

## غلظت و گونه‌سازی عناصر سنگین در خاک‌ها و گیاهان اطراف معدن مس ایجو (شمال غرب شهر بابک، استان کرمان)

عذرا اسدی کرم<sup>۱</sup> و افشین قشلاقی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲- دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

نویسنده مسئول: qishlaqi@shahroodut.ac.ir

دریافت: ۹۷/۵/۶ پذیرش: ۹۷/۹/۲۸

### چکیده

در این مطالعه غلظت و گونه‌سازی فلزات در خاک و هم‌چنین نمونه گیاه درمنه، در اطراف یک منطقه کانه‌زایی و دگرسانی (معدن مس پورفیری ایجو، استان کرمان)، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور تعداد ۳۴ نمونه خاک و ۸ نمونه گیاه درمنه، جمع‌آوری و به روش‌های استاندارد تجزیه شدند. هم‌چنین بر روی برخی از نمونه‌های خاک مطالعات گونه‌سازی انجام گرفت. نتایج نشان داد که غلظت فلز Cu در محدوده مربوط به زون دگرسانی پتاسیک (به طور میانگین ۴۵۷/۲۵ mg/kg) و عناصر Zn، Pb و As در محدوده مربوط به زون دگرسانی آرژلیک، بیش‌ترین غلظت و غنی‌شدگی را دارا هستند (به ترتیب ۱۳۷ mg/kg، ۵۸۰/۰۶ mg/kg و ۴۷/۰۶ mg/kg). نتایج محاسبه شاخص‌های ژئوشیمیایی نیز نشان داد که بیش‌ترین ضریب غنی‌شدگی و ضریب زمین‌انباشت مربوط به عناصر آرسنیک، سرب و روی در زون دگرسانی آرژلیک است و فلز مس نیز بالاترین ضرایب ژئوشیمیایی را در زون دگرسانی پتاسیک نشان می‌دهد. نتایج استخراج ترتیبی آشکار ساخت که فلزات مورد مطالعه، در فاز تبادل‌پذیر (۱/۸۹٪ از غلظت کل) کمترین غلظت را داشته و تمرکز بالایی در فاز باقی‌مانده دارند (۷۹/۷۰٪). بر اساس ارزیابی غلظت فلزات در گیاه درمنه و هم‌چنین محاسبه شاخص‌های بیوژئوشیمیایی مشخص شد که بالاترین ضریب انتقال متعلق به فلز Z و کمترین مقدار آن متعلق به فلز Cr است. هم‌چنین بالاترین ضریب زیست‌تمرکز، برای فلز Cu بدست آمد. این مطالعه به طور کلی نتیجه می‌گیرد که اگرچه منشأ بیش‌تر فلزات در خاک منطقه (در شرایط فعلی) طبیعی است؛ اما تشدید فعالیت‌های معدنکاری و استخراج کانسنگ در آینده می‌تواند باعث افزایش غلظت فلزات و یا دسترس‌پذیری آن‌ها در محیط خاک و گیاه شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، عناصر سنگین، گونه‌سازی، گیاه درمنه، معدن مس ایجو

### ۱- مقدمه

مس پورفیری، با توجه به عملکرد گسترده محلول‌های گرمایی، دارای زون‌های مختلف کانی‌سازی و آلتراسیون هستند و این کانه‌زایی‌ها و دگرسانی‌ها، جایگاه مناسبی برای تمرکز عناصر فلزی به ویژه عناصر سنگین محسوب می‌شوند (وورال، ۲۰۱۵).

اثرات زیست‌محیطی ناشی از حضور عناصر سنگین در خاک، تنها وابسته به غلظت کل آن‌ها نیست، بلکه به میزان تحرک و زیست‌دسترس‌پذیری آن‌ها (و جایگاه آن‌ها در اجزاء خاک)، نیز بستگی دارد که در نهایت بر آزاد شدن آن‌ها و ورود به دیگر اجزاء اکوسیستم، مانند آب، هوا و گیاهان اثر می‌گذارد (آبولینو و همکاران، ۲۰۰۵). بنابراین مدیریت خاک‌های آلوده در محیط‌های معدنی، نیاز به درک درستی از غلظت فلزات، شدت آلودگی، منشأ و گونه‌سازی فلزات در محیط خاک دارد.

خاک نقش حیاتی در اکوسیستم‌های طبیعی ایفا می‌کند و در حقیقت مخزن اصلی دریافت‌کننده فلزات (از منابع طبیعی یا انسان‌زاد) است. قطع نظر از منشأ، زمانی که فلزات در مقادیر بیش از حد مجاز وارد محیط خاک می‌شوند، می‌توانند باعث آلودگی خاک شوند و در این صورت این آلاینده‌ها به آسانی به سایر بخش‌های محیط (آب، گیاهان) و در نهایت به زنجیر غذایی انسان راه یابند. کانه‌زایی و دگرسانی‌ها از مهم‌ترین منابع تجمع طبیعی عناصر سنگین در خاک هستند. در چنین مناطقی استخراج و بهره‌برداری از معادن فلزی نیز، به دلیل قرار دادن کانی‌ها و سنگ‌های حاوی عناصر سنگین، در معرض فرسایش و هوازدگی بیش‌تر، باعث آلودگی بیش‌تر منابع خاک در مقیاس محلی یا منطقه‌ای می‌شود. معادن

۴۵'، ۳۱'، ۳۰' تا ۵'، ۳۳'، ۳۰' و عرض جغرافیایی شرقی ۱۰'، ۵۶'، ۵۴' تا ۳۰'، ۵۷'، ۵۴' و در مرکز نقشه چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ انار قرار دارد. از نظر زمین‌شناسی، ذخیره مس پورفیری ایجو در بخش جنوب‌غربی کمر بند آتشفشانی- نفوذی ارومیه - دختر و در شمال‌غربی کمر بند دهج - ساردوئیه واقع شده است. در منطقه مورد مطالعه، مجموعه آتشفشانی- آذرآواری شامل آندزیت- تراکی آندزیت، آگلومرا، توف، توفبرشی و آندزیت بازالت با سن نسبی ائوسن، وجود دارد (میرنژاد و همکاران، ۲۰۱۳). این مجموعه توسط یک توده نفوذی با سن نسبی الیگومیوسن قطع شده است. توده نفوذی مورد نظر دارای چندین فاز ماگمایی است که ترکیب آن‌ها از دیوریت تا کوارتز دیوریت متغیر است و به عنوان فازهای مولد دگرسانی- کانه‌زایی در معدن ایجو در نظر گرفته می‌شود. عمده کانه‌زایی در ارتباط با فاز کوارتز دیوریتی است. دایک‌های داسیتی و آندزیتی، دیوریتی و کوارتز دیوریتی و آندزیت- بازالتی نیز که عمدتاً دارای روند شمالی- جنوبی هستند، بعد از فاز اصلی کانی‌سازی جایگزین شده‌اند. در منطقه ایجو، انواع دگرسانی‌های شاخص کانسارهای مس پورفیری (پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک، پروپلیتیک) (شکل ۱) مشاهده می‌گردد (طالبی، ۱۳۸۴).

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور ارزیابی غلظت و توزیع عناصر سنگین در محدوده معدن مس ایجو، ۳۴ نمونه خاک و ۸ نمونه گیاه درمنه (*Artemisia sp*) برداشت شد (شکل ۱). نمونه‌های خاک از عمق نفوذ ریشه (۱۰-۲۵ سانتی‌متری) و به کمک بیلچه فولادی برداشت گردیدند. نمونه‌های خاک پس از برداشت، در یک محیط بسته و به دور از آلودگی خشک شدند و بعد از عبور از الک ۱۰ مش ( $< 2\text{mm}$ )، قسمتی از نمونه‌ها توسط هاون چینی تا حد ۲۰۰ مش ( $< 63\ \mu\text{m}$ ) پودر گردیدند. نمونه‌ها با استفاده از روش شیمی تر و توسط دستگاه ICP-OES، مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، نقش مهمی در غلظت فلزات، تمرکز و تحرک آن‌ها در خاک ایفا می‌کنند بنابراین در این مطالعه ۳ پارامتر pH، ماده آلی و بافت خاک به کمک روش‌های استاندارد

روش استخراج ترتیبی یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای ارزیابی تحرک عناصر سنگین در خاک‌هاست. این روش اطلاعات کافی در مورد توزیع عناصر در میان بخش‌های مختلف خاک را ارائه می‌دهد و کمک زیادی به پیش‌بینی اثرات بالقوه ناشی از آلودگی فلزی در خاک می‌کند (غیورانه و قشلاقی، ۲۰۱۷). فلزات در خاک معمولاً در فازهای تبادل پذیر (فاز اول)، متصل به کربنات‌ها (فاز دوم)، فاز متصل به اکسیدهای آهن و منگنز (فاز سوم)، فاز متصل به ماده آلی (فاز چهارم) و بالاخره فاز باقی‌مانده یا بازماندی (فاز پنجم) حضور دارند. از میان این فازها، تنها فلزات موجود در فاز انحلال‌پذیر/تبادل‌پذیر، در دسترس گیاه قرار می‌گیرد و در فاز آخر یا فاز بازماندی فلزات دارای کمترین دسترس‌پذیری هستند. همچنین فلزات که در فازهای غیر بازماندی (فازهای اول، دوم و سوم و چهارم) قرار می‌گیرند معمولاً دارای منشأ انسان‌زاد و فلزات همراه با فاز چهارم دارای منشأ زمین‌زاد هستند. بنابراین با تعیین گونه‌ها یا فازهای مختلف فلزات در خاک علاوه بر ارزیابی دسترس‌پذیری آن‌ها برای گیاهان می‌توان منشأ فلزات را نیز تا حدی مشخص کرد (منگ و همکاران، ۲۰۱۸).

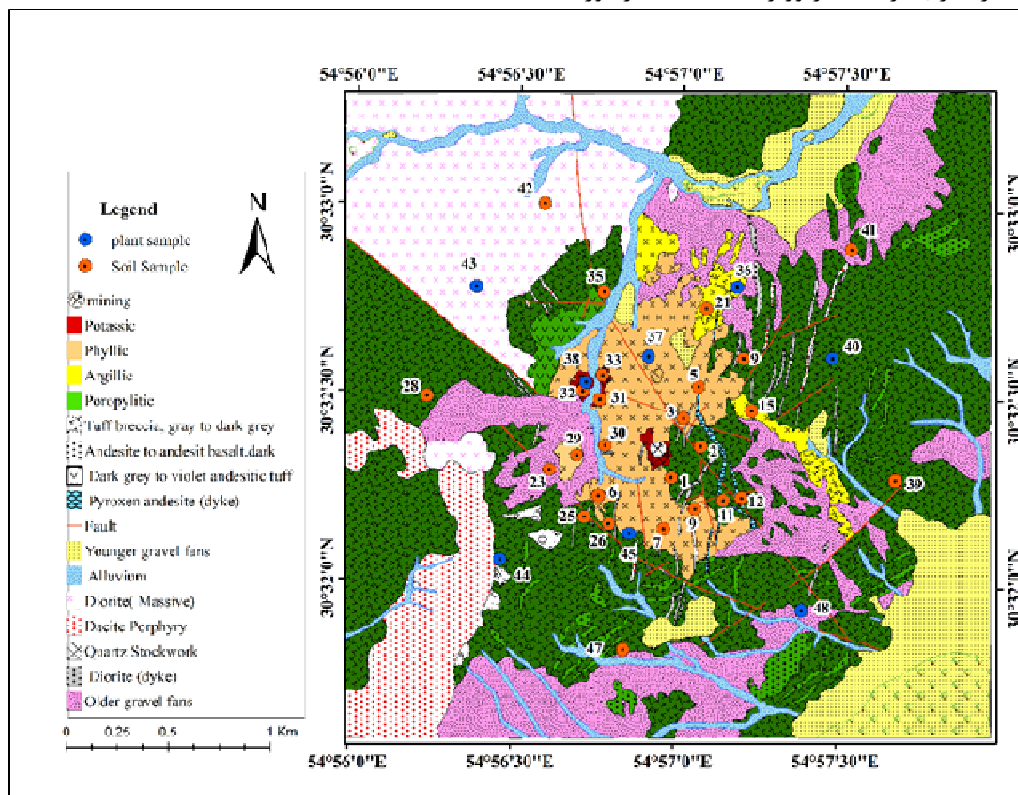
مطالعه حاضر با هدف تعیین غلظت و گونه‌سازی فلزات در خاک‌های منطقه معدنی ایجو (شمال‌غرب شهر بابک) انجام شده است. معدن ایجو یک معدن مس پورفیری است که در آن کانه‌زایی و دگرسانی‌های شاخص معادن مس پورفیری، به شکل گسترده‌ای وجود دارند. در این منطقه، معدنکاری هنوز در مقیاس وسیع آغاز نشده است بنابراین می‌توان در آن تأثیر گرمخانه‌های دگرسانی را بر پراکنش عناصر مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش با تعیین غلظت کل و گونه‌سازی عناصر سنگین در خاک‌های و گیاهان اطراف معدن مس ایجو، کیفیت خاک منطقه، در هر یک از زون‌های دگرسانی مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان زیست‌دسترس‌پذیری فلزات برای گیاهان بومی (درمنه دشتی) تعیین می‌گردد.

#### ۲- منطقه مورد مطالعه

معدن مس ایجو، در استان کرمان، در ۷۲ کیلومتری شمال‌غربی شهرستان شهر بابک و ۱۴۰ کیلومتری غرب - شمال‌غربی معدن مس سرچشمه قرار گرفته است. از نظر جغرافیایی این معدن، در عرض جغرافیایی شمالی

نمونه‌های گیاه نیز در ابتدا اندام‌های روزمینی (ساقه و برگ) و زیرزمینی (ریشه) آن‌ها جدا شده و پس از شستشو در آب مقطر به کمک هاون دستی پودر گردیدند. نمونه‌های پودر شده سپس در کوره گرافیکی و در دمای حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تبدیل به خاکستر شده و پس از هضم در اسید نیتریک به منظور تجزیه به روش ICP-OES به آزمایشگاه شرکت تحقیقات مس ارسال گردیدند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۴).

تعیین گردید. pH نمونه‌های خاک با استفاده از روش استاندارد ۹۰۴۵D سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، ۲۰۰۴) و به صورت تهیه عصاره نمونه خاک (با نسبت ۱:۲ آب به خاک) تعیین گردید. برای تعیین بافت نمونه‌های خاک از روش هیدرومتری (برای تعیین درصد سلیت و رس) و از الک کردن (برای تعیین درصد ماسه) استفاده شد. ماده آلی خاک نیز به روش اکسایش بوسیله دی‌کرومات پتاسیم اندازه‌گیری گردیدند (ریوویژیک، ۱۹۹۵). در مورد



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی - دگرسانی منطقه معدنی ایجو و موقعیت نقاط نمونه‌برداری از خاک و گیاه (برگرفته از (طالبی، ۱۳۸۴) با کمی تغییرات)

که هیچ منبع انسان‌زادی برای آن را وجود ندارد. ضریب غنی‌شدگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۰۷):

$$BF = \frac{C_1Me/C_1n}{C_2Me/C_2n} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه EF، ضریب غنی‌شدگی،  $C_1Me$ ، غلظت فلز در محیط مورد نظر (نمونه خاک)،  $C_1n$ ، غلظت عنصر مرجع در محیط مورد نظر (نمونه خاک)،  $C_2Me$ ، غلظت همان فلز در محیط مبنا (پوسته زمین)،  $C_2n$  غلظت

### ۲-۳- روش‌های تحلیل داده‌ها

به منظور ارزیابی میزان غنی‌شدگی و تعیین کمی شدت آلودگی در خاک‌های منطقه، شاخص‌های مختلف ژئوشیمیایی، مانند ضریب غنی‌شدگی و ضریب زمین‌انباشت محاسبه گردیدند. بر اساس ضریب غنی‌شدگی می‌توان مقدار یک عنصر را نسبت به مقدار طبیعی آن سنجید. در واقع محاسبه ضریب غنی‌شدگی روشی مناسب برای ارزیابی غلظت عنصر مورد نظر در محیط در مقایسه با غلظت همان عنصر، در محیطی است

مطالعه از اسکاندیم، به عنوان عنصر مرجع استفاده شد. انتقال، نشانگر تمایل بیش‌تر گیاه به تجمع عنصر در اندام زیرزمینی (ریشه) نسبت به اندام‌های هوایی (روزمینی) و در واقع تحرک کم عنصر در اندام‌های گیاه است. مقادیر بیش‌تر از ۱ نیز، نشان‌دهنده تمایل گیاه در انتقال فلزات از ریشه به اندام‌های هوایی است (بیکر و بروکز، ۱۹۸۹).

در این پژوهش به منظور شناسایی و بررسی گونه‌سازی عناصر سنگین (Ni و Pb, Zn, Cu, Cr, As) در فازهای گوناگون خاک، تعداد ۶ نمونه خاک برای آنالیز استخراج ترتیبی به روش تسیر و همکاران (تسیر و همکاران، ۱۹۹۷) (جدول ۳) انتخاب گردید. در روش تسیر، استخراج فلزات موجود در ۵ فاز خاک (تبادل‌پذیر، متصل به کربنات‌ها، فاز کاهش‌پذیر (متصل به اکسیدهای آهن و منگنز)، فاز اکسایش‌پذیر (متصل به ماده آلی و سولفیدها) و فاز باقی‌مانده (متصل به شبکه بلوری کانی‌ها)، با استفاده از معرف‌ها و واکنشگرهای مخصوص، انجام می‌گیرد. پس از هر مرحله استخراج، اندازه‌گیری غلظت فلزات در محلول‌های حاصل به روش جذب اتمی انجام شد.

در این مطالعه برای بررسی روابط آماری پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها (از طریق آزمون شاپیرو - ویلک) از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج این همبستگی می‌تواند درک ما را در مورد نحوه توزیع فلزات در خاک و عوامل مؤثر بر آن افزایش دهد. از روش‌ها آماری چند متغیر مانند تحلیل مؤلفه اصلی و تحلیل خوشه‌ای نیز برای تفسیر بیش‌تر داده‌ها استفاده شد. در روش تحلیل مؤلفه با کاهش ابعاد داده‌ها و قرار دادن آن‌ها در یکسری مؤلفه‌های اصلی مهم‌ترین عامل تغییرپذیری داده‌ها مشخص می‌شود. در روش تحلیل خوشه‌ای نیز، با اندازه‌گیری مشابهت متغیرها، مشابه‌ترین متغیرها در یکسری خوشه‌ها یا گروه‌های مستقل از یکدیگر قرار می‌گیرند (یون و همکاران، ۲۰۰۶). برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS-ver 23 استفاده گردید.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک

در نمونه‌های خاک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه، پارامترهایی چون pH، محتوای ماده آلی خاک و بافت

عنصر مرجع در محیط مینا (پوسته زمین) است. در این در جدول ۱، رده‌بندی شدت غنی‌شدگی بر اساس مقادیر آن آورده شده است (مولر، ۱۹۶۹).

ضریب زمین‌انباشت که توسط مولر در سال ۱۹۶۹، معرفی شده است یکی دیگر از شاخص‌های کمی به منظور تعیین شدت آلودگی خاک‌های یک منطقه است. این شاخص از رابطه ۲، محاسبه می‌شود (ژن و همکاران، ۲۰۱۲):

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \left[ \frac{C_n}{1.5 B_n} \right] \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه  $I_{geo}$ ، شاخص زمین‌انباشت،  $C_n$  غلظت فلز در نمونه خاک یا رسوب،  $B_n$  غلظت فلز در ماده زمینه (میانگین شیل) است. ضریب ۱/۵، به عنوان ضریب تصحیح اثرات احتمالی ناشی از لیتولوژی‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. مولر بر اساس این شاخص، خاک‌ها را از نظر درجه آلودگی به ۷ گروه طبقه‌بندی نمود (جدول ۲).

به منظور ارزیابی غلظت فلزات در خاک و گیاه، از شاخص‌های بیوژئوشیمیایی، همچون ضریب زیست‌تمرکز (BCF)<sup>۱</sup> و ضریب انتقال (TF)<sup>۲</sup> استفاده شد. ضریب زیست‌تمرکز، نشان‌دهنده توانایی گیاهان، برای جذب فلزات از خاک است و در حقیقت میزان انتقال فلز از خاک به گیاه را نشان می‌دهد. این ضریب از رابطه زیر محاسبه می‌شود (بیکر و بروکز، ۱۹۸۹):

$$BCF = \frac{C_{root}}{C_{soil}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن  $C_{root}$  غلظت فلز در ریشه و  $C_{soil}$  غلظت همان فلز در خاک است. گونه گیاهی دارای مقادیر BCF بالا (بیش‌تر از ۱) برای یک فلز خاص را می‌توان به عنوان گونه تثبیت‌کننده آن فلز در نظر گرفت (یون و همکاران، ۲۰۰۶).

ضریب انتقال (TF)، توانایی گیاه، برای انتقال فلزات از ریشه به اندام‌های هوایی را نشان می‌دهد و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (مولر، ۱۹۶۹):

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه  $C_{shoot}$  غلظت فلز مورد نظر در اندام‌های هوایی (روزمینی) و  $C_{root}$  غلظت فلز مورد نظر در ریشه (اندام زیرزمینی) است. مقادیر کمتر از ۱ برای ضریب

<sup>۱</sup> Bio-concentration Factor

<sup>۲</sup> Transfer Factor

۰/۲۶ تا ۳/۳۰ درصد (میانگین ۱/۵۵ درصد) تغییر می‌کند. با در نظر گرفتن اقلیم نیمه‌خشک تا خشک منطقه ایجو، خاک‌های منطقه به طور کلی فقیر از ماده آلی هستند. بافت خاک نیز مقادیر کم رس را در ترکیب خود نشان می‌دهد و به طور کلی خاک‌های منطقه از نظر بافتی، در رده لومی تا ماسه‌ای لومی قرار می‌گیرند (شکل ۲).

خاک اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۴ و شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، خاک‌های منطقه مورد مطالعه از نظر pH، در رده خاک‌های نسبتاً قلیایی و قلیایی زیاد، قرار می‌گیرند. قلیایی بودن خاک‌های منطقه، که به دلیل حضور کربنات کلسیم (کلسیت) در آن‌ها است، عاملی مهم در تمرکز عناصر سنگین محسوب می‌شود (غیورانه و قشلاقی، ۲۰۱۷، تسیر و همکاران، ۱۹۹۷). میزان ماده آلی خاک از

جدول ۱. رده‌بندی مقادیر ضریب غنی‌شدگی

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

جدول ۲. میزان آلودگی خاک بر اساس مقادیر شاخص زمین‌انباشت در طبقه‌بندی مولر (مولر، ۱۹۶۹)

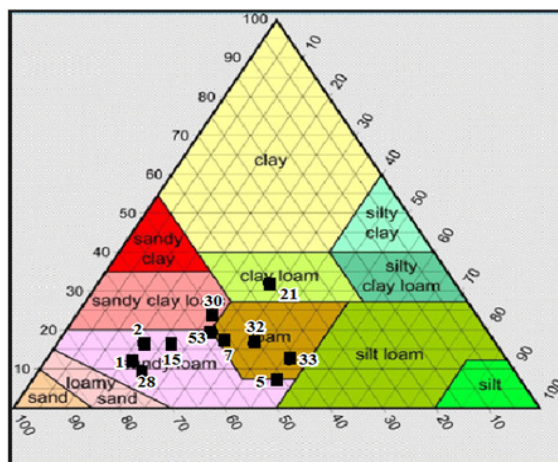
شدت آلودگی	درجه آلودگی	محدوده Igeo
بدون آلودگی	۰	کمتر از ۰
بدون آلودگی تا آلودگی متوسط	۱	۰ تا ۱
آلودگی متوسط	۲	۱ تا ۲
آلودگی متوسط تا شدید	۳	۲ تا ۳
آلودگی شدید	۴	۳ تا ۴
آلودگی شدید تا بینهایت آلوده	۵	۴ تا ۵
آلودگی بینهایت	۶	بیش‌تر از ۵

جدول ۳. خلاصه‌ای از روش استخراج ترتیبی تسیر

شرایط آزمایشگاهی	واکنشگر	فاز
۱ ساعت در دمای ۲۵ °C	8 ml of 1 mol.l <sup>-1</sup> MgCl <sub>2</sub> (pH:7)	تبادل‌پذیر (Exch)
۵ ساعت در دمای ۲۵ °C	8ml of 1 mol.l <sup>-1</sup> NaOAc (pH:5 with acetic acid)	متصل به کربنات‌ها (Carb)
۶ ساعت در دمای ۹۶ °C	20 ml of NH <sub>2</sub> .HCl, 0.04 mol.l <sup>-1</sup> in 25% w/v HOAc (pH~2)	متصل به اکسیدهای آهن و منگنز (MnO-FeO)
۲ ساعت در دمای ۸۵ °C	3 ml of 0.02 mol.l <sup>-1</sup> HNO <sub>3</sub> /5 ml of 30% m/v H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	
۳ ساعت در دمای ۸۵ °C	+3 ml of 30% m/v H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	متصل به ماده آلی (OM)
۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ °C	+5ml of 3.2 mol.l <sup>-1</sup> NH <sub>4</sub> OAc	
-	HF+HClO <sub>4</sub>	متصل به فاز باقی‌مانده (Res)

جدول ۴. پارامترهای pH و ماده آلی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک معدن ایجو

شماره نمونه	pH	ماده آلی (%)	شماره نمونه	pH	ماده آلی (%)	شماره نمونه	pH	ماده آلی (%)
۱	۸/۴۸	۰/۳۶	۲۱	۸/۳۱	۱/۳۷	۳۶	۸/۵۳	۱/۵۰
۲	۸/۳۵	۲/۱۱	۲۳	۸/۱۸	۱/۴۷	۳۷	۸/۸۵	۱/۸۷
۳	۸/۰۷	۱/۱۰	۲۵	۸/۱۱	۰/۹۳	۳۸	۸/۰۲	۱/۳۴
۵	۸/۳۵	۳/۰۵	۲۶	۸/۰۶	۱/۰۰	۳۹	۸/۵۰	۰/۷۰
۶	۸/۲۳	۳/۲۵	۲۸	۸/۱۵	۱/۰۰	۴۰	۸/۲۳	۱/۰۳
۷	۸/۴۹	۲/۱۱	۲۹	۸/۳۸	۰/۸۷	۴۱	۸/۴۱	۱/۲۴
۹	۸/۴۵	۱/۴۰	۳۰	۸/۱۸	۲/۶۳	۴۲	۸/۰۷	۱/۹۱
۱۱	۸/۶۹	۰/۲۶	۳۱	۸/۴۱	۱/۴۰	۴۳	۸/۱۲	۲/۳۱
۱۲	۸/۳۰	۳/۳۰	۳۲	۸/۵۰	۰/۵۳	۴۴	۸/۵۲	۲/۸۸
۱۵	۸/۵۲	۱/۰۷	۳۳	۸/۳۲	۱/۶۰	۴۷	۸/۸۶	۲/۲۴
۱۹	۸/۱۴	۱/۱۰	۳۵	۸/۳۹	۰/۲۶	۴۸	۸/۲۳	۲/۰۴



شکل ۲. مثلث طبقه‌بندی بافت خاک (وزارت کشاورزی آمریکا، ۱۹۸۷) و موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی آن

#### ۲-۴- غلظت و آلودگی عناصر سنگین در نمونه‌های خاک

آمار توصیفی غلظت عناصر سنگین در نمونه‌های خاک برداشت شده، در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود غلظت همه فلزات از میانگین آن‌ها در خاک‌های جهانی بیش‌تر است.

بر اساس نتایج بدست آمده مس بالاترین غلظت را در زون دگرسانی پتاسیک (در راهنمای نقشه محدوده مربوط به زون پتاسیک مشخص شده است) نشان می‌دهد (به طور میانگین ۴۵۷ mg/kg) که علت آن حضور فراوان کانی‌های حاوی مس چون کالکوپیریت در این زون است. بالاترین غلظت فلزات سرب، روی و آرسنیک نیز در زون دگرسانی آرژیلیک مشاهده می‌شود (به ترتیب ۱۳۷، ۵۸۰

و ۴۷ mg/kg) که نقش کانی‌های رسی را در انباشت این عناصر در خاک‌های منطقه نشان می‌دهد (تسیر و همکاران، ۱۹۹۷). نیکل و کروم نیز بالاترین غلظت را در زون دگرسانی آرژیلیک و سپس فیلیک نشان می‌دهند که مجدداً بیانگر تأثیر فرایند هوازدگی و تشکیل کانی‌های رسی در انباشت و یا تمرکز این دو فلز در خاک‌های منطقه است.

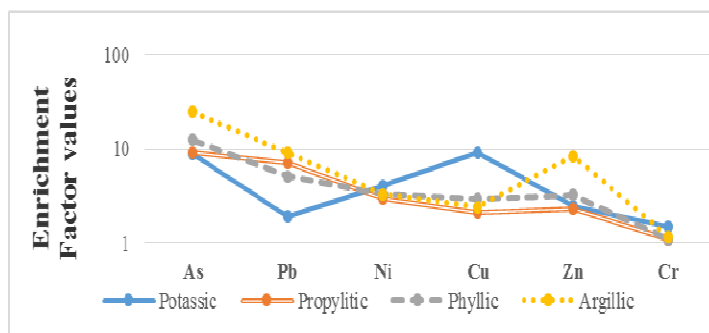
ضریب غنی‌شدگی عناصر مورد بررسی، برای نمونه‌های خاک با تفکیک زون‌های دگرسانی محاسبه و به صورت نمودار نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین ضریب غنی‌شدگی عناصر آرسنیک، سرب و روی مربوط به زون دگرسانی آرژیلیک است. علت این مسئله، وفور کانی‌های رسی در زون

مورد مطالعه، بویژه در نمونه‌های مربوط به زون آرژیلیک حضور دارند، و به همین دلیل انتظار می‌رود خاک‌های منطقه توانایی بالایی در جذب فلزات داشته باشند (شکل ۴ و جدول ۶). غنی‌شدگی اصلی فلز مس نیز در نمونه‌های خاک در زون دگرسانی پتاسیک دیده می‌شود چرا که کانه‌زایی اصلی مس (به صورت کالکوپیریت) در این زون رخ می‌دهد.

دگرسانی آرژیلیک است که به خاطر داشتن بار سطحی منفی توانایی بالایی در جذب سطحی کاتیون‌های فلزی دارند. (به منظور بررسی کانی‌های موجود در خاک‌های منطقه، از نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده، کانی‌های موجود در نمونه‌های خاک منطقه، عمدتاً شامل کانی‌های کوارتز، ایلیت، مسکویت، کلینوکلر، آلبیت، کلسیت و کائولینیت هستند. کانی‌های رسی در تمامی نمونه‌ها

جدول ۵. آمار توصیفی غلظت عناصر (بر حسب mg/kg) در نمونه‌های خاک برداشت شده از زون‌های مختلف دگرسانی

دگرسانی	آماره	As	Pb	Ni	Cu	Zn	Cr
پتاسیک	بیشینه	۱۶/۸۰	۰۲/۱۲۳	۲۵/۷۹	۰۰/۱۰۷۳	۲۱/۱۳۵	۴۱/۶۶
	کمینه	۲۱/۹	۳۰/۵۰	۲۵/۷۲	۳۲/۱۰۸	۱۱/۷۸	۰۰/۳۲
	میانگین	۱۳/۶۰	۷۷/۲۵	۷۶/۲۵	۴۵۷/۲۵	۰۰/۱۰۵	۲۳/۵۰
	انحراف معیار	۲۵/۳	۹۸/۳۲	۷/۵	۲۲۰/۶۳	۱۷/۵۲	۲۴/۴۴
فیلیک	بیشینه	۳۷/۲۰	۱۱/۲۵۲	۵۲/۷۸	۰۰/۳۷۵	۲۱/۳۴۳	۳۲/۱۳۹
	کمینه	۱۲/۱۰	۵۸/۱۹	۲۳/۳۵	۱۴/۴۴	۰۰/۱۲۱	۴۰/۵۸
	میانگین	۱۹/۰۸	۹۲/۴۴	۵۹/۷۷	۱۴۵/۸۸	۲۰۳/۸۸	۱۰۰/۸۸
	انحراف معیار	۷/۵۲	۸۶/۲۰	۱۷/۲۵	۱۲۰/۱۲	۹۸/۲۰	۱۱/۲۰
پروپلیتیک	بیشینه	۲۴/۳۰	۲۰/۳۱۵	۳۲/۸۶	۲۰/۲۵۰	۴۱/۳۳۷	۰۰/۴۶
	کمینه	۸/۱۰	۲۳/۸۸	۷۴/۳۳	۵۵/۴۷	۴۱/۸۰	۲۲/۳۱
	میانگین	۱۴/۷۵	۹۰/۰۷	۵۶/۱۵	۱۰۷/۳۰	۱۸۰/۲۳	۳۵/۲۳
	انحراف معیار	۱۰/۴۱	۷۸/۱۶	۲۰/۱۲	۷۸/۸۵	۱۰۸/۳۲	۷/۸۵
آرژیلیک	بیشینه	۶۶/۱۰	۰۰/۱۸۸	۵۸/۷۱	۳۲/۱۹۲	۵۲/۸۳۳	۱۱/۱۰۷
	کمینه	۳۰/۱۰	۱۰/۶۳	۲۱/۶۰	۳۰/۷۴	۵۰/۳۷۲	۲۰/۲۲
	میانگین	۱۱/۴۷	۵۲/۱۳۷	۸۵/۶۶	۴۴/۱۲۵	۵۸۰/۶۶	۶۶/۵۷
	انحراف معیار	۱۸/۳۰	۲۷/۲۶	۲/۸۵	۶/۹۸	۱۱۰/۲۲	۸۵/۶۳
میانگین غلظت در خاک‌های جهان	۵	۲۷	۲۲	۲۸/۹	۶۴	۵۴	



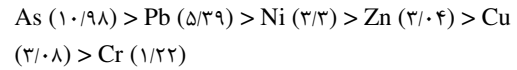
شکل ۳. ضریب غنی‌شدگی عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه با توجه به زون‌های دگرسانی

جدول ۶. کانی‌های اصلی موجود در نمونه سنگ برداشت شده از زون دگرسانی آرژیلیک

زون دگرسانی	کانی‌های اصلی
آرژیلیک	ایلیت (۳۳/۷٪)، مسکویت (۹/۷٪)، آلبیت (۲۹/۱٪)، کوارتز (۱۴٪)، آلونیت (۶/۱٪)، پیریت (۳/۶٪)، فازهای آمورف (۳/۸٪)

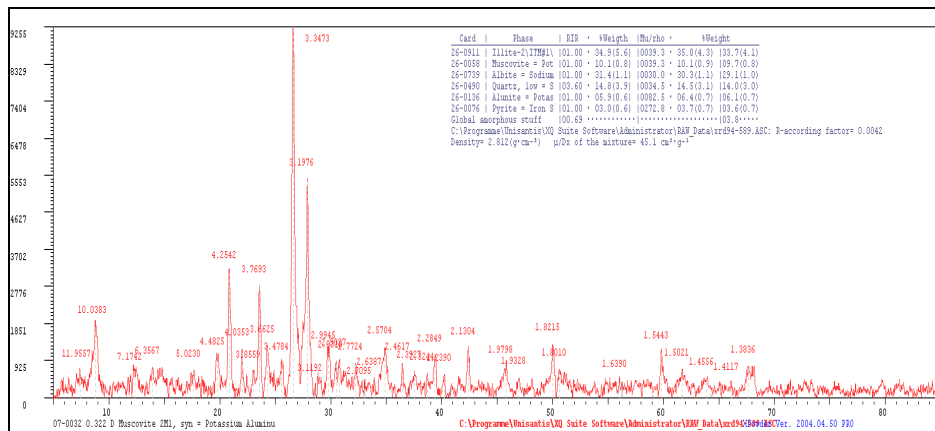
آلودگی متوسط را دارا است. فلز مس نیز در دگرسانی پتاسیک دارای بالاترین ضریب زمین‌انباشت است و در رده آلودگی متوسط قرار می‌گیرد. این تغییرات با تغییرات غلظت کل فلزات در خاک‌های منطقه همخوانی دارد. (در اینجا باید به اینکه نیز اشاره نمود که در مناطق معدنی که خاک‌های به طور طبیعی غلظت بالایی از فلزات را دارا هستند طبعاً خاک‌ها غنی‌شدگی زیادی از فلزات نشان می‌دهند و این الزاماً به معنای آلوده بودن این خاک‌ها نیست. به بیان دیگر در این مطالعه آلودگی خاک‌های منطقه صرفاً نسبت به میانگین پوست‌هایی و شیل میانگین مشخص شده است).

به طور کلی میانگین ضرایب غنی‌شدگی عناصر مورد مطالعه، به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

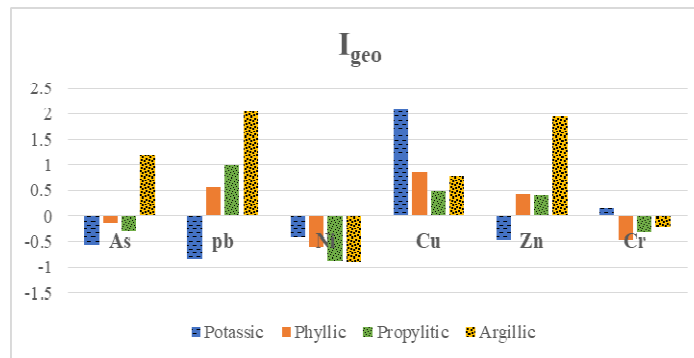


بر اساس طبقه‌بندی چن و همکاران (۲۰۰۷) (جدول ۲) در خاک‌های منطقه کروم غنی‌شدگی اندک، نیکل، مس و روی، غنی‌شدگی متوسط، سرب، غنی‌شدگی نسبتاً شدید و آرسنیک غنی‌شدگی شدید نشان می‌دهند.

بررسی میانگین شاخص زمین‌انباشت نمونه‌های خاک با توجه به زون‌های دگرسانی (شکل ۵)، نشان می‌دهد که عناصر روی، سرب و آرسنیک، در زون دگرسانی آرژیلیک، بیش‌ترین میزان شاخص زمین‌انباشت را دارا هستند و خاک منطقه نسبت به این فلزات از لحاظ شدت آلودگی،



شکل ۴. نتایج XRD نمونه برداشت شده از زون دگرسانی آرژیلیک در معدن ایجو



شکل ۵. میانگین ضرایب زمین‌انباشت عناصر سنگین در نمونه‌های خاک با توجه به زون‌های دگرسانی

۱- پارامترهای pH و ماده آلی خاک، هیچ‌گونه همبستگی آشکاری با فلزات مورد مطالعه نشان نمی‌دهند. این مسئله می‌تواند ناشی از بازه کم تغییرات این دو پارامتر در نمونه‌های خاک مورد مطالعه باشد (چن و همکاران، ۲۰۰۷).

۳-۴ بررسی روابط همبستگی بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک و غلظت عناصر سنگین به طور کلی نتایج حاصل از همبستگی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود (جدول ۷):



۴- بخش ماسه‌ای خاک هیچ‌گونه همبستگی مثبت معناداری با فلزات نشان نمی‌دهد.

۵- در نمونه‌های مورد مطالعه، فلز مس، با هیچ یک از پارامترهای خاک و فلزات دیگر، رابطه معنی‌دار نشان نمی‌دهد، که احتمالاً به دلیل منشأ متفاوت این فلز، در نمونه‌های خاک مورد مطالعه است (فرقانی‌تهرانی و مر، ۱۳۹۱) این منشأ متفاوت می‌تواند ناشی از فرایندهای کانی‌سازی فلز مس در منطقه باشد.

۷- کروم و نیکل هم همبستگی مثبت بالایی از خود نشان می‌دهند ( $r = 0.843$ ،  $p < 0.01$ ) که این می‌تواند دلیلی بر منشأ مشترک این دو فلز (زمین‌زاد) و رفتار ژئوشیمیایی مشابه آن‌ها در نمونه‌های خاک مورد مطالعه باشد.

۲- عنصر سرب با آرسنیک ( $r = 0.484$ ،  $p < 0.01$ ) و عنصر روی، با آرسنیک ( $r = 0.705$ ،  $p < 0.01$ ) همبستگی مثبت بالا و معنی‌دار نشان می‌دهند که این می‌تواند دلیلی بر منشأ مشترک آن‌ها و همچنین ناشی از ویژگی‌های ژئوشیمیایی تقریباً مشابه آن‌ها باشد. آرسنیک، سرب و روی هر سه از نظر تمایل ژئوشیمیایی، جزء عناصر کالکوفیل بوده و در سولفیدها متمرکز می‌شوند (بارکت و اکان، ۲۰۱۸).

۳- همبستگی مثبت و معنی‌داری که بین محتوای رس خاک با کروم ( $r = 0.772$ ،  $p < 0.05$ )، نیکل ( $p < 0.05$ ) و  $r = 0.580$  آرسنیک ( $r = 0.843$ ،  $p < 0.01$ )، سرب ( $r = 0.872$ ،  $p < 0.05$ ) و روی ( $r = 0.691$ ،  $p < 0.05$ ) مشاهده می‌شود که بیانگر این مطلب است که رس موجود در خاک در جذب این فلزات مؤثر بوده است (میسون و مر، ۱۹۸۲).

جدول ۷. ضرایب همبستگی پیرسون بین عناصر و پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک

	pH														
pH	1	OM	Clay	Silt	Sand	Pb	Zn	Cr	Ni	As	Cu				
OM	-0.135	1													
Clay	-0.150	-0.046	1												
Silt	0.053	0.316	-0.046	1											
Sand	0.041	-0.274	-0.508	-0.216	1										
Pb	-0.203	0.070	0.691**	-0.304	0.094	1	Zn								
Zn	-0.005	0.009	0.872**	-0.232	-0.248	0.607**	1	Cr							
Cr	0.005	-0.012	0.772**	0.512	-0.596	-0.091	-0.079	1	Ni						
Ni	0.113	0.084	0.580*	0.524	-0.132	-0.128	0.035	0.843**	1	As					
As	-0.034	-0.051	0.834**	0.065	-0.424	0.484**	0.705**	-0.160	0.061	1	Cu				
Cu	-0.074	-0.0150	-0.143	-0.136	0.201	-0.043	0.112	-0.076	0.103	0.065	1				

می‌تواند به غلظت بالاتر و در نتیجه تغییرپذیری بیشتر آن در نمونه‌های خاک مورد مطالعه مربوط باشد. به نظر می‌رسد که اگرچه معدنکاری و استخراج از کانسنگ در منطقه ایچو هنوز به صورت گسترده‌ای آغاز نشده است اما با این وجود اثر این فعالیت‌ها به صورت افزایش غلظت مس در نمونه‌های خاک بروز کرده است.

#### ۴-۵- تحلیل خوشه‌ای

با توجه به دندوگرام حاصل (شکل ۷) می‌توان سه خوشه اصلی را برای متغیرها (فلزات) مورد مطالعه تشخیص داد. خوشه نخست شامل کروم و نیکل بوده که به علت تشابه بالای آن‌ها از لحاظ ژئوشیمیایی و منشأ یکسان این دو فلز در نمونه‌های خاک مورد مطالعه است. خوشه دوم متشکل از آرسنیک، روی و سرب است. در خوشه یا گروه

#### ۴-۴- تحلیل مؤلفه اصلی

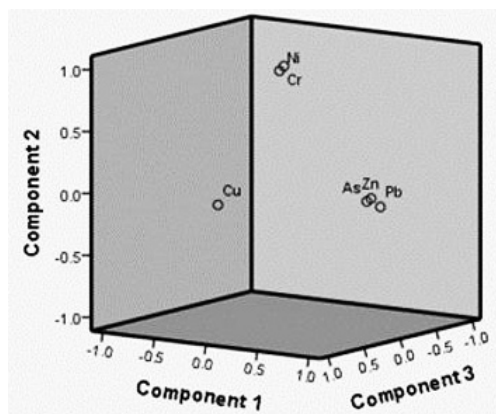
در جدول ۸ نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی ارائه شده است. شکل ۶ نیز نمودار سه‌بعدی مؤلفه‌های استخراج شده را نشان می‌دهد. در مؤلفه اول، فلزات سرب، روی و آرسنیک و در مؤلفه دوم، فلزات کروم و نیکل بارگذاری بالایی نشان می‌دهند ( $>0.5$ ). در مؤلفه سوم، فلز مس به صورت مجزا قرار گرفته است. بر اساس این نتایج، می‌توان چنین استنباط کرد که سرب، روی و آرسنیک احتمالاً منبع یکسانی دارند. با توجه به اینکه این سه فلز بیش‌ترین تمرکز را در دگرسانی آرژلیک داشته‌اند می‌توان تمرکز آن‌ها را به وجود کانی‌های رسی در این زون نسبت داد. قرارگیری کروم و نیکل هم در یک مؤلفه، به دلیل وجود منشأ مشترک زمین‌زاد و رفتار ژئوشیمیایی مشابه آن‌هاست. قرارگیری فلز مس در یک مؤلفه جداگانه

است. رفتار متفاوت فلز مس در نمونه‌های خاک را می‌تواند تا حدی به منشأ انسان‌زاد این فلز در نمونه‌های خاک (استخراج کانسنگ) مربوط دانست (وزارت کشاورزی آمریکا، ۱۹۸۷). در این منطقه، هنوز معدنکاری در مقیاس وسیع وجود ندارد؛ بنابراین بیش‌تر پراکنش عناصر از طریق منابع طبیعی و زون‌های دگرسانی کنترل می‌شود.

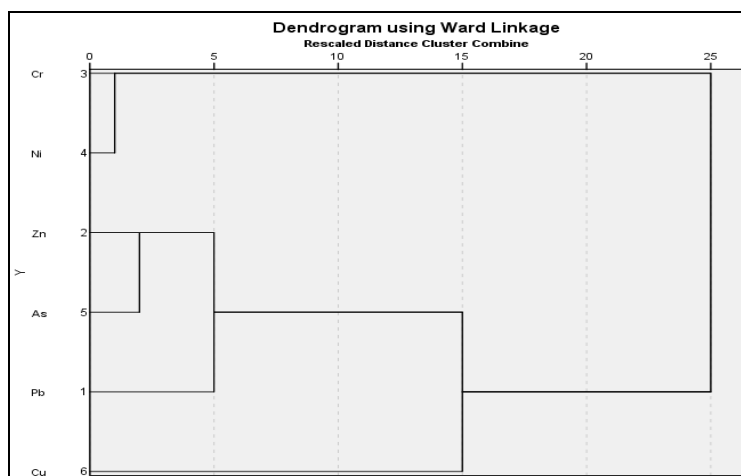
دوم بر حسب اختلاف درجه وابستگی فلزات می‌توان ۲ زیر شاخه تعیین نمود: در زیر شاخه Zn - As (I) و در زیر شاخه (II) سرب جای می‌گیرند. در این خوشه Zn و As بیش‌ترین وابستگی را با هم داشته و در سطوح پایین‌تر با Pb وابسته هستند. در خوشه سوم (III)، مس به تنهایی تشکیل یک گروه مجزا را داده و در فاصله زیادی به خوشه دوم (آرسنیک، روی و سرب) متصل شده

جدول ۸. نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی

	مؤلفه		
	۱	۲	۳
Pb	۰/۸۰۳	۰/۰۹۹-	۰/۱۶۳-
Zn	۰/۹۰۶	۰/۰۱۸-	۰/۱۱۲
Cr	۰/۰۹۷-	۰/۹۵۵	۰/۱۱۰-
Ni	۰/۰۲۳	۰/۹۶۳	۰/۱۲۱
As	۰/۸۵۶	۰/۰۱۱-	۰/۱۰۱
Cu	۰/۰۲۹	۰/۰۰۵	۰/۹۸۴



شکل ۶. نمودار سه بعدی تحلیل مؤلفه‌های استخراج شده



شکل ۷. دندوگرام طبقه‌بندی عناصر سنگین در نمونه‌های خاک مورد مطالعه

فلز نیکل و کروم احتمالاً به صورت جایگزینی یونی در شبکه کانی‌های رسی (زون آرژیلیک) حضور دارند. با اینکه، سرب تمایل به حضور در فاز کربنات‌ها را دارد (نانونی و همکاران، ۲۰۱۱)؛ اما بیش از ۸۵٪ این فلز در نمونه‌های مورد مطالعه با فاز سوم (پیوند با اکسیدهای آهن و منگنز) و آخر (فاز باقی‌مانده) همراه است. وجود سرب در فاز کربنات به دلیل حضور آن در کانی‌های کربناتی مانند کلسیت ( $\text{CaCO}_3$ ) است (تسیرو و همکاران، ۱۹۹۷)؛ چرا که سرب به طور کلی در شرایط قلیایی تمایل بالایی به فازهای کربنات دارد (فرقانی و مر، ۱۳۹۱). در مورد فلز مس نیز بر اساس نتایج به دست آمده، بیش از ۱۳/۱۸٪ این فلز در سومین فاز (متصل به اکسیدهای آهن و منگنز) و ۱۴/۸۰٪ در فاز دوم (پیوند با کربنات‌ها) حضور دارد. همراهی فلز مس با فاز کربنات، به دلیل حضور این عنصر در کانی‌های کربناتی مانند مالاکیت و آزوریت است. آرسنیک نیز بیش‌ترین همیافتی را با فاز باقی‌مانده نشان می‌دهد اما همانطور که از شکل ۷ پیداست حدود ۱۰ درصد از غلظت کل آن با اکسیدهای آهن و منگنز همراه است که بیانگر نقش این عوامل و همچنین کانی‌های رسی در جذب شبه‌فلز آرسنیک است. به طور کلی روند تغییرات دسترس‌پذیری فلزات در نمونه‌های خاک به صورت زیر است:

$\text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr}$

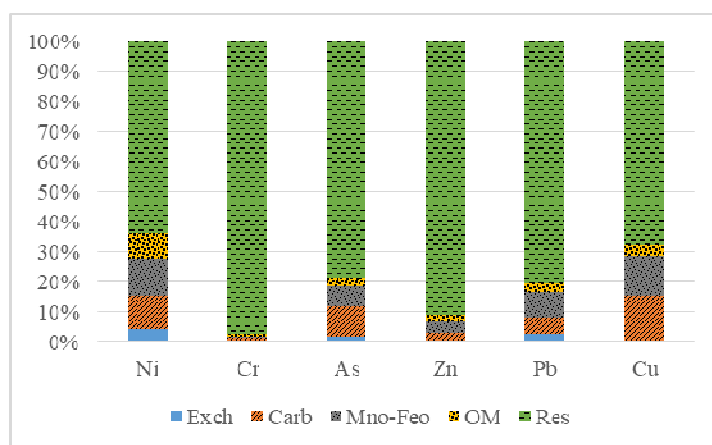
#### ۵- گونه‌سازی عناصر سنگین در نمونه‌های خاک

شکل ۸ نشان‌دهنده توزیع عناصر  $\text{As}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Zn}$ ،  $\text{As}$ ،  $\text{Ni}$  و  $\text{Cu}$  در فازهای مختلف استخراج شده است.  $\text{Carb}$ ،  $\text{Exch}$ ،  $\text{OM}$ ،  $\text{MnO-FeO}$  و  $\text{Res}$  به ترتیب مبین فلزات متصل به فازهای تبادل‌پذیر، کربنات، اکسیدهای آهن و منگنز (کاهش‌پذیر)، ماده آلی (اکسایش‌پذیر) و باقی‌مانده هستند. روند زیست‌دسترس‌پذیری عناصر سنگین، به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

$\text{Exch} > \text{Carb} > \text{MnO-FeO} > \text{OM} > \text{Res}$

که این روند با افزایش قدرت اتصال فلزات به فازهای مختلف خاک انطباق دارد. نتایج استخراج ترتیبی نشان می‌دهد که فلزات مورد مطالعه در فاز تبادل‌پذیر (فاز استخراج شده در مرحله اول) کمترین غلظت را داشته و تمرکز بالایی در فاز باقی‌مانده دارند (مس: ۶۷/۷۴٪، نیکل: ۶۳/۵۶٪، آرسنیک: ۷۸/۵۱٪، روی: ۹۰/۶۷٪، کروم: ۹۷/۲۱٪، سرب: ۸۰/۴۹٪). غلظت کم فلزات در فازهای اول و دوم به قلیایی بودن خاک باز می‌گردد.

در مورد فلز کروم درصد بالایی (۹۷/۲۱٪) از این فلز با فاز باقی‌مانده همراهی نشان می‌دهد. به طور کلی، تمایل فلز کروم در خاک‌های غیر آلوده، به تمرکز در فاز باقی‌مانده است (کاباتا پنتیاس، ۲۰۱۱). فلز نیکل نیز رفتاری مشابه با کروم داراست و بیش‌ترین همراهی را با فاز باقی نشان می‌دهد. این مسئله نشان می‌دهد که دو



شکل ۸. خلاصه نتایج آزمایش استخراج ترتیبی برای فلزات مختلف در نمونه‌های خاک

مطالعه در اندام‌های زیرزمینی (ریشه) و اندام‌های هوایی (ساقه و برگ) این گیاه نشان می‌دهد که فلز  $\text{Cu}$  تجمع بالاتری در اندام‌های زیرزمینی در مقایسه با اندام‌های هوایی دارند. همچنین غلظت  $\text{Zn}$  در اندام‌های هوایی

#### ۶- غلظت فلزات در نمونه‌های گیاه درمنه

آمار توصیفی غلظت برخی فلزات در اندام‌های زیرزمینی (Root) و روزمینی (Shoot) نمونه‌های گیاه درمنه، در جدول ۹ آورده شده است. مقایسه غلظت عناصر مورد

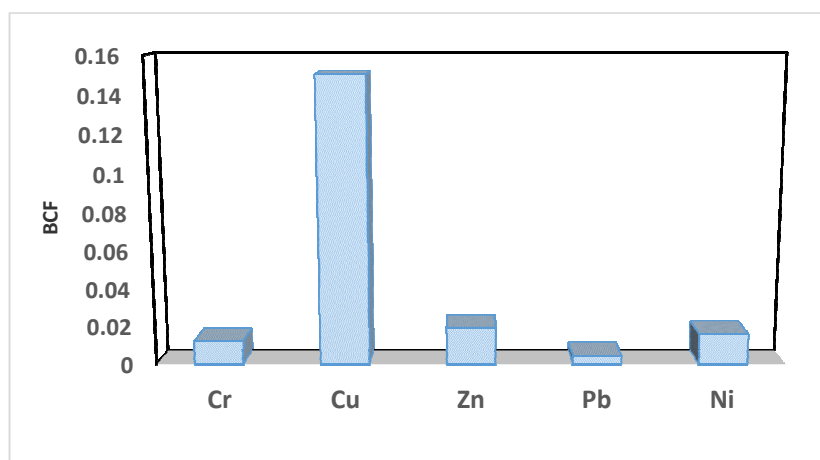
تثبیت‌کننده هیچ یک از این عناصر عمل نماید. با توجه به محاسبات انجام شده بالاترین ضریب انتقال مربوط به فلز روی با ضریب انتقال ۱۲/۶۲۸ و کمترین آن متعلق به فلزات کروم (با ضرایب انتقال ۰/۹۴۹) است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد گیاه درمنه توانایی انتقال عناصر به جز کروم را از ریشه به اندام‌هایی هوایی دارا است. این امر تحرک‌پذیری کم کروم را در پیکره گیاه و تمایل آن‌ها را به تجمع در اندام‌های زیرزمینی گیاه، نشان می‌دهد.

بیش‌تر از ریشه گیاه است. (غلظت شبه‌فلز آرسنیک در تمامی نمونه‌های گیاه کمتر از حد آشکارسازی دستگاه (۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بدست آمد).

در شکل ۹، میانگین ضریب زیست‌تمرکز فلزات مورد مطالعه آورده شده است. به طور کلی نتایج حاصل از محاسبه این ضریب نشان می‌دهد که بالاترین BCF متعلق به فلز Cu است و کمترین BCF نیز مربوط به فلز سرب است. با این حال با توجه به مقادیر محاسبه شده، تمامی عناصر، دارای ضریب تجمع زیستی کمتر از ۱ هستند؛ بنابراین گیاه درمنه نمی‌تواند به عنوان گونه

جدول ۹. آمار توصیفی غلظت عناصر سنگین در اندام‌های روزمینی و زیرزمینی در گیاه درمنه (مقادیر بر حسب mg/kg)

		Cr	Cu	Zn	Ni	Pb
Root (زیرزمینی)	کمینه	۴/۴	۱۱۷	۶/۵	۳/۵	۱/۱
	بیشینه	۶/۲	۴۴۱	۱۳/۱	۱۰/۹	۵/۳
	میانگین	۴/۸	۲۳۹	۹/۸	۵/۶	۳/۲
Shoot (روزمینی)	کمینه	۳/۹	۱۲/۱	۲۴/۱	۴/۱	۲/۱
	بیشینه	۵/۱	۵۰/۲	۴۹/۳	۸/۷	۶/۴
	میانگین	۴/۳	۲۳/۱	۴۴/۱۲	۵/۳	۳/۱



شکل ۹. میانگین ضریب زیست‌تمرکز فلزات مورد مطالعه

خود اختصاص می‌دهند. بررسی میانگین شاخص زمین‌انباشت نمونه‌های خاک با توجه به زون‌های دگرسانی نشان داد که فلزات روی، سرب و آرسنیک، در زون دگرسانی آرژیلیک و فلز مس در زون دگرسانی پتاسیک، بیش‌ترین میزان شاخص زمین‌انباشت را داشته و خاک منطقه نسبت به این فلزات از لحاظ شدت آلودگی، آلودگی متوسط را نشان می‌دهد. با استفاده از

## ۷- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این تحقیق مشخص شد که کانی‌سازی طبیعی و زون‌های دگرسانی، مهم‌ترین عامل افزایش غلظت کل فلزات در خاک‌ها و گیاهان منطقه ایجو هستند. در نمونه‌های خاک مورد مطالعه، فلزات آرسنیک، سرب و روی در زون دگرسانی آرژیلیک و فلز مس در زون پتاسیک، بیش‌ترین میزان ضریب غنی‌شدگی را به

- elements-a review of their distribution; Ecology and Photochemistry: Bio-recovery, 1: 81-26.
- Barkett, M. O. and Akun, E (2018) Heavy metal contents of contaminated soils and ecological risk assessment in abandoned copper mine harbor in Yedidalga, Northern Cyprus. *Environmental Earth Sciences*, 77: 378-389.
- Chen, S., Zhou, Q. X., Sun, Ln, Sun, T. H., and Chao, L (2007) Speciation of cadmium and lead in soils as affected by metal loading quantity and aging time: *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 78: 184-187.
- Ghayoraneh, M., Qishlaqi, A (2017) Concentration, distribution and speciation of heavy metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in Northwest of Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 180: 1-14.
- Huang, L., Bell, R. W., Dell, B., and Woodward, J (2004) Rapid nitric acid digestion of plant material with an open-vessel microwave system. *Communications in Soil science and Plant analysis*, 35: 427-440.
- Kabata – Pendias, A (2011) Trace Elements in Soils and Plants, CRC press, Boca Raton, 403 p.
- Mason, B., and Moore, C. B (1982) Principles of geochemistry: John Wiley and Sons, New York, 344 p.
- Meng, J., Tao, M., Wang, L. and Xingmei, X (2018) Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure. *Science of The Total Environment*, 633: 300-307.
- Mirnejad, H., Mathur, R., Hassenzadeh, J., Shafaie, B., Nourali, S (2013) Linking Cu mineralization to host porphyry emplacement: Re-Os ages of molybdenites versus U-Pb ages of zircons and sulfur isotope compositions of pyrite and chalcopyrite from the Iju and Sarkuh porphyry deposits in southeast Iran. *Economic Geology*, 108: 861-870.
- Müller, G (1969) Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River: *Geojournal*, 2: 108-118.
- Nannoni, F., Protano, G., and Riccobono, F (2011) Fractionation and geochemical mobility of heavy elements in soils of a mining area in northern Kosovo. *Geoderma*, 161: 63-73.
- Reeuwijk, J. P (1995) Procedure for soil analysis. Technical Paper. ISRIC, The Netherlands.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., and Bisson, M (1997) Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals: *Analytical chemistry*, 51: 844-851.
- United States Department of Agriculture (USDA) (1987) Soil mechanics level 1, module 3. USDA textural classification study guide.
- نتایج ضریب همبستگی، می‌توان دریافت که احتمالاً عناصر آرسنیک، سرب و روی با یکدیگر هم منشأ هستند. همچنین عناصر کروم و نیکل نیز احتمالاً منشأ یکسانی دارند. در این مطالعه، فلز مس، با هیچ یک از پارامترهای خاک و فلزات مورد بررسی، رابطه معنی‌دار نشان نمی‌دهد. نتایج گونه‌سازی فلزات در نمونه‌های خاک نشان داد که فلزات مورد مطالعه در فاز تبادل‌پذیر کمترین غلظت را داشته و تمرکز بالایی در فاز باقی‌مانده دارند. حضور عناصر در فاز باقی‌مانده بیانگر منشأ طبیعی و زمین‌زاد آن‌ها است. محاسبه ضریب تجمع زیستی نیز آشکار ساخت که فلز Cu بالاترین ضریب تمرکز زیستی را داشته و بالاترین ضریب انتقال نیز متعلق به فلز روی است. بر اساس نتایج بدست آمده از این مطالعه مشخص شد که منشأ بیش‌تر فلزات در خاک‌های منطقه مورد مطالعه (در شرایط فعلی) طبیعی است با این حال تشدید فعالیت‌های معدنکاری و استخراج کانسنگ در آینده می‌تواند باعث افزایش غلظت فلزات و یا دسترس‌پذیری آن‌ها در محیط خاک و گیاه شود که می‌باید در ارزیابی‌های زیست‌محیطی آتی مدنظر قرار گیرد.
- ### تقدیر و تشکر
- در خاتمه، نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از امور تحقیق و توسعه، بخش تحقیقات آب و محیط‌زیست شرکت ملی صنایع مس ایران (مجتمع مس شهر بابک)، به دلیل حمایت مالی از این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.
- ### منابع
- طالی. م (۱۳۸۴) مطالعه لیتوژئوشیمی، دگرسانی و سیالات درگیر کانسار مس پورفیری ایجو، شمال‌غرب شهر بابک. پایان‌نامه، کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۱۵ ص.
- فرقانی تهرانی. گ و مر. ف (۱۳۹۱) کاربرد تکنیک‌های گونه‌سازی عناصر جزئی در رسوبات و خاک، اولین همایش تخصصی کاربرد شیمی در علوم‌زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Abollino, O., Giacomino, A., Malandrino, M., Mentasti, E., Aceto, M., and Barberis, R (2005) Assessment of metal availability in a contaminated soil by sequential extraction: *Water, Air, and Soil Pollution*, 137: 315-338.
- Baker, A.J.M., and Brooks, R (1989) Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic

- Washington, DC: National Employee Development Staff, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.
- USEPA (2004) Test methods for evaluating solid waste. In: Method 9045D, Washington, D.C.
- Vural, A (2015) Contamination assessment of heavy metals associated with an alteration area: Demirören Gumushane, NE Turkey. *Journal Geological Society of India*, 86: 215-222.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., Ma, L. Q (2006) Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site: *Science of the Total Environment*, 368: 456-664.
- Zhen, H. A. O., Dong-Mei, Z. H. O., Dan-Dan, L. I., and Jiang, P (2012) Growth, cadmium and zinc accumulation of ornamental sunflower (*Helianthus annuus* L.) in contaminated soil with different amendments: *Pedosphere*, 22: 631-639.

## Concentration and speciation of heavy elements in soils and plants around Ijo porphyry copper mine (NW Share-Babak, Kerman province)

O. Asadi Karam<sup>1</sup> and A. Qishlaqi<sup>2\*</sup>

1, 2- Faculty of Earth sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood

\*qishlaqi@shahroodut.ac.ir

Received: 2018/7/28 Accepted: 2018/12/19

### Abstract

Heavy metal concentration and speciation in soils and native plants around the Ijo copper mine (Kerman province) are investigated in the present study. For this purpose, 34 soil samples (0-40 cm in depth) and 8 native plants (*Artemisia* sp.) are collected and analyzed by means of standard methods. In addition, chemical forms of heavy metals are determined by Tessier five-stage extraction procedure. The results obtained indicated that Cu (457.25 mg/kg on average) in potassic alteration zone and As, Pb and Zn in argillic (47.06, 137 and 580 mg/kg on average, respectively) have the highest concentrations. The calculated enrichment factor (EF) and geo accumulation indices (I<sub>geo</sub>) also confirmed this distribution pattern. The results of sequential extraction method indicated that all the metal studied have relatively low proportion in the exchangeable fraction (F<sub>1</sub>, 1/89 % of their total contents) and high contribution in the residual fraction (79/70 % of total contents) implicating their main geogenic sources in the soils. Levels of heavy metal in *Artemisia* and based upon the calculated biogeochemical indices (Transfer factor-TF and Bioconcentration factor-BCF), it was revealed that Zn and Cr (Mn as well) have the highest and lowest transfer factors, respectively. Also, the highest BCF are calculated for Mo, Cd and Cu. This study generally concludes that although the metals in soils are inherited mainly from the natural or lithogenic source in the study area, intensive exploitation and mining activities might enhance the soil metal contamination rate and make metals more available that it should be considered in future assessments.

**Keywords:** Ijo copper mine, Soil contamination, Speciation, Heavy elements, *Artemisia* sp