

## پهنه‌بندی کیفی خاک‌های سطحی اطراف کارخانه سرب و روی ایرانکوه از دیدگاه زیست‌محیطی

محمد ابویان جهرمی<sup>۱</sup>؛ احمد خدادادی دربان<sup>۲\*</sup>؛ احمد جمشیدی زنجانی<sup>۳</sup>؛ حسین شفیعی زاده مقدم<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، m.abouiyani@gmail.com

۲- استاد گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، akdarban@modares.ac.ir

۳- استادیار گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، ajamshidi@modares.ac.ir

۴- استادیار سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس hshafeezadeh@gmail.com

(دریافت ۱۱ آبان ۱۳۹۵، پذیرش ۲۰ آبان ۱۳۹۶)

### چکیده

فعالیت‌های معدنکاری و کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی یکی از منابع اصلی آلودگی خاک به فلزات سنگین محسوب می‌شوند. در این پژوهش ۶۵ ایستگاه اطراف کارخانه فرآوری سرب و روی معدن ایرانکوه و روستای مجاور آن نمونه‌برداری شد. پس از جدا کردن ذرات زیر ۶۳ میکرون و آماده‌سازی خاک‌های سطحی به روش هضم اسیدی، غلظت کل فلزات سرب، روی، آهن، منگنز، مس و کادمیوم اندازه‌گیری شد. همچنین میزان مواد آلی و کربنات در خاک‌های مورد مطالعه با روش‌های احتراق خشک تعیین گردید. جهت ارزیابی میزان آلودگی در اطراف کارخانه و روستای مجاور از شاخص‌های قابل اعتماد سنجش آلودگی از قبیل شاخص‌های ضریب غنی‌سازی، انباشت ژئوشیمیایی، درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک استفاده شد. تحلیل آماری داده‌ها به کمک آنالیز خوشه‌ای و جدول ضریب همبستگی انجام گرفت. به علاوه برای پهنه‌بندی کیفی توزیع مکانی فلزات در محدوده مورد بررسی از روش کریجینگ معمولی استفاده گردید. خاک‌های اطراف کارخانه به شدت به فلزات سرب، روی و کادمیوم آلوده بودند و در روستای مجاور کارخانه هر چند میزان آلودگی نسبت به محدوده اطراف کارخانه کاهش یافت ولی خاک‌های سطحی آن همچنان نسبت به فلزات سرب، روی و کادمیوم آلودگی داشتند. بر اساس نتایج جدول ضریب همبستگی و آنالیز خوشه‌ای، در اطراف کارخانه همبستگی سرب، روی و کادمیوم معنادار و بیش از ۰/۵ بوده و در یک خوشه قرار گرفتند و در روستای مجاور سرب، روی، کادمیوم و کربنات همبستگی در یک خوشه قرار گرفته و همبستگی معنا دار و بالای ۰/۵ داشتند.

### واژه‌های کلیدی

فلزات سنگین، کارخانه سرب و روی ایرانکوه، خاک‌های سطحی، شاخص‌های آلودگی، پهنه‌بندی کیفی

## ۱- مقدمه

تخریب خاک چه به واسطه فعالیت بشر و یا فرآیندهای طبیعی، گرچه پروسه‌ای تدریجی است اما اثرات آن درازمدت و در مقیاس عمر بشر غیر قابل برگشت است [۱]. مهمترین آلاینده های خاک شامل فلزات سنگین، بارش‌های اسیدی و مواد آلی هستند که از میان آن‌ها فلزات سنگین به دلیل خصوصیات همچون غیرقابل تجزیه بودن، سمی بودن، اثرات تجمعی و سرطان‌زایی بیشتر مورد توجه هستند [۲]. فلزات سنگین ممکن است از راه‌های مختلفی وارد بدن انسان شوند. به طور مثال استنشاق گرد و غبار و هوای آلوده، ورود مستقیم فلزات به خاکهای زراعی و مصرف عناصر سنگین توسط گیاهان که نهایتاً منجر به ورود این عناصر به زنجیره غذایی انسان می‌شوند. به همین علت آلودگی فلزات در رسوبات، خاک و آبهای زیرزمینی از بزرگترین نگرانی‌های محیط زیست و سلامت بشری به حساب می‌آیند [۳، ۴].

معدن‌کاری یکی از منابع بالقوه ورود فلزات سنگین به داخل محیط است. بهره‌برداری از ذخایر معدنی و یا فرآوری کاسنگ‌ها معمولاً با تولید حجم زیادی از باطله‌ها و یا پسماند همراه است. این مواد دارای غلظت بالایی از انواع فلزات سنگین هستند. افزایش غلظت فلزات سنگین ناشی از معدنکاری در خاک، می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری را بر سلامت انسان‌هایی که در معرض مستقیم و یا غیرمستقیم این مواد هستند، وارد سازد [۵].

در مطالعه‌ای که جهت ارزیابی آلودگی خاک کشاورزی و باطله‌ها به فلزات سنگین در معدن متروکه سرب و روی در منطقه متروکه کرکی<sup>۱</sup> در شمال یونان انجام شد، نمونه‌های باطله غلظت بسیار بالایی از مس، کادمیوم، سرب و روی را نشان دادند. نمونه‌های نزدیک به محدوده معدن دارای غلظت بالایی از فلزات سنگین بودند که نشان دهنده وابستگی آلودگی خاک به فعالیت‌های معدنکاری است [۶].

خاکهای اطراف معدن سرب و روی که در دره آکادیا<sup>۲</sup> در جنوب اسپانیای مرکزی واقع شده است، جهت تعیین میزان فلزات سنگین مورد ارزیابی قرار گرفتند. غلظت کل فلزات در ۶۰ نمونه خاک مزروعی، مرتعی و معدنی تعیین شد که مقادیر بالایی از غلظت سرب، روی و کادمیوم بدست آمد [۷].

در مطالعه‌ای که جهت ارزیابی بار آلودگی در آب، خاک و رسوبات متأثر از معدن سرب و روی کنگلجوجیل<sup>۳</sup> جمهوری کره صورت گرفته است، کانی‌های موجود در خاک آن منطقه شامل پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن، مالاکیت و گوتیت بودند. این مطالعه بیانگر این بود که فلزات سنگین سرب، روی، کادمیوم، آرسینک و استبنتیت در خاکهای سطحی اطراف محدوده معدنی دارای غلظت بالایی هستند [۸].

آلودگی عناصر سنگین در خاکها از طریق مقایسه غلظتهای کل عناصر سنگین در نمونه‌های توده‌ای خاک برداشت شده با استانداردها یا حدود بحرانی مقرر شده کیفیت خاک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۹]. بسیاری از مطالعات نشان داده است که غلظت عناصر فلزی در خاکها با کاهش اندازه ذرات آنها افزایش پیدا می‌کند زیرا ذرات ریزتر سطح ویژه بالاتری دارند و می‌توانند مقادیر بیشتری از فلزات سنگین را نگه دارند. یافته‌ها بیانگر این است که ذرات خاک در اندازه سیلت و کوچتر از آن، بسیار مستعد برای جدا شدن از توده خاک بوده و در نتیجه بسیار حساس به فرسایش بادی و انتقال و انتشار در راستای وزش بادهای غالب هستند. میزان فلزات جابجا شده از طریق ذرات کوچکتر از ۶۳ میکرون تقریباً معادل فلزات جابجا شده از طریق مواد معلق است [۱۰، ۱۱، ۱۲].

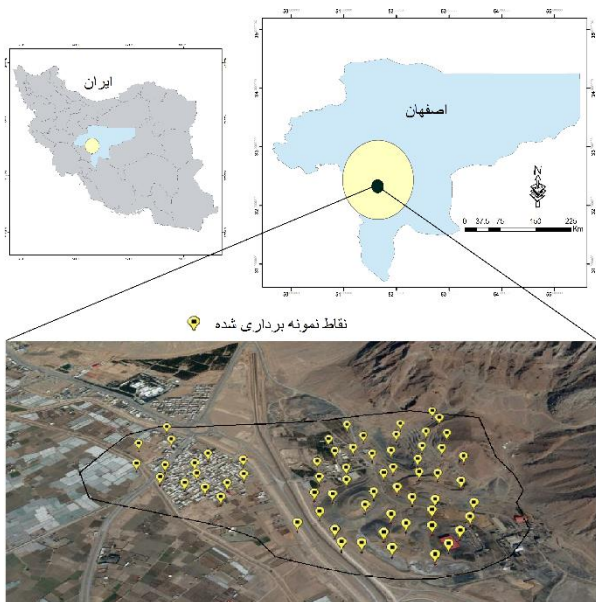
نمونه‌برداری همزمان از خاک‌های محدوده معدنی ایرانکوه و روستای مجاور آن و مقایسه آن‌ها و نیز اعمال شاخص‌های کیفی یکسان بر روی هر دو ناحیه به طور همزمان از رویکرد های جدید در این پژوهش است که تا به حال با این نوع نگاه بررسی نشده است. به علاوه با برداشت نمونه‌های زیاد در ۶۵ ایستگاه، بررسی شدت آلودگی با نگاه دقیق تری صورت گرفته است.

برداری به عمل آمد. نمونه‌های خاک به وسیله بیلچه‌های پلاستیکی جمع‌آوری و به کیسه‌های پلاستیکی منتقل شدند. موقعیت جغرافیایی معدن و ایستگاه‌های نمونه برداری شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

هدف اصلی پژوهش حاضر شناسایی فلزات خطرناک در خاک‌های سطحی اطراف کارخانه فرآوری ایرانکوه (محدوده معدنی) و روستای مجاور آن است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- زمین‌شناسی و موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه برداری.

در مرحله آماده‌سازی ذرات ریزدانه (کوچکتر از ۶۳ میکرون) با عبور نمونه‌ها از سرند ۶۳ جدا شدند و مطابق روش پیشنهادی هیروی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۱) جهت حذف رطوبت موجود در خاک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۴۲ درجه درون خشک‌کن قرار داده شدند.

### ۲-۳- آزمایش‌های تعیین میزان مواد آلی و کربنات

میزان مواد آلی هر یک از نمونه‌ها بر اساس درصد کاهش وزن هر نمونه در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و بر اساس رابطه زیر محاسبه شد [۱۶].

$$LOI = \frac{W_0 - W_{550}}{W_0} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $W_0$  و  $W_{550}$  به ترتیب وزن اولیه نمونه و وزن آن پس از حرارت در دمای ۵۵۰ درجه هستند. شایان ذکر است که مقدار یک گرم از هر ۶۵ نمونه توزین و حرارت دهی به وسیله

معدن سرب و روی ایرانکوه در ۲۰ کیلومتری جنوب غرب اصفهان در محدوده طول‌های جغرافیایی  $51^{\circ} 31'$  تا  $51^{\circ} 36'$  و در عرض‌های جغرافیایی  $32^{\circ} 28'$  تا  $32^{\circ} 37'$  قرار دارد. این محدوده به طور کلی طولی معادل ۲۵ کیلومتر و عرضی معادل ۳ کیلومتر را در بر می‌گیرد. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی انجام شده، توده معدنی ایرانکوه شامل کانی‌های اسمیت‌زونیت ( $ZnCO_3$ )، سروزیت ( $PbCO_3$ )، اسفالریت ( $ZnS$ ) و گالن ( $PbS$ ) است که

کانی‌های اصلی ذخیره را تشکیل می‌دهند [۱۳]. ذخیره این معدن حدود ۲۳ میلیون تن، با عیار ۷/۴ درصد وزنی روی و ۲/۴ درصد وزنی سرب است که از این نظر بزرگترین معدن سرب و روی ایران محسوب می‌شود. استخراج سالیانه از این معدن نیز حدود ۳۵۸ هزار تن است که به شکل روباز استخراج شده و با تولید حجم زیادی از مواد باطله (شامل باطله معدنی و باطله‌های فرآوری) همراه است [۱۴]. متوسط میزان بارندگی در طی یک دوره سی و شش ساله در این منطقه حدود ۱۴۰ میلی‌متر است. همچنین جهت باد در منطقه مورد مطالعه، به صورت غربی و در اولویت دوم در جهت جنوب غربی می‌وزد. از دیدگاه اقلیمی نیز این منطقه نیمه‌خشک تا خشک به حساب می‌آید [۱۵].

### ۲-۲- نمونه برداری و آماده‌سازی

در زمستان ۹۴، تعداد ۶۵ ایستگاه که ۵۰ ایستگاه واقع در محدوده معدن سرب و روی ایرانکوه و اطراف کارخانه فرآوری و ۱۵ ایستگاه خارج از معدن و در روستای مجاور به آن جای داشتند، به طور تصادفی انتخاب شدند و به کمک سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) از خاک‌های سطحی منطقه نمونه-

در بیشتر محاسبات مربوط به ضریب غنی سازی یک فلز مرجع و گاهی اوقات جهت بررسی دقیق‌تر دو فلز مرجع استفاده می‌شود. در این مطالعه از عناصر آهن و منگنز به عنوان مراجع زمینی استفاده شده است. علت انتخاب فلزات آهن و منگنز آن است که در مطالعه حاضر غلظت این فلزات در خاک‌های سطحی اطراف معدن اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه ضریب غنی‌شدگی عناصر خاک از رابطه ۳ استفاده می‌شود [۲۰].

$$EF = (C_{n(\text{sample})} / C_{\text{ref}(\text{sample})}) / (B_{n(\text{background})} / B_{\text{ref}(\text{background})}) \quad (3)$$

در رابطه ۳  $C_{n(\text{sample})}$  غلظت عنصر در نمونه خاک مورد مطالعه و  $C_{\text{ref}(\text{sample})}$  غلظت عنصر مرجع در نمونه خاک است.  $B_{n(\text{background})}$  و  $B_{\text{ref}(\text{background})}$  نیز به ترتیب غلظت فلز مرجع در نمونه و غلظت عنصر مرجع در پوسته زمین را نشان می‌دهد.

در طبقه‌بندی شاخص غنی‌سازی (EF)، در صورتی که شاخص غنی‌سازی کمتر از یک معادل عدم غنی‌شدگی، بین ۱ تا ۳ معادل غنی‌شدگی کم، بین ۳ تا ۵ غنی‌شدگی متوسط، بین ۵ تا ۱۰ غنی‌شدگی زیاد، بین ۱۰ تا ۲۵ غنی‌شدگی بسیار شدید و بالای ۵۰ معادل غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید است [۲۱].

#### ۲-۵-۲- شاخص انباشت ژئوشیمیایی (Igeo)

به منظور محاسبه شدت آلودگی رسوبات با استفاده از شاخص ژئوشیمیایی از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [(C_n / (1.5 \times B_n))] \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $I_{\text{geo}}$  برابر شاخص انباشت ژئوشیمیایی،  $C_n$  برابر غلظت ماده آلاینده در خاک با قطر کمتر از ۶۳ میکرون بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم،  $B_n$  غلظت ماده آلاینده در نمونه مرجع و ضریب ۱/۵ به منظور تصحیح غلظت اولیه خاک به دلیل تأثیر عوامل زمینی اعمال شده است. طبقه‌بندی کیفیت خاک‌ها

کوره انجام شد. میزان کربنات هر یک از نمونه‌ها بر اساس روش پیشنهادی توسط هیری و همکاران (۲۰۰۱) مطابق رابطه ۲ ارزیابی شد.

$$\text{Carbonate} = (1.36) (W_{550} - W_{950} / W_0) \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $W_0$ ،  $W_{550}$  و  $W_{950}$  به ترتیب برابر وزن اولیه و وزن پس از حرارت در دمای ۵۵۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد هستند [۱۷]. در این روش نیز همانند آزمایش تعیین مواد آلی، مقدار یک گرم از هر نمونه برای این آزمایش انتخاب و احتراق خشک نمونه‌ها با کوره انجام شد.

#### ۲-۴- آزمایش‌های تعیین غلظت کل فلزات

برای تعیین غلظت کل فلزات ابتدا یک گرم از هر نمونه توزین شد. سپس میزان ۱۰ سی‌سی تیزاب (اسید نیتریک و اسید کلریدریک به نسبت ۱ به ۳) به هر یک از نمونه‌های خشک شده افزوده شد و نمونه‌ها در حمام شنی و دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در مرحله بعد ۵ سی‌سی اسیدپرکلریک به نمونه‌ها افزوده شد و نمونه‌ها تا زمان خروج دود سفید رنگ در حمام شنی باقی ماندند. پس از طی مراحل فوق، نمونه‌ها از کاغذصافی عبور داده شدند و نمونه‌ها با رقیق کردن به حجم ۱۰۰ سی‌سی رسانده شدند [۱۸]. در مرحله آخر برای تعیین غلظت فلزات، از دستگاه جذب اتمی (مدل Buck Scientific 210vGP) استفاده شد.

#### ۲-۵- معرفی برخی از شاخص‌های سنجش آلودگی فلزات سنگین

##### ۲-۵-۱- ضریب غنی‌شدگی

یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی اثرات انسانزاد بر روی خاک، محاسبه ضریب غنی‌شدگی (EF) برای غلظتهای بالاتر از حد زمینه فلزات است. روش ضریب غنی‌سازی، مقدار فلز اندازه‌گیری شده را با توجه به فلز مرجع نمونه مانند آهن، اسکندیم، تیتان، منگنز یا آلومینیم از لحاظ مقدار غنی‌شدگی بررسی می‌کند [۱۹].

$$RI = \sum_{i=1}^m Er \quad (7)$$

$$Er = Tr \times Cf \quad (8)$$

$$Cf = Cs/Cn \quad (9)$$

در روابط بالا RI شاخص ریسک اکولوژیک کل،  $E_r$  مقدار ریسک اکولوژیک هر یک از عناصر،  $C_s$  مقدار غلظت عناصر در نمونه،  $C_n$  مقدار غلظت عنصر در زمینه و  $T_r$  میزان سمیت پیشنهاد شده از سوی هاگانسون برای هر یک از فلزات است. مقادیر  $T_r$  توصیه شده بر اساس هاگانسون برای فلزات کادمیوم، مس، سرب و روی به ترتیب برابر ۳۰، ۵، ۵ و ۱ هستند. بر اساس طبقه‌بندی ریسک اکولوژیک در صورتیکه مقدار ریسک اکولوژیک (RI) کمتر از ۱۵۰ باشد، ریسک اکولوژیکی کم، بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ ریسک اکولوژیکی متوسط، بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ ریسک اکولوژیکی قابل ملاحظه و بیش از ۶۰۰ ریسک اکولوژیکی زیاد است [۲۲].

#### ۲-۵-۶- تحلیل آماری با استفاده از جدول ضریب همبستگی آنالیز خوشه‌ای

مقادیر جدول ضریب همبستگی بین منفی یک تا یک است. هر چه عدد ارتباط بین دو متغیر به یک نزدیک‌تر باشد، آن دو متغیر همبستگی مستقیم بیشتری دارند و در صورتی که عدد بین آن‌ها به سمت منفی یک متمایل باشد ارتباط معکوس متغیرها بیشتر است. عدد صفر به این معناست که متغیرها با هم ارتباطی ندارند.

آنالیز خوشه‌ای یکی از روش‌های آماری چندمتغیره است که هدف اولیه آن دسته‌بندی متغیرها بر مبنای خصوصیات و شباهت آن‌هاست. آنالیز خوشه‌ای اهداف و نتایج را خوشه‌بندی می‌کند و زمانیکه برخی از متغیرها یا گروه‌ها ویژگی‌های مشابهی را نشان دهند، در یک خوشه قرار می‌گیرند. تحلیل نتایج خروجی آنالیز خوشه‌ای می‌تواند همگنی و همسانی قوی خارج از خوشه‌ها را نشان دهد. آنالیز خوشه‌ای مرتبه‌ای روشی متداول است که بر پایه درک مستقیم شباهت

بر اساس شاخص انباشت ژئوشیمیایی ارائه شده توسط مولر بدین صورت است که چنانچه شاخص انباشت ژئوشیمیایی کمتر از صفر باشد، وضعیت آلودگی خاک غیرآلوده (درجه آلودگی صفر)، بین صفر تا یک در وضعیت غیرآلوده تا آلودگی متوسط (درجه آلودگی یک)، بین یک تا دو در وضعیت آلودگی متوسط (درجه آلودگی ۲)، بین دو تا سه در وضعیت آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد (درجه آلودگی ۳)، بین سه تا چهار در وضعیت آلودگی زیاد (درجه آلودگی ۴)، بین ۴ تا ۵ در وضعیت آلودگی زیاد تا به شدت آلوده (درجه آلودگی ۵) و بیشتر از ۵ در وضعیت آلودگی به شدت آلوده قرار دارد [۲۲].

#### ۲-۵-۳- درجه آلودگی اصلاح شده

ابراهیم<sup>۵</sup> (۲۰۰۵) شاخص ارائه شده از سوی هاگانسون<sup>۶</sup> را به صورت زیر تعریف کرد:

$$mCd = \frac{\sum_{i=1}^n C_f^i}{n} \quad (5)$$

$$C_f = M_x / M_b \quad (6)$$

در رابطه ۵ و ۶  $M_x$  و  $M_b$  به ترتیب غلظت عنصر در سطح خاک و غلظت عنصر در زمینه هستند. در این رابطه  $n$  برابر تعداد عناصر آنالیز شده و  $i$  نشان دهنده  $i$  امین عنصر یا آلاینده است.

در طبقه‌بندی وضعیت آلودگی بر اساس درجه آلودگی اصلاح شده، در صورتی که درجه آلودگی اصلاح شده ( $mCd$ ) کمتر از ۱/۵ باشد، وضعیت آلودگی خاک ناچیز تا بسیار کم، بین ۱/۵ تا ۲ آلودگی کم، بین ۲ تا ۴ آلودگی متوسط، ۴ تا ۸ آلودگی شدید، ۸ تا ۱۶ آلودگی بسیار شدید، ۱۶ تا ۳۲ آلودگی بی نهایت و بیش از ۳۲ آلودگی در وضعیت بسیار شدید قرار دارد [۲۳].

#### ۲-۵-۴- شاخص ریسک اکولوژیک

هاگانسون شاخص ریسک اکولوژیک را در سال ۱۹۸۰ بر اساس نتایج مطالعه روی آلودگی رسوبات سطحی تعدادی از دریاچه های سوئد ارائه کرد. این شاخص به صورت زیر است.

رفتاری بین متغیرها استوار است. اغلب نتایج این تحلیل با استفاده از نمودار درختی ارائه می‌شود [۲۴،۲۵].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج غلظت کل فلزات، میزان مواد آلی و کربنات

جدول ۱ نتایج مربوط به قرائت غلظتهای فلزات سنگین و میزان مواد آلی و کربنات در ۵۰ ایستگاه برداشت شده را که طبق روشهای بیان شده در توضیحات پیشین بدست آمدند، نشان می‌دهد. نتایج ۵۰ ایستگاه اول بیانگر این است که مقدار بعضی از فلزات از میزان موجود در پوسته زمین و میانگین رسوبات جهانی کمتر است و در بعضی به طور چشمگیری بیشتر است. مقدار فلزات آهن و مس از مقادیر موجود در پوسته زمین و میانگین جهانی رسوبات کمتر است. میانگین مقدار آهن گرچه از پوسته زمین و میانگین رسوبات جهانی آن اندکی کمتر است ولی مقدار بیشینه آن از آنها بیشتر است. در مورد مس میانگین نتایج بدست آمده در محدوده اول اندکی از میانگین جهانی رسوبات کمتر است و احتمال این که خاک به این فلز آلوده باشد کمتر است. در عوض مقادیر فلزات سرب، روی، کادمیوم و منگنز از مقادیر پوسته زمین و میانگین رسوبات آنها بیشتر است. مقدار

فلز روی در محدوده اطراف کارخانه فرآوری بیش از صد برابر مقادیر موجود آن در پوسته زمین و میانگین جهانی رسوبات است و پتانسیل آلودگی خاک به این فلز را نشان می‌دهد. همچنین میانگین مقدار کادمیوم که فلزی سمی و خطرناک است به مراتب از پوسته زمین و میانگین مقادیر آنها در رسوبات جهانی بیشتر است که احتمال بالای آلودگی خاک‌های منطقه به فلز کادمیوم را نشان می‌دهد.

جدول ۲ که نتایج آن مربوط به ۱۵ ایستگاه روستای مجاور به معدن است، نشانگر این است که مقادیر میانگین فلزات سرب، روی و کادمیوم به مراتب کمتر از مقادیر آنها در محدوده اطراف کارخانه فرآوری است. با این وجود اعداد بدست آمده برای این فلزات باز هم از پوسته زمین و میانگین جهانی رسوبات بیشتر است که نشان می‌دهد در این قسمت نیز پتانسیل آلودگی خاک به فلزات سرب، روی و کادمیوم وجود دارد. به نظر می‌رسد که اعداد بدست آمده برای مس، آهن و منگنز در این محدوده تفاوت معناداری با محدوده اول نداشته باشند. میانگین مقدار مس در این محدوده نیز کمتر از میانگین جهانی رسوبات و پوسته زمین است و به نظر می‌رسد این فلز در روستای مجاور آلودگی چندانی ایجاد نمی‌کند.

جدول ۱: مقادیر میانگین، بیشینه، کمینه، انحراف معیار غلظت کل فلزات سنگین و میزان مواد آلی (LOI) و کربنات آن‌ها در ۵۰ ایستگاه برداشت شده از خاک‌های سطحی اطراف کارخانه فرآوری ایرانکوه

متغیرها	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	میانگین جهانی رسوبات	میانگین پوسته زمین
Cu(ppm)	۳۳/۴	۱۷/۳	۵۶/۱	۷/۱	۳۳	۵۰
Zn(ppm)	۱۰۳۵	۱۱۹	۲۹۵۰	۵۵۸/۰۱	۹۵	۷۵
Pb(ppm)	۲۸۱/۷	۶۹	۵۴۷	۱۱۵/۵۸	۱۹	۱۴
Cd(ppm)	۲/۵۳	۰/۸	۶/۵۵	۱/۱۲	۰/۱۷	۰/۲
Mn(ppm)	۱۲۱۲/۱	۶۳۰	۱۷۵۰	۲۵۴/۶	۷۷۰	۹۵۰
Fe(ppm)	۴۰۸۴۳/۲	۲۱۰۰۰	۶۳۴۰۰	۸۰۲۸/۷	۴۱۰۰۰	۴۱۰۰۰
LOI	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	۰/۰۶۱	۰/۰۱۱	---	---
Carbonates	۰/۰۵۴	۱/۰۲۹	۰/۰۸۶	۰/۰۱۳	---	---

جدول ۲: مقادیر میانگین، بیشینه، کمینه، انحراف معیار غلظت کل فلزات سنگین و میزان مواد آلی (LOI) و کربنات آن‌ها در ۱۵ ایستگاه برداشت شده از خاک‌های سطحی روستای مجاور معدن ایرانکوه

متغیرها	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	میانگین جهانی رسوبات	میانگین پوسته زمین
Cu(ppm)	۲۹/۷۹	۱۵/۹	۳۹/۱	۶/۴	۳۳	۵۰
Zn(ppm)	۱۲۹/۵	۹۳	۱۷۸	۲۰/۷	۹۵	۷۵
Pb(ppm)	۲۴/۵	۱۲	۴۴	۸/۰۳	۱۹	۱۴
Cd(ppm)	۰/۳۸	۰/۱۱	۰/۹۶	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۲
Mn(ppm)	۱۱۷۹/۳	۶۲۲	۱۴۶۵	۲۲۵/۹	۷۷۰	۹۵۰
Fe(ppm)	۳۹۴۹۷/۵	۲۵۴۰۰	۶۰۴۸۰	۷۸۱۶/۶	۴۱۰۰۰	۴۱۰۰۰
LOI	۱/۰۳۱	۰/۰۱۷	۰/۰۵۶	۰/۰۱۲	---	---
Carbonates	۰/۰۵	۰/۰۳۴	۰/۰۷۷	۰/۰۱۱	---	---

### ۳-۲- پهنه‌بندی توزیع فلزات سنگین

پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های غلظت عناصر سنگین، یکی از مراحل مهم و اولیه در راستای تصمیم‌گیری برای جداسازی محدوده‌های آلوده یا تعیین محدوده‌های مناسب است تا اقدامات حفاظتی و یا پیشگیرانه بعدی به منظور کنترل و یا دفع آلودگی صورت گیرد [26]. در شکل ۲ پهنه‌بندی توزیع فلزات سرب، روی، کادمیوم، آهن، منگنز و مس در خاک‌های سطحی اطراف کارخانه فرآوری باما و روستای مجاور محدوده معدن که در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، ارائه شده است. پهنه‌بندی هر فلز در واقع چگونگی توزیع مکانی آن فلز در محدوده مورد بررسی را نشان می‌دهد. نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از نرم افزار ArcGIS و با روش کریجینگ معمولی انجام شده است. شکل ۲ تفاوت چشمگیر و معنادار غلظت فلزات سرب، روی و کادمیوم در محدوده‌های اطراف به کارخانه فرآوری ایرانکوه با روستای مجاور را نشان می‌دهد. بالا بودن غلظت این عناصر در محدوده معدن احتمالاً به خاطر غلظت بالای این فلزات در سنگ‌های میزبان محدوده معدنی است که با دور شدن از محدوده معدنی غلظت فلزات کاهش یافته است. در واقع چون ۵۰ نمونه اطراف کارخانه فرآوری حاوی ذرات باطله معدنی بودند که در محوطه معدن و اطراف کارخانه فرآوری ریخته می‌شوند، عملیات تغلیظ و فرآوری بر بالا بودن غلظت فلزات سرب، روی و کادمیوم در این محدوده می‌تواند تاثیرگذار باشد. پراکنش فلز مس چه در محدوده اطراف کارخانه و چه در روستای مجاور تفاوت محسوسی ندارد و حاکی از غلظت پایین این فلز در محدوده‌های اندازه‌گیری شده است. علت آن می‌تواند به خاطر عدم وجود کانی‌های مس در سنگ‌های میزبان منطقه باشد. مقادیر فلزات آهن و منگنز که در این پژوهش به عنوان شاخص استفاده شده‌اند، تفاوت معناداری با مقادیرشان در پوسته زمین ندارند.

### ۳-۳- نتایج شاخص انباشت ژئوشیمیایی (Igeo)

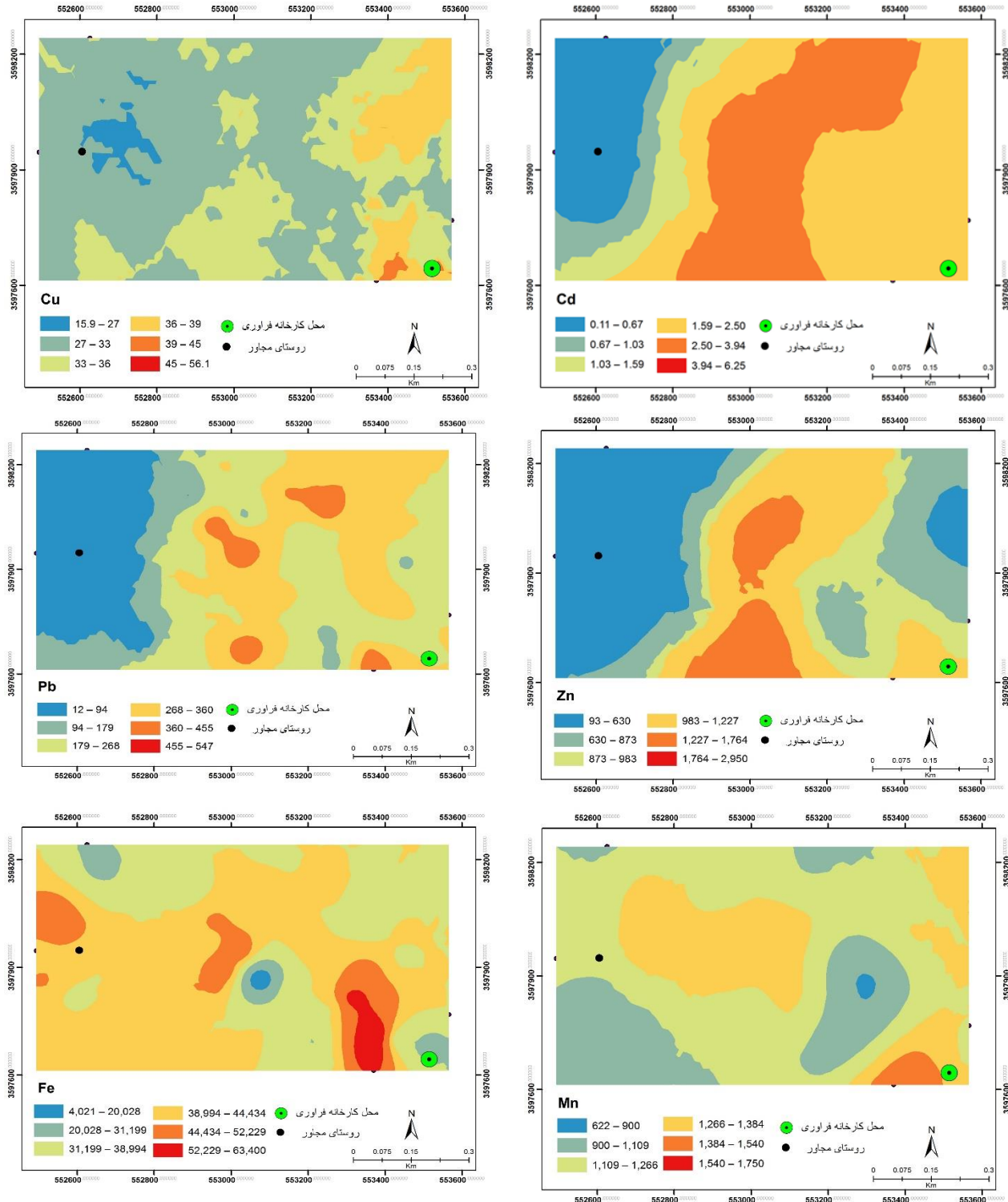
شکل ۳- الف، نتایج شاخص انباشت ژئوشیمیایی را در ۶۵ ایستگاه برداشت شده را نشان می‌دهد. بر اساس مطالب بیان‌شده در قسمت‌های پیشین فلزات کادمیوم و روی در محدوده ۵۰ نمونه خاک‌های سطحی اطراف کارخانه معدن دارای درجه آلودگی ۳ (آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد) و در روستای مجاور درجه آلودگی یک (غیر آلوده تا آلودگی متوسط) دارد. بر اساس این شاخص فلز سرب در ۵۰ نمونه اطراف کارخانه درجه آلودگی چهار (آلودگی زیاد) و در ۱۵ نمونه برداشت شده از روستای کنار معدن درجه آلودگی یک (غیر آلوده تا آلودگی متوسط) را به خود اختصاص داده است. مطابق این شاخص فلز مس در هر دو محدوده اطراف کارخانه و روستای کناری آن درجه آلودگی صفر دارد و غیرآلوده است.

### ۳-۴- نتایج شاخص غنی‌سازی

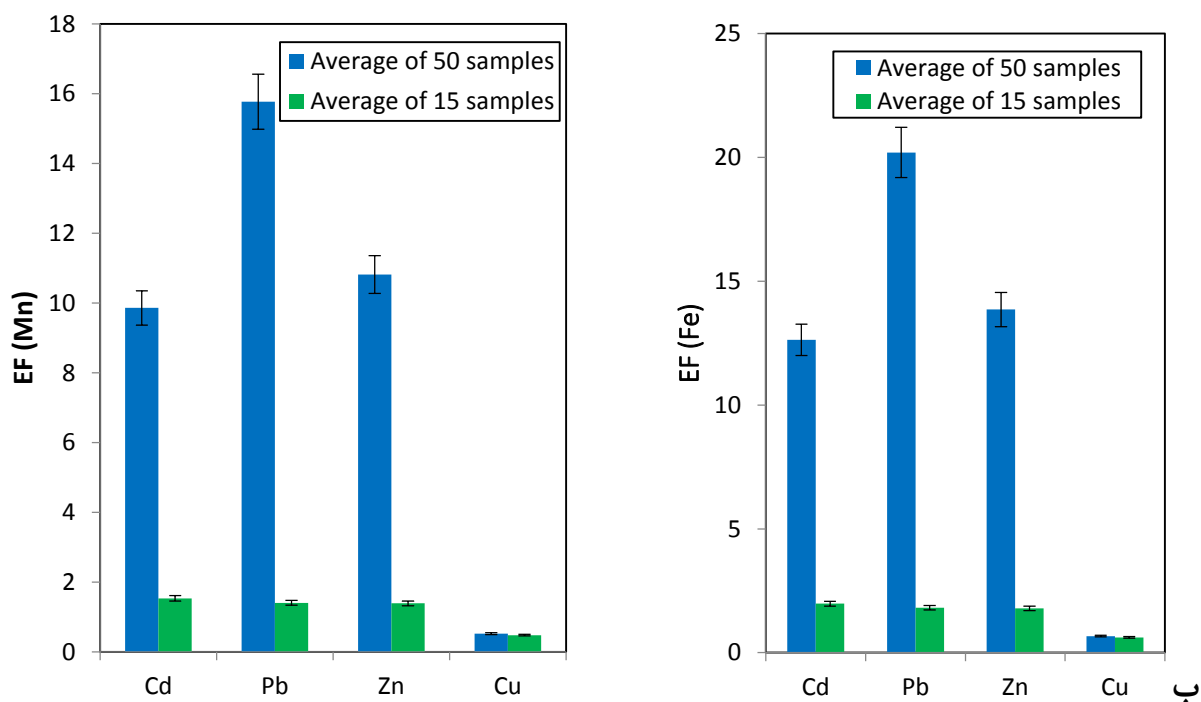
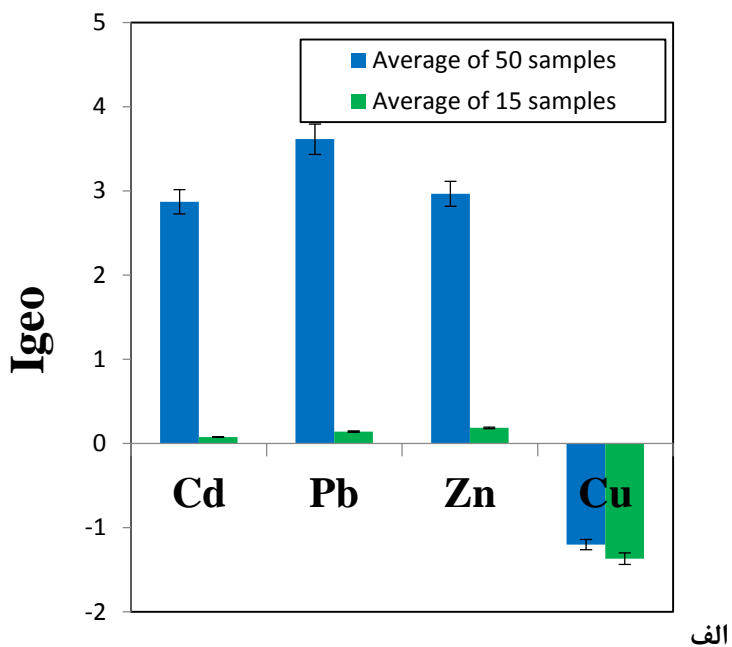
در شکل ۳-ب، نتایج شاخص غنی‌سازی در محدوده اطراف کارخانه ایرانکوه به رنگ آبی و در روستای مجاور به رنگ سبز مشخص است. برای ارزیابی و مقایسه، میانگین شاخص غنی‌سازی ۵۰ نمونه برداشت شده در اطراف کارخانه فرآوری و ۱۵ نمونه روستای مجاور به تفکیک و در دو حالت، یکی با در نظر گرفتن عنصر آهن و دیگری عنصر منگنز به‌عنوان مرجع زمینی برای چهار فلز مس، سرب، روی و کادمیوم ارائه شده است. بر اساس مطالب بیان‌شده در بخش‌های پیشین در حالت اول و با در نظر گرفتن آهن به‌عنوان مرجع زمینی میانگین شاخص غنی‌سازی فلزات کادمیوم، روی و سرب در اطراف کارخانه در محدوده غنی‌شدگی شدید و در روستای مجاور در محدوده غنی‌شدگی کم قرار دارند. در حالت دوم و با در نظر گرفتن منگنز به‌عنوان شاخص زمینی فلزات سرب و روی در اطراف کارخانه در محدوده غنی‌شدگی شدید و در خارج کارخانه در محدوده غنی‌شدگی کم قرار دارند و فلز کادمیوم در اطراف کارخانه در محدوده غنی‌شدگی بیش از متوسط و در روستای کناری در محدوده غنی‌شدگی کم قرار دارد. شایان ذکر است که فلز مس



با هر دو مرجع زمینی هم در خاک‌های سطحی اطراف کارخانه و هم در روستای مجاور بدون غنی‌شدگی هستند.



شکل ۲: پهنه‌بندی کیفی چگونگی توزیع فلزات کادمیوم، مس، روی، سرب، منگنز و آهن در محدوده مورد مطالعه شده.



شکل ۳: نتایج میانگین شاخص‌های انباشت ژئوشیمیایی (الف) و غنی‌سازی بر اساس انتخاب منگنز و آهن (ب) به‌عنوان مراجع در نمونه‌های خاک سطحی

### ۵-۳ - نتایج تحلیل آماری

جدول‌های ۳ و ۴ نتایج حاصل از ضریب همبستگی به ترتیب در محدوده اطراف کارخانه فرآوری و روستای مجاور را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴ نتایج آنالیز خوشه‌ای برای متغیرهای اندازه‌گیری شده هم در ایستگاه‌های اطراف کارخانه و هم ایستگاه‌های روستای مجاور به تفکیک نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که همبستگی بالا بین فلزات سرب - روی - کادمیوم در محدوده اطراف کارخانه فرآوری وجود دارد که این فلزات را در یک خوشه قرار داده است و بیانگر این است که این فلزات به احتمال زیاد منشأ و ساختگاه مشابهی دارند. همچنین یافته‌ها بیانگر این است که در ۱۵ ایستگاه مجاور روستا کربنات- سرب- روی- کادمیوم همبستگی قابل توجهی دارند که همبستگی کربنات با فلزات مذکور نشان می‌دهد که احتمالاً پیوندهای بین خاکهای سطحی در ایستگاه‌های مجاور روستا سختی کمتری دارند و به احتمال زیاد دسترسی زیستی در ایستگاه‌های مجاور به روستا بیشتر است. به عبارت دیگر احتمالاً در خاکهای مجاور روستا، فلزات در پیوندهای کربنات قرار دارند که احتمال آزادسازی مجدد آنها تحت تغییر شرایط را بیشتر خواهد کرد.

### ۶-۳- نتایج شاخص‌های ریسک اکولوژیک و درجه آلودگی اصلاح شده

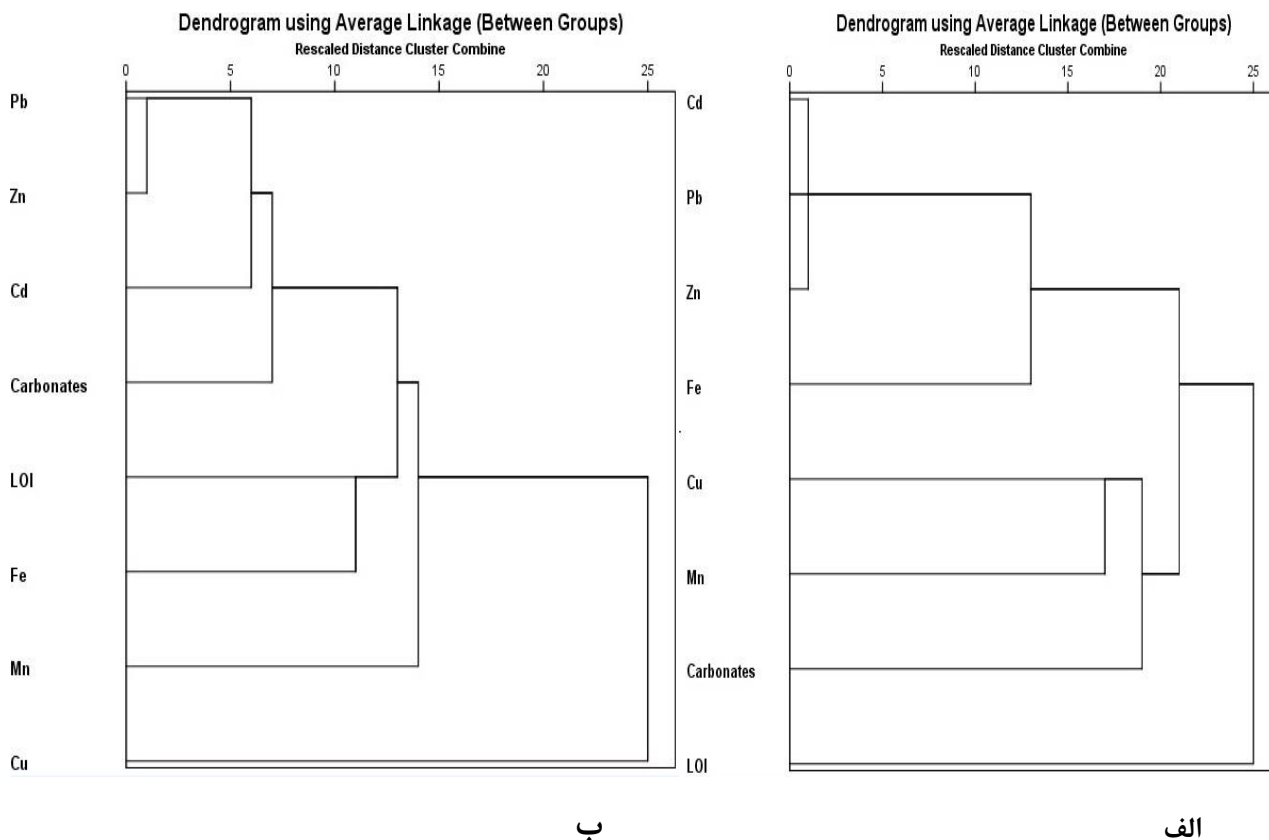
در شکل ۴ پهنه‌بندی کیفی خاکهای سطحی اطراف کارخانه سرب و روی ایرانکوه و روستای مجاور به آن با استفاده از شاخص‌های ریسک اکولوژیک و درجه آلودگی اصلاح شده با استفاده از نرم افزار ArcGIS و به روش کریجینگ معمولی انجام شده است. تجمیع فلزات در محاسبه این دو شاخص از مهمترین مزایای استفاده از شاخص‌های درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک است که ممکن است با کاهش حجم داده‌های نهایی، تفسیر و ارزیابی آلودگی فلزات سنگین توسط این شاخص‌های تجمعی با سهولت بیشتری انجام شود. بر اساس توضیحات پیشین، میانگین ۵۰ ایستگاه اطراف کارخانه در وضعیت آلودگی بسیار شدید و در ۱۵ ایستگاه روستای مجاور در وضعیت آلودگی کم قرار گرفته است. هم‌چنین بر اساس مطالب بیان شده شاخص ریسک اکولوژیک نشان می‌دهد که نمونه‌های اطراف کارخانه فرآوری در وضعیت ریسک اکولوژیک بسیار زیاد و در ۱۵ نمونه روستای کنار معدن ایرانکوه در وضعیت ریسک اکولوژیک متوسط است.

جدول ۳: مقادیر ضریب همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده در ۵۰ ایستگاه اطراف کارخانه فرآوری

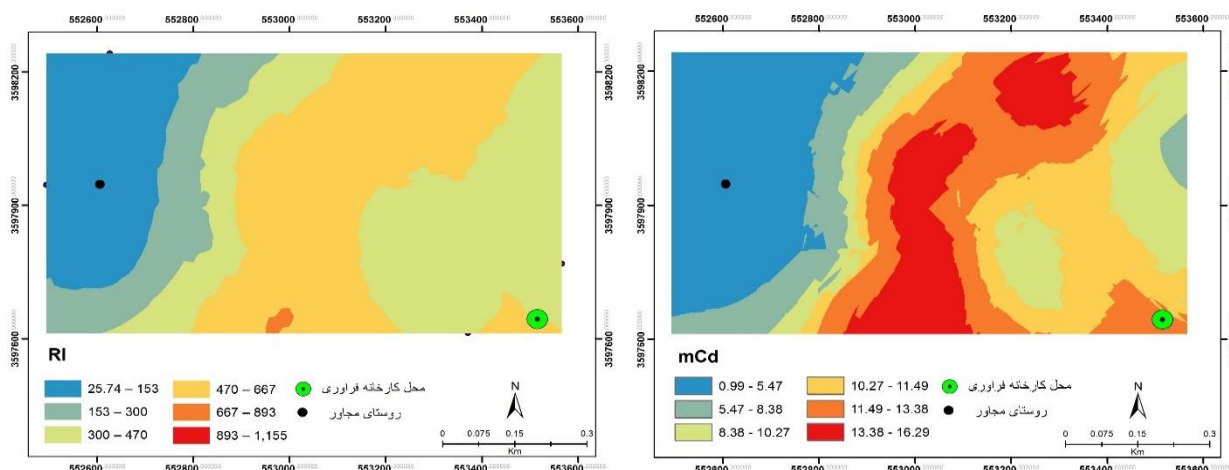
متغیرها	Pb	Cu	Fe	Mn	Cd	LOI	Zn	Carbonates
Pb	۱							
Cu	-۰/۴۷۴	۱						
Fe	۰/۳۳۳	۰/۲۵۶	۱					
Mn	۰/۳۳۵	۰/۳۳۹	-۰/۰۵	۱				
Cd	۰/۵۱۰	*-۰/۶۴۳	۰/۳۴۳	۰/۶۵	۱			
LOI	۰/۴۶	۰/۱۴۳	۰/۳۵۷	۰/۲۵۸	۰/۴۲۳	۱		
Zn	**۰/۸۷۸	۰/۴۲۹	۰/۲۹۸	۰/۲۳۲	**۰/۶۴۴	۰/۹۰	۱	
Carbonates	*۰/۶۱۹	*-۰/۶۷۳	۰/۱۴۰	۰/۲۳۹	۰/۵۳۳	۰/۱۵۸	۰/۴۹۰	۱

جدول ۴: مقادیر ضریب همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده در ۱۵ ایستگاه روستای مجاور

متغیرها	Pb	Cu	Fe	Mn	Cd	LOI	Zn	Carbonates
Cu	-۰/۶۹	۱						
Fe	**۰/۴۰۱	-۰/۱۲۷	۱					
Mn	-۰/۲۱۱	-۰/۲۰۷	-۰/۵۵	۱				
Cd	**۰/۹۲۹	-۰/۴۵	**۰/۳۴۸	-۰/۱۳۵	۱			
LOI	-۰/۲۶۴	-۰/۲۷	-۰/۳۱۰	-۰/۱۱۴	-۰/۲۹۷	۱		
Zn	**۰/۸۸۵	-۰/۴۲۹	**۰/۳۸۲	-۰/۱۹۹	**۰/۹۱۶	-۰/۲۸۰	۱	
Carbonates	*۰/۶۳۰	*-۰/۴۳۵	-۰/۱۹۸	-۰/۱۶۰	-۰/۶۶	-۰/۱۶	-۰/۴۰	۱



شکل ۴: نتایج آنالیز خوشه‌ای در نمونه‌های خاک سطحی - شکل سمت راست مربوط به ۵۰ نمونه اطراف کارخانه (الف) و شکل سمت چپ مربوط به ۱۵ ایستگاه مجاور به روستا (ب)



شکل ۵: پهنه‌بندی شاخص‌های تجمیعی درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک در محدوده مورد بررسی

#### ۴- نتیجه گیری

دار و بالای ۰/۵ دارند که اضافه شدن کربنات به محدوده روستای کناری می‌تواند احتمال ضعیف شدن پیوند بین عناصر در خاک‌های سطحی این محدوده را بیان کند که این تضعیف می‌تواند امکان دسترسی زیستی خاک‌های روستا نسبت به محدوده معدنی را افزایش می‌شود.

#### مراجع

- [1] Massas I., Kalivas D., Ehaliotis C., and Gasparatos D. 2013. Total and available heavy metal concentrations in soils of the Thriassio plain (Greece) and assessment of soil pollution indexes. *Environmental Monitoring Assessment*, 185: 6751 - 6766.
- [2] Mico', C., L. Recatala', M. Peris, J. Sa'nchez. 2006. "Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis". *Chemosphere*. Vol. 65,863-872.
- [3] Jian-Min, Z., Zhi D., Mei\_Fang, C., Cang-Qiang, L., 2007" Soil heavy metal pollution around the Dabaoshan mine, Guangdong

در تحقیق حاضر، میزان مواد آلی، کربنات و غلظت کل فلزات در ۶۵ ایستگاه از خاک‌های سطحی اطراف کارخانه معدن سرب و روی ایرانکوه و روستای قرار گرفته در مجاورت این معدن مطالعه شد. برای سنجش وضعیت آلودگی در خاک‌های اطراف کارخانه و روستای مجاور و مقایسه آنها با یکدیگر، از شاخص‌های پرکاربرد و قابل اعتماد شامل شاخص غنی‌سازی، انباشت ژئوشیمیایی، و نیز شاخص‌های تجمعی درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک استفاده شد. همچنین برای پهنه‌بندی کیفی شاخص‌های تجمعی (درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک) و غلظت کل فلزات (مس، سرب، روی، کادمیوم، آهن و منگنز) با استفاده از نرم افزار Arc GIS و به روش کریجینگ معمولی استفاده شد و تحلیل‌های آماری به کمک جدول ضریب همبستگی و آنالیز خوشه‌ای صورت گرفت. از نتایج مهم این تحقیق شناسایی فلزات سرب، روی و کادمیوم به عنوان فلزات خطرناک با همبستگی معنادار و بالای ۰/۵ در محدوده معدنی بود. به علاوه علی‌رغم کاهش آلودگی در روستای مجاور، سرب-روی - کادمیوم- کربنات در این ناحیه با هم همبستگی معنا

in soil particle size relevant to soil ingestion by children. Appl. Geochem. 21: 1613-1624.

[10] Samara, C., and Voutsas, D. 2005. Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment. Chemosphere, 59: 1197-1206.

[11] Wang, X., Qin, Y., and Chen, Y. 2006. Heavy metals in urban roadside soils, part 1: effect of particle size fractions on heavy metals partitioning. Environ. Geol. 50: 1061-1066.

[12] Saeedi, M., Li, L.Y., Karbassi, A.R., Zanjani, A. 2013. Sorbed metals fractionation and risk assessment of release in river sediment and particulate matter, Environmental Monitoring and Assessment. 185: pp.1737-1754.

[۱۳] تیموری اصل، "بررسی رسوب شناسی و سنگ

شناسی نهشته‌های ژوراسیک و شورابه‌های حوضه‌ای

در شکل‌گیری کانسارهای منطقه ایرانکوه (جنوب غرب

اصفهان)»، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه

اصفهان ۱۳۸۹، صفحه ۹۸.

[۱۴] داودی فرد. م، "توزیع عناصر جزئی و گونه‌سازی

شیمیایی آن‌ها در خاک‌های اطراف معدن ایرانکوه،

جنوب غرب اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد،

دانشگاه صنعتی شاهرود"، ۱۳۹۲، صفحه ۱۲۶.

[۱۵] وب سایت "اداره کل هواشناسی استان اصفهان"

www.esfahanmet.ir (زمان دسترسی: ۲۵ تیر ۹۵ ساعت

۱۵:۳۰)

Province, China", Science Society of China, 17(5): 588-594.

[4] Rattan R, Datta S, Chhonkar P, Suribabu K, Singh by vegetable crops irrigated with waste water in south Tehran. Journal of Environmental Study. 2002;16(2):196-89 (in Persian).

[5] Ye, Z.H., Shu, W.S., Zhang, Z.Q., Lan, C.Y., Wong, M.H., "Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques", Chemosphere, Vol.47 (2002) pp 1103-1111.

[6] Nikolaidis, Ch., Zafiriadis, I., Mathioudakis, V. & Constantinidis, Th., 2010- Heavy metal pollution Associated with an abandoned Lead-Zinc mine in the Kirki Region, NE Greece, Bulletin of environmental contamination and toxicology 85, 3, 307-312.

[7] Ruiz, E., Azcarate, J. A., Rodriguez, L. & Rincon, J., 2009- Assessment of metal availability in soil from a Pb- Zn Mine site of south-Central Spain, Soil and Sediment Contamination 18, 619-641.

[8] Lee, Ch. H., 2003- Assessment of contamination load on water, soil and sediment affected by the Kongjujeil mine drainage, Republic of Korea, Environmental Geology 44, 501-515.

[9] Ljung, K., Selinus, O., Otabbong, E., and Berglund, M. 2006. Metal and arsenic distribution

river sediments. *Journal of Environmental Management*, 90, 3382–3390.

[22] Muller, v. 1979. *Geochemical index for pollution assessment in aquatic environment*. Springer verlag, N.Y.

[23]- Abraham, G.M.S. 2005. *Holocene sediments of Tamaki Estuary: Characterisation and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand*. Ph.D. thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 361p.

[24] Shrestha, S., & Kazama, F. 2007. *Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan*. *Environmental Modelling & Software*. 22: pp.464–47.

[25] Zhou, F., Liu, Y., & Guo, H. C. 2007. *Application of multivariate statistical methods to the water quality assessment of the watercourses in the north-western New Territories, Hong Kong*. *Environmental Monitoring and Assessment*. 132(1–3):pp.1–

[26] Chunfa, W., Jiaping, W., Yongming, L., Haibo, Z., and Ying, T. 2008. *Statistical and geo-statistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units*. *Geoderma*, 144: 171-179.

[16] Hakanson, L.: *An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach*, *Water Res.*, 1980, 14(8): 975–1001.

[17] Heiri, O., A. F. Lotter, and G. Lemcke. 2001. *Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results*. *Journal of Paleolimnology* 25 :101-110.

[۱۸] جمشیدی زنجانی، ا. سعیدی، م. ۱۳۹۲. «ارزیابی

آلودگی و پهنه‌بندی کیفی رسوبات سطحی تالاب انزلی

براساس نتایج شاخص‌های سنجش آلودگی فلزات

سنگین»، *محیط‌شناسی*، دوره سی و نهم، شماره ۴، صص

۱۷۰-۱۵۷.

[16] Hakanson, L.: *An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach*, *Water Res.*, 1980, 14(8): 975–1001.

[17] Heiri, O., A. F. Lotter, and G. Lemcke. 2001. *Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results*. *Journal of Paleolimnology* 25 :101-110.

[19] Ivan Muñoz, Mari'a Jose' Go'mez-Ramos, Ana Aguilera, Juan Francisco Garcia-Reyes, -Alba. 2009. *Chemical evaluation of contaminants in wastewater effluents and the environmental risk of reusing effluents in agriculture*. *Trends in Analytical Chemistry*.

[20] Mohammad A. H. Bhuiyana, Lutfar Parvez, M.A. Islam, Samuel B. Dampared, Shigeyuki Suzuki. (2010). *Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh*. *Journal of Hazardous Materials*, 173 . 384–392.

[21] Sakan, S.M., et al. 2009. *Assessment of heavy metal pollutants accumulation in the Tisza*

#### پی‌نوشت

<sup>1</sup> kirki

<sup>2</sup> Alcadia

<sup>3</sup> Kongjujeil

<sup>4</sup> Heiri

<sup>5</sup> Abraham

<sup>6</sup> Hakanson