad (1)$$

برای هضم نمونه‌ها، به یک گرم از هر نمونه خاک، مخلوطی شامل هیدروفلوریک اسید، پرکلریک اسید و نیتریک اسید اضافه شد و پس از آن نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ماکروویو آون در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، حرارت داده شدند. سپس محلول حاصل توسط کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف و با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر به حجم رسانده شد (Muhammad *et al.*, 2012; Davodpour *et al.*, 2019). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر و استاندارد نمک فلزها و کالیبره کردن دستگاه طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) مدل Varian 710-ES، غلظت عناصر آهن، روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل در عصاره خاک به ترتیب در طول موج‌های ۲۵۸/۵۸۸، ۲۰۶/۲۰۰، ۲۲۰/۳۵۳، ۲۲۶/۵۰۲ و ۲۶۷/۷۱۶ نانومتر در ۳ تکرار خوانده شد. همچنین، کنترل کیفیت^۹ و تضمین کیفیت^۷ هر دو با

در رابطه ۱: بین ۰/۰۵ تا ۱/۵ فاکتور غنی‌شدگی بیان‌گر آن است که عناصر از منابع طبیعی یا مواد پوسته‌ای نشأت گرفته‌اند، در حالی که مقادیر بزرگتر از ۱/۵ فاکتور غنی‌شدگی نشان دهنده منشأ انسان ساخت عناصر خواهد بود (Zhang and Liu, 2000; Li *et al.*, 2013).
دسته‌بندی مقادیر فاکتور غنی‌شدگی در جدول ۱ آورده شده است (Tytła and Kostecki, 2019):

soil (Cn/Cref) بیان‌گر نسبت محتوی عنصر مورد مطالعه به محتوی عنصر مرجع (آهن) در نمونه خاک بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم و (Bn/Bref) background نیز نشان‌دهنده نسبت غلظت زمینه عنصر مدنظر به غلظت زمینه عنصر مرجع در شیل بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم است (Sutherland, 2000). همچنین مقادیر

جدول ۱- دسته‌بندی مقادیر فاکتور غنی‌شدگی

Table 1. Classification of enrichment factor

$EF < 1$	عدم غنی‌شدگی (No enrichment)
$1 \leq EF < 3$	غنی‌شدگی جزئی (Minor enrichment)
$3 \leq EF < 5$	غنی‌شدگی متوسط (Moderate enrichment)
$5 \leq EF < 10$	غنی‌شدگی متوسط به بالا (Moderately severe enrichment)
$10 \leq EF < 25$	غنی‌شدگی شدید (Severe enrichment)
$25 \leq EF < 50$	غنی‌شدگی خیلی شدید (Very severe enrichment)
$EF > 50$	غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید (Extremely severe enrichment)

Cn و Bn به ترتیب نشان‌دهنده غلظت عنصر مورد ارزیابی در نمونه خاک و مقدار مرجع آن عنصر هر دو بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم است. از مقدار ثابت (۱/۵) نیز برای به حداقل رساندن تأثیر تغییرات احتمالی در مقادیر مرجع ژئوشیمیایی استفاده شد. (Mohammadi Roozbahani *et al.*, 2015).
دسته‌بندی مقادیر سنجه ژئوشیمیایی مولر به شرح مندرج در جدول ۲ است (Muller, 1969; Loska *et al.*, 2004; Benhaddya and Hadjel, 2014):

سنجه ژئوشیمیایی مولر^۱

در این مطالعه، سنجه ژئوشیمیایی مولر با استفاده از رابطه ۲ و با هدف ارزیابی و طبقه‌بندی سطح آلودگی خاک محاسبه شد (González-Macías *et al.*, 2006; Sabet and Aghlidi *et al.*, 2020):

$$I_{geo} = \log_2 \frac{Cn}{1.5 Bn} \quad (2)$$

در رابطه ۲:

جدول ۲- دسته‌بندی مقادیر فاکتور ژئوشیمیایی مولر

Table 2. Classification of the geoaccumulation index

$I_{geo} \leq 0$	غیرآلوده (Unpolluted)
$0 < I_{geo} \leq 1$	غیرآلوده تا آلودگی متوسط (Unpolluted to moderately polluted)
$1 < I_{geo} \leq 2$	آلودگی متوسط (Moderate to high polluted)
$2 < I_{geo} \leq 3$	آلودگی متوسط تا آلودگی شدید (Moderately to strongly polluted)
$3 < I_{geo} \leq 4$	آلودگی شدید (Strongly polluted)
$4 < I_{geo} \leq 5$	آلودگی شدید تا آلودگی خیلی شدید (Strongly to very strongly polluted)
$I_{geo} > 5$	آلودگی خیلی شدید (Very strongly polluted)

سنجه‌های آلودگی^{۱۱}

$$IPI = \text{mean} (PI_i), \quad (4)$$

$$PLI = (PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n)^{1/n} \quad (5)$$

$$DC = \sum_{i=1}^n PI_i, \quad (6)$$

در رابطه ۵:

n بیان‌گر تعداد عناصر مورد ارزیابی است.

دسته‌بندی مقادیر سنجه‌های آلودگی، آلودگی تلفیقی و بار آلودگی به شرح مندرج در جدول ۳ است (Sabet Aghlidi et al., 2020):

در این پژوهش، برای ارزیابی سطح آلودگی عناصر مورد مطالعه و در نتیجه طبقه آلودگی عمومی نمونه خاک سنجه‌های آلودگی، آلودگی تلفیقی^{۱۲} و بار آلودگی^{۱۳} به شرح مندرج در روابط ۳ تا ۵ محاسبه شدند (Chen et al., 2005; Lu et al., 2014). از طرفی، برای ارزیابی اثرات هم‌پیشی عناصر بر سلامت انسان نسبت به محاسبه سنجه درجه آلودگی^{۱۴} مطابق با رابطه ۶ اقدام شد (Mirzaei et al., 2014; Shang et al., 2015):

$$I = \frac{\text{Content of element in soil sample}}{\text{Reference value}} \quad (3)$$

جدول ۳- دسته‌بندی مقادیر سنجه‌های آلودگی، آلودگی تلفیقی و بار آلودگی

Table 3. Classification of PI, IPI and PLI indices

PI		IPI		PLI	
≤ 1	آلودگی ناچیز (Low contamination)	< 1	کم (Low)	< 1	غیر آلوده (Unpolluted)
1 < ≤ 3	آلودگی متوسط (Moderate contamination)	1 < IPI < 2	متوسط (Middle)	1 ≤ < 2	آلودگی متوسط (Moderately polluted)
> 3	آلودگی زیاد (High contamination)	IPI > 2	زیاد (High)	2 ≤ < 3	آلودگی شدید (Strongly polluted)
				≥ 3	بسیار آلوده (Extremely polluted)

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (7)$$

$$E_r^i = Ti \cdot C_f^i \quad (8)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (9)$$

در روابط ۷ و ۸:

C_s^i, C_n^i, C_f^i و Ti به ترتیب بیان‌گر غلظت عنصر در نمونه خاک بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، غلظت زمینه عنصر بر اساس میانگین غلظت در شیل بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، ضریب آلودگی هر عنصر و فاکتور پاسخ سمیت^{۱۵} هر عنصر (۱، ۵، ۳۰، ۲ و ۵ به ترتیب برای عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل) است (Mohammad Moradi et al., 2018; (Sobhanardakani, 2019; Sabet Aghlidi et al., 2020 مطابق الگوی Hakanson، طبقه‌بندی بیان شده برای RI و E_r به شرح مندرج در جدول ۵ است (Hakanson, 1980; Tytła and Kostecki, 2019).

همچنین دسته‌بندی مقادیر درجه سنجه آلودگی در جدول ۴ آورده شده است (Wang et al., 2013; Hu et al., 2014):

جدول ۴- دسته‌بندی مقادیر درجه سنجه آلودگی

Table 4. Classification of DC index

DC < 6	درجه کم آلودگی (Low degree of contamination)
6 < DC ≤ 12	درجه متوسط آلودگی (Moderate degree of contamination)
12 < DC ≤ 24	درجه قابل توجه آلودگی (Considerable degree of contamination)

ارزیابی خطر بالقوه بوم‌شناختی فلزهای سنگین

برای محاسبه ضریب خطر بالقوه بوم‌شناختی (E_r^i) هر یک از عناصر و از طرفی سنجه خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی فلزهای سنگین در خاک (RI) از روابط ۷ تا ۹ استفاده شد (۶۰-۵۸.۵۱):

جدول ۵- دسته‌بندی مقادیر سنج‌های خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی و خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی

Table 5. Classification of Er and RI indices

E_r^i	RI
< ۴۰	خطر کم (Low)
۴۰ < ≤ ۸۰	خطر متوسط (Moderate)
۸۰ < ≤ ۱۶۰	خطر قابل توجه (Considerable)
۱۶۰ < ≤ ۳۲۰	خطر زیاد (High)
> ۳۲۰	خطر خیلی زیاد (Serious)

طرفی، برای شناسایی منابع بالقوه عناصر در نمونه‌های خاک از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان روش آماری چند متغیره استفاده شد. همچنین، خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای تشخیص گروه‌بندی عناصر مورد تجزیه و تحلیل ارزیابی شد.

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی مربوط به تعیین مقادیر پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- آماره‌های توصیفی مقادیر پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک

Table 6. Descriptive statistics of physicochemical parameters in soil samples of the study area

آماره (Parameter)	واحد سنجش (Units)	کمینه (Minimum)	بیشینه (Maximum)	میانه (Median)	میانگین (Mean)	انحراف معیار (SD)	ضریب تغییرات (%) (CV%)	دوز مرجع* (Reference Value)
آهن (Iron)	mg kg ⁻¹	20610	36595	25781.5	26651.6	4810	18.0	47200
روی (Zinc)	mg kg ⁻¹	44.0	95.0	71.5	71.7	15.9	22.2	40.2
سرب (Lead)	mg kg ⁻¹	19.0	41.7	25.3	27.7	8.43	30.4	34.2
کادمیم (Cadmium)	mg kg ⁻¹	0.90	1.65	1.22	1.22	0.208	17.0	0.230
کروم (Chromium)	mg kg ⁻¹	14.0	30.0	22.9	22.3	5.19	23.3	20.8
نیکل (Nickel)	mg kg ⁻¹	16.2	55.0	34.4	32.8	11.5	35.1	45.7
pH		6.90	8.01	7.38	7.39	0.376	5.10	
هدایت الکتریکی (EC)	μS cm ⁻¹	6050	21000	9950	10765	4895	45.5	
کل کربن آلی (TOC)	%	0.205	0.999	0.380	0.478	0.275	57.5	

* واحدها بر حسب میلی گرم در کیلوگرم (mg kg⁻¹) است (Turekian and Wedepohl, 1961; Azimzadeh and Khademi, 2013; Mohammadi Roozbahani et al., 2015; Mazloomi et al., 2017; Amouei et al., 2018; Sabet Aghlidi et al., 2020)

غلظت ۲۶۶۵۱۶ برای آهن، ۴۴/۰ تا ۹۵/۰ با میانگین غلظت ۷۱/۷ برای روی، ۱۹/۰ تا ۴۱/۷ با میانگین غلظت ۲۷/۷ برای سرب، ۰/۹۰ تا ۱/۶۵ با میانگین غلظت ۱/۲۲ برای کادمیم،

پردازش آماری داده‌ها

بدین منظور از نسخه ۲۰ نرم‌افزار آمای SPSS در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ استفاده شد. بدین صورت که، از آزمون شاپیرو - ویلک^{۱۶} برای بررسی نرمال بودن داده‌ها و از آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه^{۱۷} و به‌دنبال آن آزمون تعقیبی دانکن^{۱۸} برای مقایسه میانگین غلظت عناصر نمونه‌های خاک بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری استفاده شد. برای بررسی همبستگی بین میانگین محتوی عناصر در نمونه‌ها با پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک آزمون ضریب همبستگی پیرسون^{۱۹} اجرا شد. از

نتایج مندرج در جدول ۶ بیان‌گر آن است که محتوی عناصر (میلی گرم در کیلوگرم) در نمونه‌های خاک سطحی اطراف مجموعه آرادکوه در محدوده ۲۰۶۱۰ تا ۳۶۵۹۵ با میانگین

مقادیر هدایت الکتریکی با میانگین ۱۰۷۵۶ میکروموس در سانتی‌متر نیز از ۶۰۵۰ تا ۲۱۰۰۰ میکروموس در سانتی‌متر متغیر بود، به‌طوریکه ۴۰٪ از نمونه‌ها در طبقه خاک شور (۸۰۰۰ - ۴۰۰۰ میکروموس در سانتی‌متر)، ۵۰٪ از نمونه‌ها در طبقه به‌شدت شور (۱۶۰۰۰ - ۸۰۰۰ میکروموس در سانتی‌متر) و ۱۰٪ از نمونه‌ها در طبقه فوق‌العاده شور (> ۱۶۰۰۰ میکروموس در سانتی‌متر) دسته‌بندی شدند. لازم به بیان است که نتایج آزمون شاپیرو - ویلک نشان داد که مقادیر همه عناصر در نمونه‌های خاک از توزیع نرمال برخوردار بوده است ($p > 0.05$).

۱۴/۰ تا ۳۰/۰ با میانگین غلظت ۲۲/۳ برای کروم و ۱۶/۲ تا ۵۵/۰ با میانگین غلظت ۳۲/۸ برای نیکل بوده است. از طرفی، مقادیر میانه عناصر برابر با ۲۵/۳، ۷۱/۵، ۲۵۷۸۱/۵، ۱/۲۲، ۲۲/۹ و ۳۴/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب برای عناصر آهن، روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل نشان‌دهنده تغییرات مشخص در مقادیر عناصر بین نمونه‌های خاک است و از ترتیب نزولی آهن < روی < نیکل < کادمیم < کروم < سرب پیروی کرده است. همچنین، نتایج نشان داد که مقادیر pH با میانگین ۷/۳۹ از ۶/۹۰ تا ۸/۰۱ متغیر بود و در ۹۰٪ از نمونه‌های خاک مقادیر این پارامتر بزرگ‌تر از ۷ بوده است.

جدول ۷- مقادیر سنجه‌های فاکتور غنی‌شدگی، آلودگی، سنجه درجه آلودگی و ژئوشیمیایی مولر در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه
Table 7. EF, CPI, DC and I-geo values for elements in soil samples of the study area

عنصر (Element)	فاکتور غنی‌شدگی (EF value)	سنجه آلودگی (PI value)	کیفیت خاک (Soil quality)	سنجه درجه آلودگی (DC value)	کیفیت خاک (Soil quality)	سنجه ژئوشیمیایی مولر	کیفیت خاک (Soil quality)
آهن (Iron)	1.00	0.565	آلودگی ناچیز (LC)	10.3	درجه متوسط آلودگی (MDC)	-1.41	غیر آلوده (UP)
روی (Zinc)	3.16	1.78	آلودگی متوسط (MC)			0.251	غیر آلوده تا آلودگی متوسط (UPMP)
سرب (Lead)	1.43	0.900	آلودگی ناچیز (LC)			-0.888	غیر آلوده (UP)
کادمیم (Cadmium)	9.39	5.30	آلودگی زیاد (HC)			1.82	آلودگی متوسط (MP)
کروم (Chromium)	1.90	1.07	آلودگی متوسط (MC)			-0.484	غیر آلوده (UP)
نیکل (Nickel)	1.27	0.718	آلودگی ناچیز (LC)			-1.06	غیر آلوده (UP)

بود. بنابراین، بنابرین، دسته‌بندی Liu and Zhang (2000) منابع انسان ساخت را می‌توان به‌عنوان منشاء عناصر روی، کادمیم و کروم در نظر گرفت. از طرفی، میانگین مقادیر سنجه آلودگی از ۰/۵۶۵ تا ۵/۳۰ متغیر و بنابرین، کیفیت

همان‌طور که در جدول ۷ آورده شده است، میانگین مقادیر فاکتور غنی‌شدگی از ۱/۲۷ تا ۹/۳۹ متغیر و از این‌رو، کیفیت خاک سطحی منطقه مورد مطالعه نیز از "غنی‌شدگی جزئی" تا "غنی‌شدگی متوسط به بالا" متغیر

خاک "آلودگی متوسط" به این عنصر داشته‌اند. این در حالی است که، میانگین مقادیر سنجه آلودگی سرب برابر با ۰/۹۰۰ بوده و ۷۰٪ و ۳۰٪ از نمونه‌های خاک به ترتیب "آلودگی ناچیز" و "آلودگی متوسط" به این عنصر داشته‌اند. افزون بر این، میانگین مقادیر سنجه آلودگی کادمیم برابر با ۵/۳۰ بوده و ۱۰۰٪ از نمونه‌های خاک "آلودگی زیاد" به این عنصر داشته‌اند. همچنین، میانگین مقادیر سنجه آلودگی کروم برابر با ۱/۰۷ بوده و ۴۰٪ و ۶۰٪ از نمونه‌های خاک به ترتیب "آلودگی ناچیز" و "آلودگی متوسط" به این عنصر داشته‌اند. میانگین مقادیر سنجه آلودگی نیکل نیز برابر با ۰/۷۱۸ بوده و ۹۰٪ و ۱۰٪ از نمونه‌های خاک به ترتیب "آلودگی ناچیز" و "آلودگی متوسط" به این عنصر داشته‌اند

خاک سطحی منطقه مورد مطالعه نیز از "آلودگی ناچیز" تا "آلودگی زیاد" متغیر بود. هرچند، مقادیر سنجه درجه آلودگی با ۱۰/۳ نیز نشان داد که کیفیت خاک سطحی منطقه مورد مطالعه در طبقه "درجه متوسط آلودگی" قرار دارد. این در حالی است که، مقادیر محاسبه شده سنجه ژئوشیمیایی مولر نیز نشان داد که کیفیت خاک سطحی منطقه مورد مطالعه از "غیرآلوده" تا "آلودگی متوسط" متغیر و تا حد زیادی با طبقه‌بندی کیفی خاک براساس مقادیر محاسبه شده فاکتور غنی‌شدگی مطابقت داشته است. نتایج نشان داد که میانگین مقادیر سنجه آلودگی آهن برابر با ۰/۵۶۵ بوده و ۱۰۰٪ نمونه‌های خاک "آلودگی ناچیز" به این عنصر داشته‌اند. از طرفی، میانگین مقادیر سنجه آلودگی روی برابر با ۱/۷۸ بوده و ۱۰۰٪ نمونه‌های

جدول ۸- مقادیر سنجه‌های آلودگی تلفیقی و بار آلودگی عناصر در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Table 8. IPI and PLI of elements in soils of the study area

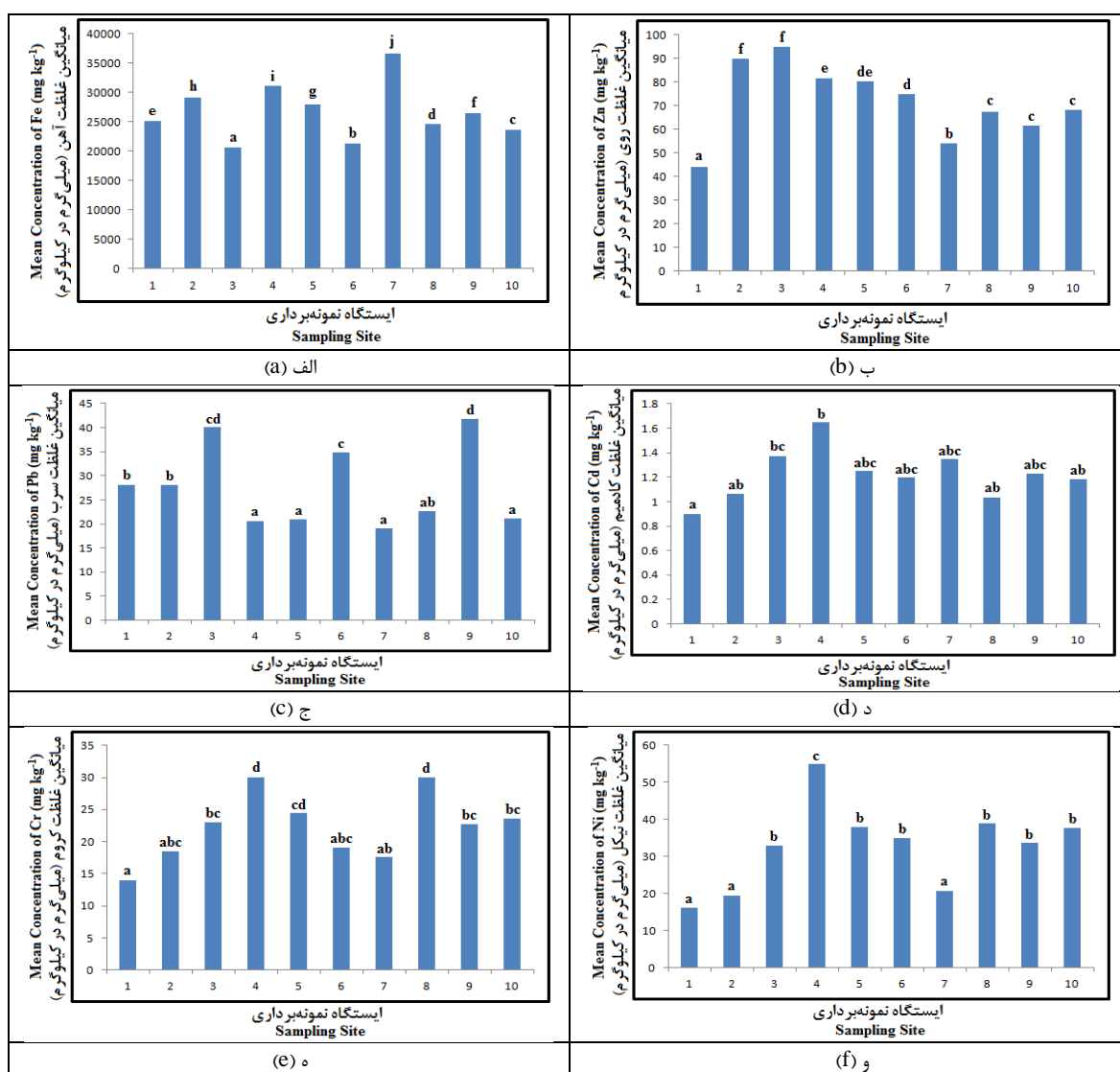
سنجه آلودگی تلفیقی (IPI)			تعداد نمونه‌ها (Number of Samples)			سنجه بار آلودگی (PLI)			تعداد نمونه‌ها (Number of Samples)			
کمینه (Minimum)	بیشینه (Maximum)	میانگین (Average)	کم (Low)	متوسط (Middle)	زیاد (High)	کمینه (Minimum)	بیشینه (Maximum)	میانگین (Average)	غیر آلوده (Unpolluted)	آلودگی متوسط (Moderately polluted)	آلودگی شدید (Strongly polluted)	بسیار آلوده (Extremely polluted)
1.17	2.36	1.72	0	0	30	0.789	1.76	1.23	3	27	0	0

این سنجه ۱۰٪ و ۹۰٪ از نمونه‌ها به ترتیب به‌عنوان "خاک غیرآلوده" و "خاک با آلودگی متوسط" قابل طبقه‌بندی هستند. از آنجا که، عنصر کادمیم بیش‌ترین سهم را در مقادیر محاسبه شده سنجه‌های PI و IPI داشت، می‌توان نتایج حاصل از محاسبه این سنجه‌ها را با نتایج سنجه ژئوشیمیایی مولر که بیش‌ترین مقادیر محاسبه شده آن مربوط به عنصر کادمیم با ۱/۸۲ و بیان‌گر آلودگی متوسط خاک بود، منطبق

براساس نتایج بیان شده در جدول ۸، میانگین مقادیر سنجه IPI نمونه‌های خاک برابر با ۱/۷۲ بود و همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری با استناد به مقادیر محاسبه شده این سنجه در طبقه زیاد دسته‌بندی می‌شوند. این بدان معنی است که ۱۰۰٪ از نمونه‌ها به‌عنوان "خاک آلوده" قابل طبقه‌بندی هستند. افزون بر این، میانگین مقادیر سنجه PLI نمونه‌های خاک برابر با ۱/۲۳ بود و با استناد به مقادیر محاسبه شده

در نمونه‌های خاک همبستگی منفی وجود داشت. افزون بر این، با اطمینان ۹۹٪، بین میانگین مقادیر کروم و نیکل ($r = ۰/۸۸۵$, $p = ۰/۰۰۱$) در نمونه‌های خاک همبستگی مثبت وجود داشت. از طرفی، همبستگی بسیار ضعیف و منفی بین سرب با عناصر آهن، کادمیم، کروم و نیکل و همچنین کم‌تر بودن میانگین مقادیر سرب در مقایسه با غلظت زمینه این عنصر، نشان‌دهنده آن است که سرب احتمالاً از منابع طبیعی نشأت گرفته است. (Aghlidi et al. (2020) Sabet نیز در پژوهش خود به نتایج مشابهی دست یافتند

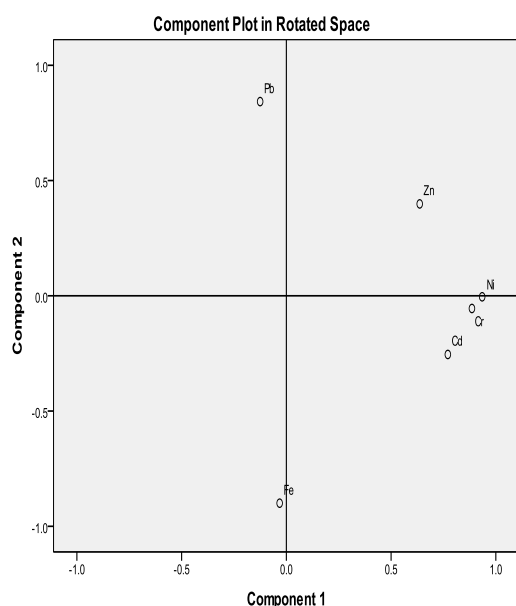
دانست. در سایر پژوهش‌ها (Curran- Mirzaei et al. (2014) و (Sabet Aghlidi et al. (2020) و (Cournane et al. (2015) نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. نتایج آزمون ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که با اطمینان ۹۵٪، بین میانگین مقادیر سرب و کل کربن آلی ($r = ۰/۶۶۶$, $p = ۰/۰۳۵$) و بین میانگین مقادیر کادمیم و نیکل ($r = ۰/۶۵۹$, $p = ۰/۰۳۸$) در نمونه‌های خاک همبستگی مثبت وجود داشت. همچنین، با اطمینان ۹۵٪، بین میانگین مقادیر pH و EC ($r = -۰/۷۰۰$, $p = ۰/۰۲۴$)



شکل ۲- گروه‌بندی آماری ایستگاه‌های نمونه‌برداری از حیث میانگین محتوی آهن (الف)، روی (ب)، سرب (ج)، کادمیم (د)، کروم (ه) و نیکل (و) در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه

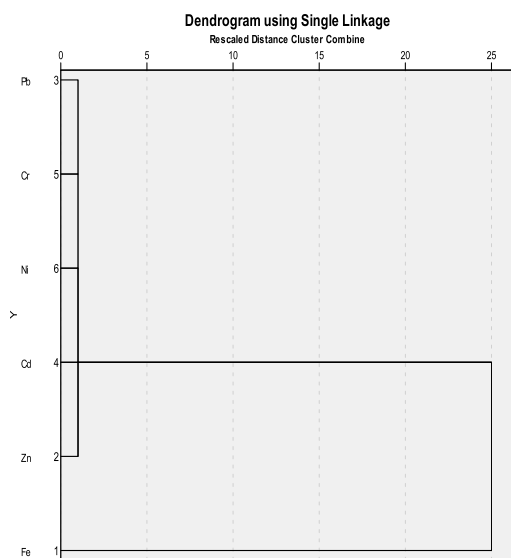
Fig. 2- Statistical difference between the sampling sites in terms of average concentrations of Fe (a), Zn (b), Pb (c), Cd (d), Cr (e) and Ni (f) in soil samples of the study area

و سنجه‌های ژئوشیمیایی مولر، PI و IPI با نتایج PCA اقرار کرد.



شکل ۳- نمودار تحلیل مؤلفه‌های اصلی فلزهای سنگین در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Fig. 3- Loading plot of tested elements described by PC1 and PC2



شکل ۴- دندوگرام خوشه‌بندی سلسله مراتبی فلزهای سنگین در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Fig. 4- Hierarchical clustering of surface soil samples of the study area based on elements

همان‌طور که نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی (شکل ۴) نشان می‌دهد، چهار خوشه مختلف قابل تشخیص است

نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه به‌منظور مقایسه بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری از حیث میانگین غلظت عناصر در نمونه‌های خاک سطحی در شکل ۲ آورده شده است. لازم به توضیح است که حروف غیر مشترک (a, b, c و ...) مندرج در نمودارها، بیان‌گر تفاوت معنی‌دار ($p < 0.05$) آماری بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری از حیث میانگین غلظت عناصر در نمونه‌های خاک است. به‌عنوان نمونه، نتایج مندرج در شکل ۲(الف)، نشان می‌دهد که بین هیچ کدام از ایستگاه‌ها از حیث میانگین غلظت آهن در نمونه‌های خاک تشابه معنی‌دار آماری وجود نداشته است. و یا نتایج مندرج در شکل ۲(ب)، بیان‌گر آن است که، بین ایستگاه‌های ۲ و ۳ و یا بین ایستگاه‌های ۸، ۹ و ۱۰ از این حیث میانگین غلظت روی اختلاف معنی‌دار آماری وجود نداشته است. همین تفاسیر را می‌توان در مورد سایر نمودارها نیز بیان کرد.

نتایج خروجی مدل تجزیه به مؤلفه‌های اصلی فلزهای سنگین در نمونه‌های خاک سطحی اطراف مجموعه آرادکوه (شکل ۳) بیان‌گر استخراج دو مؤلفه اصلی اول (PC1) و دوم (PC2) با واریانس مقدار ویژه^{۲۰} بزرگتر از یک و به‌ترتیب برابر با ۴۴/۵۸۶٪ و ۲۹/۰۹۸٪ بود که در مجموع ۷۳/۶۸۴٪ از واریانس جمعی یا کل^{۲۱} را تشکیل داده و هر ۶ عنصر را شامل می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مؤلفه اصلی اول با عناصر روی، کادمیم، کروم و نیکل توصیف شده است. در PC1، بارهای عاملی^{۲۲} مثبت قابل توجه برای نیکل (۰/۹۳۲)، کروم (۰/۸۸۸)، کادمیم (۰/۷۸۸) و روی (۰/۶۰۴) مشاهده شد. در حالی‌که، در PC2، بار عاملی مثبت قابل توجه برای سرب (۰/۸۳۰) و بار عاملی منفی قابل توجه برای آهن (۰/۸۹۹-) مشاهده شد. از این‌رو، می‌توان گفت که چه- بسا عناصر روی، کادمیم، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک از یک منبع یکسان (انسان‌ساخت) نشأت گرفته و منشاء سرب نیز با این عناصر متفاوت بوده است. در این مورد، می‌توان به تطابق نتایج آزمون همبستگی پیرسون

زمین‌های کشاورزی اطراف محل دفن اشاره کرد. Cai *et al.* (2015)، Ali *et al.* (2016)، Yang *et al.* (2016a) و Sabet Aghlidi *et al.* (2020) نیز در مطالعات خود به نتایج مشابهی دست یافتند. این در حالی است که، از احتراق سوخت‌های فسیلی و فرسایش لنت وسایل نقلیه عبوری (McKenzie *et al.*, 2009; Farzan and Sobhanardakani, 2016) از بزرگراه امام خمینی (ره) در مجاورت محل دفن به‌عنوان منابع تخلیه کادمیم به محیط نمی‌توان چشم‌پوشی کرد.

که خوشه اول شامل عنصر آهن، خوشه دوم شامل عنصر روی، خوشه سوم شامل عناصر سرب، کروم و نیکل و خوشه چهارم شامل عنصر کادمیم است. بنابراین، نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی تا حدودی با نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی و همچنین همبستگی پیرسون که بیان‌گر منشاء یکسان عناصر کروم و نیکل است، منطبق است. در مورد منشاء کادمیم، می‌توان به منابع مصنوعی (انسان ساخت) انتشار این عنصر در منطقه مورد مطالعه از جمله استفاده گسترده از کودهای دامی و کودهای فسفاته در

جدول ۹- نتایج ارزیابی خطر بالقوه عناصر در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه
Table 9. Potential ecological risk factor values of the soil samples of the study area

درجه خطر (Potential بوم‌شناختی ecological risk)	RI	E_i^f					ایستگاه Sampling) (site)
		نیکل (Nickel)	کروم (Chromium)	کادمیم (Cadmium)	سرب (Lead)	روی (Zinc)	
کم (Low ecological risk)	125.7	1.77	1.35	117.4	4.09	1.09	1
کم (Low ecological risk)	148.5	2.11	1.78	138.3	4.09	2.24	2
متوسط (Moderate ecological risk)	192.7	3.61	2.21	178.7	5.85	2.36	3
متوسط (Moderate ecological risk)	229.1	6.02	2.88	215.2	3.00	2.03	4
متوسط (Moderate ecological risk)	174.6	4.16	2.36	163.0	3.07	1.99	5
متوسط (Moderate ecological risk)	169.1	3.83	1.83	156.5	5.09	1.86	6
متوسط (Moderate ecological risk)	184.2	2.26	1.69	176.1	2.78	1.34	7
کم (Low ecological risk)	146.5	4.26	2.89	134.3	3.30	1.68	8
متوسط (Moderate ecological risk)	173.9	3.70	2.19	160.4	6.10	1.53	9
متوسط (Moderate ecological risk)	165.1	4.14	2.27	153.9	3.10	1.70	10
متوسط (Moderate ecological risk)	170.9	3.59	2.14	159.4	4.04	1.78	میانگین (Mean)

استناد به دسته‌بندی بیان شده برای سنج، می‌توان گفت که خطر بالقوه بوم‌شناختی برای عناصر روی، سرب، کروم و نیکل "کم" و برای عنصر کادمیم "متوسط" بوده است. از طرفی با توجه به این که میانگین مقدار سنج RI برابر با ۱۷۰/۹ بود، بنابراین، سنج خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی عناصر در نمونه‌های خاک مورد مطالعه در دسته

نتایج محاسبه سنج خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی اطراف مجموعه آرادکوه (جدول ۹) نشان داد که میانگین مقادیر سنج برای عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل به ترتیب برابر با ۱/۷۸، ۴/۰۴، ۱۵۹/۴، ۲/۱۴ و ۳/۵۹ با ترتیب نزولی کادمیم < سرب < نیکل < کروم < روی بوده است. بنابراین، با

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف منشاء‌یابی و ارزیابی خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر آهن، روی، سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی اطراف مجتمع دفع و پردازش پسماند جامد شهری آرادکوه تهران در سال ۱۳۹۹ انجام یافت. نتایج نشان داد که محتوی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) در نمونه‌های خاک سطحی در محدوده ۲۰۶۱۰ تا ۳۶۵۹۵ با میانگین ۲۶۶۵۱۶ برای آهن، ۴۴/۰ تا ۹۵/۰ با میانگین ۷۱/۷ برای روی، ۱۹/۰ تا ۴۱/۷ با میانگین ۲۷/۷ برای سرب، ۰/۹۰ تا ۱/۶۵ با میانگین ۱/۲۲ برای کادمیم، ۱۴/۰ تا ۳۰/۰ با میانگین ۲۲/۳ برای کروم و ۱۶/۲ تا ۵۵/۰ با میانگین ۳۲/۸ برای نیکل بوده است. از طرفی، کیفیت خاک سطحی منطقه مورد مطالعه برطبق مقادیر فاکتور غنی‌شدگی از "غنی‌شدگی جزئی" تا "غنی‌شدگی متوسط به بالا"، بنابر مقادیر سنجه آلودگی "آلودگی ناچیز" تا "آلودگی زیاد"، بنابر سنجه درجه آلودگی از "درجه متوسط آلودگی"، بنابر مقادیر سنجه ژئوشیمیایی مولر از "غیرآلوده" تا "آلودگی متوسط" متغیر بوده است. نتایج محاسبه سنجه Er نشان داد که خطر بالقوه بوم‌شناختی برای عناصر روی، سرب، کروم و نیکل "کم" و برای عنصر کادمیم "متوسط" بوده است. از طرفی، با توجه به این که میانگین مقدار سنجه RI برابر با ۱۷۰/۹ بود، بنابراین، سنجه خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی عناصر در نمونه‌های خاک مورد مطالعه در دسته "مخاطره بوم‌شناختی متوسط" قرار داشت. نتایج آزمون همبستگی پیرسون و سنجه‌های ژئوشیمیایی مولر، PI و IPI در تطابق با نتایج PCA و HCA و بیان‌گر آن بود که چه‌بسا عناصر روی، کادمیم، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک از منابع انسان‌ساخت و سرب نیز از منبع طبیعی (لیتوتونیک) نشأت گرفته است. در پایان، با توجه به خطرهای فلزهای سنگین بر سلامت محیط و انسان، نسبت به پایش دوره‌ای خاک اطراف لندفیل‌ها و محاسبه مخاطره سلامت آلاینده‌های خاک در منطقه‌های مسکونی پیرامون توصیه می‌شود. افزون بر این، با توجه به محدودیت‌های

"مخاطره بوم‌شناختی متوسط" قرار داشت.

از نظر مقادیر میانه عناصر مورد مطالعه، از آن‌جا که محتوی عنصر کروم (۲۲/۹ میکروگرم در کیلوگرم) با دوز مرجع (۲۰/۸ میکروگرم در کیلوگرم) قابل مقایسه بود، بنابراین، می‌توان اذعان داشت که این عنصر در نمونه‌های خاک در مقایسه با سایر عناصر کم‌تر تحت تأثیر عامل‌های خارجی^{۲۳} قرار داشته است، در حالی که مقادیر آهن، روی، سرب، کادمیم و نیکل به‌ترتیب ۱/۸۴-، ۱/۷۸، ۱/۳۵-، ۵/۳۰ و ۱/۳۳- برابر دوز مرجع بود (جدول ۶). افزون بر این، مقایسه میانه مقدار کادمیم با دوز مرجع نشان‌دهنده غنی‌شدگی قابل توجه این عنصر است. بنابراین، میانگین مقادیر کادمیم به‌مراه انحراف معیار آن را می‌توان دال بر منشاء انسانی این عنصر فرض کرد. همچنین، نیکل و سرب به ترتیب با ۳۵/۱٪ و ۳۰/۴٪ بیش‌ترین مقادیر ضریب تغییرات را در بین نمونه‌های خاک به‌خود اختصاص داده و بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌ترین احتمال تأثیرپذیری از عوامل خارجی و بویژه فعالیت‌های انسانی را داشته‌اند. کما این‌که، در سایر پژوهش‌ها نیز ضریب تغییرات بالای عناصر در نمونه‌های خاک را با تأثیرپذیری آن‌ها از عوامل خارجی مرتبط دانسته‌اند (Chen et al., 2008; Cai et al., 2015; Yang et al., 2016b; Sabet Aghlidi et al., 2020). در ضمن، ضریب تغییرات عنصر کادمیم با ۱۷٪، نشان می‌دهد که این عنصر از تغییرات ضعیفی برخوردار بوده و غلظت آن کمابیش در خاک سراسر منطقه مورد مطالعه ثابت بوده است. این در حالی است که بر خلاف نتایج حاصل، Cai et al. (2015) و Sabet Aghlidi et al. (2020) گزارش کردند که عنصر کادمیم از بیش‌ترین ضریب تغییرات در نمونه‌های خاک در مقایسه با سایر عناصر برخوردار بوده است. از سوی دیگر، مقادیر کم‌تر ضریب تغییرات آهن (۱۸٪) و روی (۲۲/۲٪) در مقایسه با سایر عناصر نشان می‌دهد که توزیع این فلزها در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه به‌نسبت همگن بوده است.

- ⁷ Quality Assurance: QA
⁸ Recovery Rate
⁹ Enrichment Factor: EF
¹⁰ Geo-accumulation Index: I-geo
¹¹ Pollution Indices: PIs
¹² Integrated Pollution Index: IPI
¹³ Pollution Load Index: PLI
¹⁴ Degree of Contamination: DC
¹⁵ Toxic Response Factor of Element: T_i
¹⁶ Shapiro-Wilk tests
¹⁷ One-Way ANOVA
¹⁸ Duncan Multiple Range Test: DMR
¹⁹ Pearson's correlation coefficient: PCC
²⁰ Eigenvalue
²¹ Cumulative Variance
²² Loading Factor
²³ External Factors

زمانی و کمبود اعتبارات مالی که در این پژوهش با آن مواجه بودیم، مطالعه سایر عناصر سمی و همچنین آلاینده‌های آلی بویژه PAHs و PCBs در خاک اطراف منطقه مورد بررسی در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- ¹Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry: ICP-OES
² Monomial Potential Ecological Risk Factor: E_r
³ Ecological Risk Index (ERI)
⁴ Principal Component Analysis: PCA
⁵ Hierarchical Cluster Analysis: HCA
⁶ Quality Control: QC

منابع

- Aghelan, N., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and Merrikhpour, H., 2020. Evaluation of chelating agents with different biodegradability rates on the enhanced phytoremediation efficiency of ornamental species (*Amaranthus caudatus* and *Tagetes patula*) in cadmium contaminated soils. *Journal of Environmental Health Engineering*. 7(4), 427–442. (In Persian).
- Algül F. and Beyhan, M., 2020. Concentrations and sources of heavy metals in shallow sediments in Lake Bafa, Turkey. *Scientific Reports*. 10, 11782.
- Ali, M.H., Mustafa, A-RA. and El-Sheikh, A.A., 2016. Geochemistry and spatial distribution of selected heavy metals in surface soil of Sohag, Egypt: a multivariate statistical and GIS Approach. *Environmental Earth Sciences*. 75, 1257.
- Amouei, A., Cherati, A. and Naghipour, D., 2018. Heavy metals contamination and risk assessment of surface soils of Babol in northern Iran. *Health Scope*. 7, e62423.
- Azimzadeh, B. and Khademi, H., 2013. Estimation of background concentration of selected heavy metals for pollution assessment of surface soils of Mazandaran Province, Iran. *Journal of Water and Soil*. 27, 548–559. (In Persian).
- Benhaddya, M.L. and Hadjel, M., 2014. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria. *Environmental Earth Sciences*. 71, 1473–1486.
- Cai, L., Xu, Z., Bao, P., He, M., Dou, L., Chen, L., Zhou, Y. and Zhu, Y-G., 2015. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and source of arsenic and heavy metals in the agricultural soils in Shunde, Southeast China. *Journal of Geochemical Exploration*. 148, 189–195.
- Chen, T-B., Zheng, Y-M., Lei, M., Huang, Z-C., Wu, H-T., Chen, H., Fan, K-K., Yu, K., Wu, X. and Tian, Q-Z., 2005. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere*. 60, 542–551.
- Chen, T., Liu, X., Zhu, M., Zhao, K., Wu, J., Xu, J. and Huang, P., 2008. Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China. *Environmental Pollution*. 151, 67–78.
- Curran-Cournane, F., Lear, G., Schwendenmann, L. and Khin, J., 2015. Heavy metal soil pollution is influenced by the location of green spaces within urban settings. *Soil Research*. 53(3), 306–315.

- Davodpour, R., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Abdi, N. and Lorestani, B., 2019. Honeybees (*Apis mellifera* L.) as a potential bioindicator for detection of toxic and essential elements in the environment (Case study: Markazi Province, Iran). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 77(3), 344–358.
- Ebo Duncan, A., de Vries, N. and Biritwum Nyarko, K., 2018. Assessment of heavy metal pollution in the sediments of the River Pra and its tributaries. *Water, Air, and Soil Pollution*. 229(8), 272.
- El-Gammal, M.I., Ibrahim, M.S., El-Sonbati, M.A. and El-Zeiny, A.M., 2011. Assessment of heavy metal contamination on street dust at New Damietta City, Egypt. *Journal of Environmental Sciences*. 40(2), 221–237.
- Ersoy, A. and Yünsel, T.Y., 2018. The assessment of soil contamination by heavy metals using geostatistical sequential Gaussian simulation method. *Human and Ecological Risk Assessment*. 24(8), 2142–2161.
- Farzan, M. and Sobhanardakani, S., 2016. Analysis of Fe, Pb, and Cd content of surface runoff in regions with high traffic intensity in Hamedan, Iran, in 2014. *Journal of Health System Research*. 12(2), 208–213. (Persian).
- Gee, G.W. and Bauder, J.W., 1986. Particle-size Analysis, Methods of Soil Analysis Part I, Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, p: 383-411.
- Gerritse, R.G. and Driel, W.V., 1984. The relationship between adsorption of trace metals, organic matter, and pH in temperate soils. *Journal of Environmental Quality*. 13, 197–204.
- Gholamalifard, M., Phillips, J. and Jalili Ghazizade, M., 2017. Evaluation of unmitigated options for municipal waste disposal site in Tehran, Iran using an integrated assessment approach. *Journal of Environmental Planning and Management*. 60(5), 792–820.
- González-Macías, C., Schifter, I., Lluch-Cota, D.B., Méndez-Rodríguez, L. and Hernández Vázquez, S., 2006. Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Salina Cruz Bay, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*. 118, 211–230.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control- A sedimentological approach. *Water Research*. 14(8), 975–1001.
- Han, Y.M., Du, P.X., Cao, J.J. and Posmentier, E.S., 2006. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*. 355, 176–186.
- Hazratzadeh, Sh. and Sobhanardakani, S., 2018. Assessment of Zn, Pb, Cd, and Cu contamination in surface soils of urban parks in city of Hamedan. *Iranian Journal of Soil Research*. 32(3), 399–413. (In Persian).
- Hosseini, S.V., Sobhanardakani, S., Kolangi Miandare, H., Harsij, M. and Regenstein, J.M., 2015. Determination of toxic (Pb, Cd) and essential (Zn, Mn) metals in canned tuna fish produced in Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 13, 59.
- Hu, Y., Wang, D., Wei, L. and Song, B., 2014. Heavy metal contamination of urban topsoils in a typical region of Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*. 14, 928–935.
- Iwegbue, C.M.A., Oliseyenum, E.C. and Martincigh, B.S., 2017. Spatio-temporal distribution of metals in household dust from rural, semi-urban and urban environments in the Niger Delta, Nigeria.

- Environmental Science and Pollution Research. 24, 14040–14059.
- Ju, Y.R., Chen, W.Y. and Liao, C.M., 2012. Assessing human exposure risk to cadmium through inhalation and seafood consumption. *Journal of Hazardous Materials*. 227–228, 353–361.
- Kanmani, S. and Gandhimathi, R., 2013. Assessment of heavy metal contamination in soil due to leachate migration from an open dumping site. *Applied Water Science*. 3, 193–205.
- Kelepertsis, A., Alexakis, D. and Kita, I., 2001. Environmental geochemistry of soils and waters of Susaki Area, Korinthos, Greece. *Environmental Geochemistry and Health*. 23(2), 117–135.
- Li, H., Qian, X., Hu, W., Wang, Y. and Gao, H., 2013. Chemical speciation and human health risk of trace metals in urban street dusts from a metropolitan city, Nanjing, SE China. *Science of the Total Environment*. 456–457, 212–221.
- Li, X., Zhang, S. and Yang, M., 2014. Accumulation and risk assessment of heavy metals in dust in main living areas of Guiyang City, Southwest China. *Chinese Journal of Geochemistry*. 33(3), 272–276.
- Liao, Q.L., Liu, C., Wu, H.Y., Jin, Y., Hua, M., Zhu, B.W., Chen, K. and Huang, L., 2015. Association of soil cadmium contamination with ceramic industry: a case study in a Chinese town. *Science of the Total Environment*. 514, 26–32.
- Loska, K., Wiechula, D. and Korus, I., 2004. Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*. 30, 159–165.
- Lu, X., Wang, L., Li, L.Y., Lei, K., Huang, L. and Kang, D., 2010. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China. *Journal of Hazardous Materials*. 173, 744–749.
- Lu, X.W., Zhang, X.L., Li, L.Y. and Chen, H., 2014. Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China. *Environmental Research*. 128, 27–34.
- Makuleke, P. and Ngole-Jeme, V.M., 2020. Soil heavy metal distribution with depth around a closed landfill and their uptake by *Datura stramonium*. *Applied and Environmental Soil Science*. 2020, ID 8872475.
- Majlessi, M., Zamanzadeh, M., Alavi, N., Amanidaz, N. and Bakhshoodeh, R., 2019. Generation rates and current management of municipal, construction and demolition waste in Tehran. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 21, 191–200.
- Mazloomi, S., Esmaeili-Sari, A., Bahramifar, N. and Moeinaddini, M., 2017. Assessment of the metals and metalloids level in street dust of the east and west of Tehran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 10, 281–292. (In Persian).
- McKenzie, E.R., Money, J.E., Green, P.G. and Young, T.M., 2009. Metals associated with stormwater-relevant brake and tire samples. *Science of the Total Environment*. 407(22), 5855–5860.
- Mirzaei, R., Ghorbani, H., Hafezi Moghaddas, N. and Rodríguez Martín, J.A., 2014. Ecological risk of heavy metal hotspots in topsoils in the Province of Golestan, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*. 147, 268–276.
- Moaref, S., Sekhvatjou, M.S. and Hosseini Alhashemi, A., 2014. Determination of trace elements concentration in wet and dry atmospheric deposition and surface soil in the largest industrial city, Southwest of Iran. *International Journal of Environmental Research*. 8(2), 335–346.
- Mohammadi, M.J., Yari, A.R., Saghzadeh, M., Sobhanardakani, S., Geravandi, S., Afkar, A., Salehi,

- S.Z., Valipour, A., Biglari, H., Hosseini, S.A., Rastegarimehr, B., Vosoughi, M. and Omidi Khaniabadi, Y., 2018. A health risk assessment of heavy metals in people consuming Sohan in Qom, Iran. *Toxin Reviews*. 37, 278–286.
- Mohammad Moradi, B., Sobhanardakani, S. and Cheraghi, M., 2018. Ecological risk of heavy metals in surface soils of urban parks. *Iranian Journal of Health and Environment*. 10(4), 429–442. (In Persian).
- Mohammadi Roozbahani, M., Sobhanardakani, S., Karimi, H. and Sorooshnia, R., 2015. Natural and anthropogenic source of heavy metals pollution in the soil samples of an industrial complex; a case study. *Iranian Journal of Toxicology*. 9(29), 1336–1341.
- Muhammad, S., Tahir Shah, M. and Khan, S., 2011. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan. *Microchemical Journal*. 98(2), 334–343.
- Muhammad, B.G., Suhaimi Jaafar, M., Abdul Rahman, A. and Abdulrasheed Ingawa, F., 2012. Determination of radioactive elements and heavy metals in sediments and soil from domestic water sources in northern peninsular Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 184, 5043–5049.
- Muller, G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Journal of Geology*. 2, 108–118.
- Naderizadeh, Z., Khademi, H. and Ayoibi, S., 2016. Biomonitoring of atmospheric heavy metals pollution using dust deposited on date palm leaves in southwestern Iran. *Atmosfera*. 29(2), 141–155.
- Qu, M., Li, W. and Zhang, C., 2013. Assessing the risk costs in delineating soil nickel contamination using sequential Gaussian simulation and transfer functions. *Ecological Informatics*. 13, 99–105.
- Sabet Aghlidi, P., Cheraghi, M., Lorestani, B., Sobhanardakani, S. and Merrikhpour, H., 2020. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, Case study: South of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 18(2), 665–676.
- Sabzevari, E. and Sobhanardakani, S., 2018. Analysis of selected heavy metals in indoor dust collected from city of Khorramabad, Iran: A case study. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 10, e67382.
- Sadeghdoust, F., Ghanavati, N., Nazarpour, A., Babaenejad, T. and Watts, M.J., 2020. Hazard, ecological, and human health risk assessment of heavy metals in street dust in Dezful, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 13, 881.
- Saedi, M., Li, L.Y. and Salmanzadeh, M., 2012. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: Pollution and ecological risk assessment in street dust of Tehran. *Journal of Hazardous Materials*. 227–228, 9–17.
- Shang, Z., Ren, J., Tao, L. and Wang, X., 2015. Assessment of heavy metals in surface sediments from Gansu section of Yellow River, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187, 79.
- Shokri Ragheb, P. and Sobhanardakani, S., 2016. Analysis of Co, Cr and Mn concentrations in atmospheric dry deposition in Hamadan City. *Scientific Journal of Hamadan University of Medical Sciences*. 23(2), 149–156. (In Persian).
- Sobhanardakani, S., 2018a. Human health risk assessment of Cd, Cu, Pb and Zn through consumption of raw and pasteurized cow's milk. *Iranian Journal of Public Health*. 47(8), 1172–1180.

- Sobhanardakani, S., 2018b. Assessment of Pb and Ni contamination in the topsoil of ring roads' green spaces in the city of Hamedan. *Pollution*. 4(1), 43–51.
- Sobhanardakani, S., 2019. Ecological and human health risk assessment of heavy metals content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biological Trace Element Research*. 187(2), 602–610.
- Sobhanardakani, S. and Jafari, S.M., 2014. Assessment of heavy metals (Cu, Pb and Zn) in different tissues of common carp (*Cyprinus carpio*) caught from Shirinsu Wetland, Western Iran. *Journal of Chemical Health Risks*. 4(2), 47–54.
- Sobhanardakani, S., Jamali, M. and Maànijou, M., 2014. Evaluation of As, Zn, Cr and Mn concentrations in groundwater resources of Razan Plain and preparing the zoning map using GIS. *Journal of Environmental Science and Technology*. 16(2), 25–38. (In Persian).
- Sobhanardakani, S. and Jamshidi, K., 2015. Assessment of metals (Co, Ni and Zn) content in the sediments of Mighan Wetland using geo-accumulation index. *Iranian Journal of Toxicology*. 9(30), 1386–1390.
- Sobhanardakani, S., Maanijou, M. and Asadi, H., 2015. Investigation of Pb, Cd, Cu and Mg concentrations in groundwater resources of Razan Plain. *Scientific Journal of Hamadan University of Medical Sciences*. 21(4), 319–329. (In Persian).
- Sobhanardakani, S. and Ghoochian, M., 2016. Analysis of heavy metals in surface sediments from Agh Gel Wetland, Iran. *Iranian Journal of Toxicology*. 34, 41–46.
- Soliman, N.F., Nasr, S.M. and Okbah, M.A., 2015. Potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Mediterranean coast, Egypt. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 13,70.
- Sutherland, R.A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*. 39, 611–627.
- Tokallog, S. and Kartal, S., 2006. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the Organized Industrial District in Kayseri (Turkey). *Atmospheric Environment*. 40, 2797–2805.
- Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*. 72, 175–192.
- Tyła, M. and Kostecki, M., 2019. Ecological risk assessment of metals and metalloids in bottom sediments of water reservoir located in the key anthropogenic "hot spot" area (Poland). *Environmental Earth Sciences*. 78, 179.
- Wang, J., Liu, G.J. and Fang, T., 2013. Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui section) by pollution load index. *Journal of University of Science and Technology of China*. 43, 97–103.
- Yang, Y., Mei, Y., Zhang, C., Zhang, R., Liao, X. and Liu, Y., 2016a. Heavy metal contamination in surface soils of the industrial district of Wuhan, China. *Human and Ecological Risk Assessment*. 22(1), 126–140.
- Yang, L.I.U., Zongwei, M.A., Jianshu, L.V. and Jun, B.I., 2016b. Identifying sources and hazardous risks of heavy metals in topsoils of rapidly urbanizing East China. *Journal of Geographical Sciences*. 26(6), 735–749.
- Zanor, G.A., García, M.G., Venegas-Aguilera, L.E., Saldaña-Robles, A., Saldaña-Robles, N., Martínez-Jaime, O.A., Segoviano-Garfias J.J.N. and Ramírez-

Santoyo L.F., 2019. Sources and distribution of arsenic in agricultural soils of Central Mexico. *Journal of Soils and Sediments*. 19(6), 2795–2808.

Zhang, J. and Liu, C.L., 2000. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in Chinaweathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 54, 1051–1070.





Environmental Sciences Vol.19 / No.3 / Autumn 2021

1-22

Source identification and ecological risk assessment of some heavy metals in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran, Iran

Seyedeh Maryam Mohammadi ¹, Bahareh Lorestani^{1*}, Soheil Sobhan Ardakani¹, Mehrdad Cheraghi ¹ and Lima Tayebi ²

¹ Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

² Department of the Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 2021.01.15 Accepted: 2021.05.10

Mohammadi, S.M., Lorestani, B., Sobhan Ardakani, S., Cheraghi, M. and Tayebi, L., 2021. Source identification and ecological risk assessment of some heavy metals in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran, Iran. *Environmental Sciences*. 19(3): 1-22.

Introduction: Heavy metals are the common pollutants of soils, which pose a potential threat to the public and particularly children's health. Therefore, this study was conducted to assess the source identification and potential ecological risk of Fe, Zn, Pb, Cd, Cr, and Ni in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran, Iran in 2020.

Material and methods: In this descriptive study, a total of 30 surface soil samples were collected from 10 sampling sites. After acid digestion of soil samples, the element contents were determined using ICP-OES. Also, pollution indices, potential ecological risk were computed. Moreover, principal component analyses (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) were performed to find out the contamination sources and distinguish the different groups of analyzed elements from different sources, respectively. Furthermore, all statistical analyses were performed by SPSS software.

Results and discussion: Based on the results, the mean content of elements in soil specimens (mg/kg) was 26651.6 for Fe, 71.7 for Zn, 27.7 for Pb, 1.22 for Cd, 22.3 for Cr, and 32.8 for Ni. On the other hand, the soil quality of the study area varied between 'minor enrichment' to 'moderately severe enrichment' based on the enrichment factor

* Corresponding Author: *Email Address:* lorestanib@iauh.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.1005>

(EF) values, between 'low contamination' to 'high contamination' based on the pollution index (PI) values, and between 'unpolluted' to 'moderately polluted' based on the geo-accumulation index (I-geo) values and also showed 'moderate degree of contamination' based on the degree of contamination (DC) values. The computed values of Er showed that the potential ecological risk of Zn, Pb, Cr, and Ni was low and for Cd was moderate. Also, as the mean value of RI was 170.9, all the examined elements could be classified as a moderate ecological risk. The results of Pearson correlation coefficient, I-geo, PI, and IPI in accordance with PCA and HCA indicated that Zn, Cd, Cr, and Ni were originated from anthropogenic sources, while, Pb had a lithogenic origin.

Conclusion: Although the studied elements had moderate potential ecological risk, since the Cd with 93.3% of the mean RI values showed a higher potential environmental risk compared to other elements, therefore, source identification and source control of this element with potentially adverse effects on humans and also environmental health is recommended.

Keywords: Surface soil, Potential ecological risk, Degree of contamination, Heavy metals, Arad-Kouh processing and disposal complex.

