

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین

پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی زیست محیطی

زیست دسترس پذیری و غلظت کل فلزات سنگین در خاک های اطراف معدن مس ایجو، با تأکید بر هاله های دگرسانی، منطقه شهر بابک (استان کرمان)

نگارنده:

عذرا اسدی کرم

استاد راهنما:

دکتر افشین قشلاقی

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم به

خدایی که آفرید
جهان را، انسان را، عقل را و علم را

و

تقدیم به

پدر بزرگوار

و

مادر مهربانم

سپاسگزاری

سپاس و ستایش پروردگار بی‌همتا را که ره‌توشه دانش، در کوله‌بار اشرف آفریدگان خویش نهاد و راه تحقیق و پژوهش را بر جویندگان علم و دانش هموار نمود. اکنون که این پژوهش به پایان رسیده است، به رسم ادب و سنت حسنه سپاس، لازم می‌دانم که مراتب قدردانی و تشکر را از عزیزانی که مرا در این راه یاری نموده‌اند، ابراز دارم.

سپاس فراوان از استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر قشلاقی، که بدون شک حمایت‌ها و راهنمایی‌های ایشان در به ثمر رسانیدن این تحقیق، نقش قابل توجهی داشته‌اند.

از اساتید بزرگوار، جناب آقای دکتر موسیوند، دکتر صادقیان و سرکار خانم دکتر فرقانی، که در راه پیشبرد اهداف این تحقیق مرا یاری نمودند و همواره پاسخگوی پرسش‌های من بودند و به خاطر راهنمایی‌های علمی ارزنده‌شان، بسیار سپاسگزارم.

همچنین از شرکت ملی صنایع مس ایران (امور تحقیق و توسعه، مجتمع مس شهرابک)، به دلیل همکاری و قرار دادن امکانات، در جهت انجام این تحقیق، تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

- اینجانب **عذرا اسدی کرم** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین شناسی زیست محیطی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه زیست دسترس پذیری و غلظت کل فلزات سنگین در خاک های اطراف معدن مس ایجو، با تأکید بر هاله های دگرسانی، منطقه شهر بابک (استان کرمان) تحت راهنمایی دکتر افشین قشلاقی متعهد می شوم :
- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

یکی از مهم‌ترین منابع تجمع طبیعی فلزات سنگین در محیط، به ویژه خاک، کانی‌زایی و دگرسانی‌های مربوط به آن است. پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی غلظت فلزات سنگین، در خاک‌های اطراف معدن مس پورفیری ایجو (در استان کرمان)، با توجه به زون‌های دگرسانی منطقه، انجام گردید. برای این منظور، علاوه بر اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک، گونه‌سازی آنها نیز با استفاده از روش‌های استخراج تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفته و غلظت آنها در گونه‌های گیاهی منطقه نیز اندازه‌گیری شد. ارزیابی غلظت فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی معدن ایجو در نمونه‌های سنگ نشان داد که غنی‌شدگی فلز مس در دگرسانی پتاسیک، نسبت به سایر دگرسانی‌ها بیشتر است. فلزات کروم (با میانگین غلظت ۱۵ mg/kg) و نیکل (با میانگین غلظت ۱۹ mg/kg) در دگرسانی پروپلیتیک بیشترین غنی‌شدگی را از خود نشان می‌دهند. در دگرسانی آرژیلیک هم غنی‌شدگی اصلی مربوط به سه فلز روی، آرسنیک و سرب است (به ترتیب ۴۱۹ mg/kg، ۴۵ mg/kg و ۲۸۳ mg/kg). در نمونه خاک‌های برداشت شده از زون‌های دگرسانی، غلظت مس در زون پتاسیک و غلظت روی، آرسنیک و سرب در دگرسانی آرژیلیک بیشترین مقدار را نشان می‌دهند (به ترتیب ۵۸۰/۰۶ mg/kg، ۴۷/۰۶ mg/kg و ۱۳۷ mg/kg). نتایج استخراج ترتیبی نشان داد که فلزات مورد مطالعه در فاز تبادل‌پذیر (فاز استخراج شده در مرحله اول روش استخراج ترتیبی) کمترین غلظت را داشته و تمرکز بالایی در فاز باقی‌مانده نشان می‌دهند. حضور عناصر در فاز باقی‌مانده، بیانگر منشأ عمدتاً طبیعی و زمین‌زاد آنها است. نتایج محاسبه ضریب تحرک نیز نشان داد که نیکل و مس در خاک‌های اطراف معدن، بیشترین تحرک را دارا هستند، در حالی که کروم و روی عمدتاً در فاز باقی‌مانده حضور داشته و کمترین تحرک‌پذیری را نشان می‌دهند. بررسی غلظت فلزات در اندام‌های گیاه درمنه نیز آشکار ساخت که بیشترین ضریب غنی‌شدگی و ضریب تجمع زیستی مربوط به فلز مس است (به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۱۵). علت این امر بالاتر بودن دسترس‌پذیری فلز مس در نمونه‌های خاک است. نتایج این مطالعه به طور کلی مشخص ساخت که اگرچه منشأ بیشتر فلزات در محیط خاک (در شرایط فعلی) طبیعی است؛ اما تشدید فعالیت‌های معدنکاری و استخراج کانسنگ در آینده، می‌تواند باعث افزایش غلظت فلزات در محیط خاک و گیاه شود که می‌باید در ارزیابی‌های زیست‌محیطی آتی مد نظر قرار گیرد.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، زون‌های دگرسانی، خاک، زیست‌دسترس‌پذیری، معدن مس ایجو.

مقالات برگرفته از پایان نامه:

۱- تأثیر زون‌های دگرسانی بر غلظت فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معدن مس ایجو (کرمان)، بیستمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تهران، شهریور ۱۳۹۵.

۲- تفکیک شیمیایی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معدن مس ایجو (کرمان)، بیستمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تهران، شهریور ۱۳۹۵.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه و بیان مسأله.....	۲
۲-۱- اهداف تحقیق.....	۳
۳-۱- لزوم انجام تحقیق.....	۳
۴-۱- روش انجام تحقیق.....	۴
۵-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه.....	۵
۱-۵-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی.....	۵
۲-۵-۱- ژئومورفولوژی و وضعیت اقلیمی.....	۷
۶-۱- معرفی گیاه درمنه دشتی (گونه گیاهی مورد مطالعه).....	۸
۷-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.....	۸
۱-۷-۱- واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه.....	۹
۱-۱-۷-۱- سکناس پیروکلاستیک و ولکانیک‌های ائوسن.....	۹
۲-۱-۷-۱- آندزیت‌ها (ائوسن).....	۹
۳-۱-۷-۱- آندزیت - بازالت‌ها (ائوسن).....	۱۰
۴-۱-۷-۱- برش‌های توفی، برش‌های آندزیتی و آگلومرا (ائوسن).....	۱۰
۵-۱-۷-۱- دیوریت، کوارتز دیوریت و تونالیت پورفیری (الیگوسن - میوسن).....	۱۱
۶-۱-۷-۱- داسیت - آندزیت‌های پلیوسن - پلیستوسن.....	۱۱
۷-۱-۷-۱- نهشته‌های کواترنری.....	۱۱
۲-۷-۱- دگرسانی‌ها در معدن مس ایجو.....	۱۲
۱-۲-۷-۱- دگرسانی پتاسیک.....	۱۲
۲-۲-۷-۱- دگرسانی پروپلیتیک.....	۱۴
۳-۲-۷-۱- دگرسانی پتاسیک - فلیک.....	۱۴
۴-۲-۷-۱- دگرسانی فلیک.....	۱۵
۵-۲-۷-۱- دگرسانی آرژیلیک.....	۱۶
۳-۷-۱- کانه‌زایی در معدن ایجو.....	۱۶
۱-۳-۷-۱- کانه زایی ژرفزاد (هیپوژن).....	۱۷
۲-۳-۷-۱- کانه زایی برونزاد (سوپرژن).....	۱۸
۳-۳-۷-۱- منطقه هوازده (اکسیدان).....	۲۰

فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲- مقدمه.....	۲۴
۲-۲- کلیاتی در مورد کنسارهای مس پورفیری.....	۲۴
۱-۲-۲- دگرسانی و کانی‌سازی در کنسارهای مس پورفیری.....	۲۴
۳-۲- تعریف خاک.....	۲۶
۴-۲- فرایندهای تشکیل خاک.....	۲۶
۵-۲- فلزات سنگین و حضور آنها در خاک.....	۲۷

۲۸	۲-۵-۱- منشأ فلزات سنگین در خاک
۲۸	۲-۵-۱-۱- منشأ انسانزاد فلزات سنگین
۲۹	۲-۵-۱-۲- منشأ طبیعی فلزات سنگین
۲۹	۲-۶- گیاهان و حضور فلزات سنگین در آنها
۳۰	۲-۷- زیست‌دسترس‌پذیری
۳۱	۲-۷-۱- جزء تبادل‌پذیر/ کاتیون‌های حل‌شده
۳۱	۲-۷-۲- جزء متصل به کربنات‌ها
۳۲	۲-۷-۳- جزء متصل به اکسیدهای آهن و منگنز
۳۳	۲-۷-۵- جزء متصل به اجزاء سیلیکاته خاک (جزء باقی‌مانده)
۳۳	۲-۸- تأثیر ویژگی‌های خاک (پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک) بر جذب یا تحرک عناصر
۳۳	۲-۸-۱- pH خاک
۳۴	۲-۸-۲- ماده آلی
۳۴	۲-۸-۳- بافت خاک
۳۴	۲-۹- مروری بر مطالعات انجام شده در جهان

فصل سوم: روش انجام تحقیق

۴۰	۳-۱- مقدمه
۴۰	۳-۲- نمونه‌برداری
۴۰	۳-۲-۱- نمونه‌برداری از سنگ میزبان و کانسنگ
۴۱	۳-۲-۲- نمونه‌برداری از خاک
۴۴	۳-۲-۳- نمونه‌برداری از گیاه
۴۵	۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها
۴۵	۳-۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌های سنگی
۴۵	۳-۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های خاک
۴۶	۳-۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌های گیاه
۴۶	۳-۴- روش‌های آنالیزی
۴۷	۳-۴-۱- اندازه‌گیری pH نمونه‌های خاک
۴۷	۳-۴-۲- اندازه‌گیری درصد ماده آلی نمونه‌های خاک
۴۸	۳-۴-۳- تعیین بافت نمونه‌های خاک
۴۹	۳-۴-۴- تعیین غلظت کل فلزات سنگین
۴۹	۳-۴-۵- تعیین کانی‌شناسی نمونه‌های خاک
۴۹	۳-۴-۶- استخراج ترتیبی فلزات در نمونه‌های خاک
۵۱	۳-۵- نقشه‌های توزیع فلزات سنگین در خاک
۵۱	۳-۶- شاخص‌های ژئوشیمیایی برای ارزیابی شدت آلودگی خاک
۵۱	۳-۶-۱- ضریب غنی‌شدگی
۵۲	۳-۶-۲- شاخص زمین‌انباشت
۵۳	۳-۶-۳- ضریب تحرک فلزات سنگین و کد ارزیابی خطر
۵۳	۳-۷- شاخص‌های بیوژئوشیمیایی
۵۴	۳-۷-۱- ضریب زیست‌تمرکز

۵۴	 ۲-۷-۳- ضریب انتقال
۵۵	 ۳-۷-۳- ضریب غنی‌شدگی
۵۵	 ۸-۳- تحلیل آماری داده‌ها
۵۶	 ۱-۸-۳- آمار توصیفی
۵۶	 ۲-۸-۳- ضریب همبستگی
۵۶	 ۳-۸-۳- تحلیل مؤلفه اصلی
۵۷	 ۴-۸-۳- تحلیل خوشه‌ای

فصل چهارم: ژئوشیمی سنگ‌های آذرین و مجموعه‌های دگرسانی کانسار ایجو

۶۰	 ۱-۴- مقدمه
۶۰	 ۲-۴- ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی معدن ایجو
۶۰	 ۱-۲-۴- ژئوشیمی عناصر اصلی
۶۱	 ۲-۲-۴- تعیین سری ماگمایی فعالیت‌های آتشفشانی
۶۲	 ۳-۴- ژئوشیمی توده‌های نفوذی ایجو
۶۲	 ۱-۳-۴- ژئوشیمی عناصر اصلی
۶۴	 ۲-۳-۴- تعیین سری ماگمایی توده نفوذی
۶۴	 ۴-۴- کانی‌شناسی زون‌های دگرسانی
۶۴	 ۱-۴-۴- دگرسانی پتاسیک
۶۵	 ۲-۴-۴- دگرسانی فیلیک
۶۶	 ۳-۴-۴- دگرسانی آرژیلیک
۶۷	 ۴-۴-۴- دگرسانی پروپلیتیک
۶۸	 ۵-۴- ژئوشیمی فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی
۶۹	 ۱-۵-۴- الگوی پراکنش فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی معدن ایجو

فصل پنجم: ارزیابی آلودگی خاک

۷۶	 ۱-۵- مقدمه
۷۶	 ۲-۵- بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک
۷۶	 ۱-۲-۵- بافت نمونه‌های خاک
۷۸	 ۲-۲-۵- pH نمونه‌های خاک
۷۸	 ۳-۲-۵- درصد ماده آلی نمونه‌های خاک
۷۹	 ۳-۵- کانی‌شناسی نمونه‌های خاک
۷۹	 ۱-۳-۵- نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی پتاسیک
۸۰	 ۲-۳-۵- نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی فیلیک
۸۱	 ۳-۳-۵- نمونه خاک برداشت شده از زون دگرسانی آرژیلیک
۸۲	 ۴-۳-۵- نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی پروپلیتیک
۸۳	 ۴-۵- بررسی غلظت و توزیع فلزات سنگین در نمونه‌های خاک
۸۳	 ۱-۴-۵- مس
۸۵	 ۲-۴-۵- روی
۸۷	 ۳-۴-۵- سرب
۸۸	 ۴-۴-۵- آرسنیک

۸۹.....	۵-۴-۵ کروم.....
۹۱.....	۵-۴-۶ نیکل.....
۹۲.....	۵-۵-۵ ارزیابی کیفیت و شدت آلودگی خاک منطقه مورد مطالعه، با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی.....
۹۲.....	۵-۵-۱ ضریب غنی‌شدگی.....
۹۴.....	۵-۵-۲ شاخص زمین انباشت.....
۹۷.....	۵-۶-۵ تحلیل آماری داده‌ها.....
۹۷.....	۵-۶-۱ همبستگی بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک و غلظت فلزات سنگین.....
۹۸.....	۵-۶-۲ تحلیل مؤلفه اصلی.....
۹۹.....	۵-۶-۳ تحلیل خوشه‌ای.....
۱۰۰.....	۵-۷-۷ گونه‌پذیری فلزات سنگین در خاک ایجو.....
۱۰۱.....	۵-۷-۱ مس.....
۱۰۱.....	۵-۷-۲ نیکل.....
۱۰۲.....	۵-۷-۳ آرسنیک.....
۱۰۳.....	۵-۷-۴ روی.....
۱۰۴.....	۵-۷-۵ کروم.....
۱۰۵.....	۵-۷-۶ سرب.....
۱۰۵.....	۵-۸-۸ ضریب تحرک‌پذیری فلزات سنگین و کد ارزیابی خطر.....
۱۰۷.....	۵-۹-۹ ارزیابی غلظت فلزات در گیاه.....
۱۰۷.....	۵-۹-۱ مقدمه.....
۱۰۸.....	۵-۹-۲ غلظت فلزات در نمونه‌های گیاه درمنه.....
۱۰۸.....	۵-۹-۲-۱ کروم.....
۱۰۹.....	۵-۹-۲-۲ مس.....
۱۰۹.....	۵-۹-۲-۳ روی.....
۱۱۰.....	۵-۱۰-۱ مقایسه غلظت عناصر در اندام‌های زیرزمینی و روزمینی گیاه.....
۱۱۰.....	۵-۱۱-۱ ارزیابی رابطه غلظت فلزات در خاک و گیاه با استفاده از شاخص‌های بیوژئوشیمیایی.....
۱۱۰.....	۵-۱۱-۱ ضریب تجمع زیستی.....
۱۱۱.....	۵-۱۱-۲ ضریب انتقال.....
۱۱۲.....	۵-۱۱-۳ ضریب غنی‌شدگی.....
۱۱۳.....	۵-۱۲-۱ تحرک و زیست‌دسترس‌پذیری فلزات در نمونه‌های خاک.....

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۱۶.....	۶-۱ مقدمه.....
۱۱۶.....	۶-۲ ژئوشیمی سنگ‌های آذرین منطقه ایجو.....
۱۱۷.....	۶-۳ پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک.....
۱۱۷.....	۶-۴ کانی‌شناسی نمونه‌های خاک.....
۱۱۷.....	۶-۵ غلظت کل فلزات سنگین در نمونه‌های خاک.....
۱۱۸.....	۶-۶ ارزیابی کیفیت و شدت آلودگی خاک.....
۱۱۹.....	۶-۷ تحلیل آماری داده‌ها.....
۱۲۰.....	۶-۹ غلظت عناصر در نمونه‌های گیاه درمنه.....

۱۲۰	 زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین
۱۲۱	 پیشنهادها
۱۱۹	 منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به معدن مس پورفیری ایجو..... ۶
- شکل ۱-۲- نمایش کلی از توپوگرافی منطقه ایجو (دید به سمت شمال غرب)..... ۷
- شکل ۱-۳- نقشه زمین‌شناسی معدن ایجو با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰..... ۱۰
- شکل ۱-۴- نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی‌های معدن مس ایجو..... ۱۲
- شکل ۱-۵- همراهی کالکوپیریت (Cpy) و بورنیت (Bor) در زون دگرسانی پتاسیک، که از اطراف به کوولیت (Cov)..... ۱۳
- شکل ۱-۶- کلریتی شدن زمینه سنگ به همراه بلورهای اپیدوت (دگرسانی پروپلیتیک)..... ۱۴
- شکل ۱-۷- الف) رسی شدن و سرسیتی شدن پلاژیوکلاز (ب) کوارتز و سرسیت فراوان (شاخص دگرسانی فیلیک)..... ۱۵
- شکل ۱-۸- نمونه الف) ماکروسکوپی و ب) میکروسکوپی (رسی شدن پلاژیوکلازها) از دگرسانی آرژیلیک..... ۱۶
- شکل ۱-۹- الف) رگه و رگچه‌هایی که از پیریت پر شده‌اند و ب) کانی‌سازی استوکورک..... ۱۷
- شکل ۱-۱۰- پیریت به همراه کالکوپیریت در زمینه سیلیکاتی..... ۱۸
- شکل ۱-۱۱- تفکیک منطقه اکسیدی و سوپرژن (غنی‌شده) در منطقه ایجو..... ۱۹
- شکل ۱-۱۲- جانیشینی کالکوپیریت توسط کوولیت و کالکوسیت..... ۲۰
- شکل ۱-۱۳- هوازدگی رگه اولیه کالکوپیریت و تبدیل آن به گوتیت در زمینه‌ای از پیریت..... ۲۱
- شکل ۱-۱۴- الف) رگه اکسید آهن حاصل از اکسیداسیون پیریت ب) دگرسانی زون اکسیدی با رگه و رگچه‌های اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن..... ۲۱
- شکل ۱-۱۵- حضور گسترده کانی مالاکیت در زون اکسیدی معدن مس ایجو..... ۲۱
- شکل ۱-۲- ساخت منطقه‌ای در دگرسانی‌های موجود در یک کانسار مس پورفیری..... ۲۵
- شکل ۲-۲- نقش بیوسفر، لیتوسفر، اتمسفر و هیدروسفر، در تشکیل خاک..... ۲۶
- شکل ۲-۳- نحوه رخداد فلزات در خاک..... ۳۱
- شکل ۳-۱- موقعیت نمونه‌های سنگی برداشت شده از منطقه مورد مطالعه..... ۴۲
- شکل ۳-۲- نمونه‌برداری از خاک‌های اطراف معدن مس ایجو..... ۴۲
- شکل ۳-۳- موقعیت نمونه‌های خاک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه..... ۴۳
- شکل ۳-۴- تصاویری از برداشت نمونه‌های گیاه درمنه، در منطقه مورد مطالعه..... ۴۳
- شکل ۳-۵- موقعیت نمونه‌های گیاه برداشت شده از منطقه مورد مطالعه..... ۴۵
- شکل ۳-۶- تصویری از آماده‌سازی نمونه‌های گیاهی در آزمایشگاه..... ۴۶
- شکل ۳-۷- الف) اندازه‌گیری pH و ب) درصد ماده آلی نمونه‌های خاک..... ۴۸
- شکل ۳-۸- موقعیت نمونه‌های خاک برداشت شده برای انجام آنالیز استخراج ترتیبی..... ۵۰
- شکل ۴-۱- رده‌بندی شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی معدن مس ایجو..... ۶۱
- شکل ۴-۲- نمودار تعیین سری ماگمایی برای سنگ‌های آتشفشانی معدن ایجو..... ۶۲
- شکل ۴-۳- رده‌بندی ژئوشیمیایی نمونه‌های توده نفوذی منطقه ایجو، بر روی نمودار..... ۶۳
- شکل ۴-۴- نمودار تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نفوذی معدن ایجو..... ۶۴
- شکل ۴-۵- نتایج XRD نمونه A۵۲ از زون دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو..... ۶۵
- شکل ۴-۶- نتایج XRD نمونه A۳۹ از زون دگرسانی فیلیک در معدن ایجو..... ۶۶

- شکل ۴-۷- نتایج XRD نمونه A۴۶ از زون دگرسانی زون آرژلیک در معدن ایجو..... ۶۷
- شکل ۴-۸- نتایج XRD نمونه A۳۵ از زون دگرسانی زون پروپلیتیک..... ۶۷
- شکل ۴-۹- نمودار عنکبوتی زون‌های دگرسانی معدن پورفیری ایجو از نظر غلظت فلزات سنگین..... ۷۰
- شکل ۵-۱- مثلث طبقه‌بندی بافت خاک (USDA) و موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی آن..... ۷۷
- شکل ۵-۲- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۱ (دگرسانی پتاسیک)..... ۷۹
- شکل ۵-۳- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۲ (دگرسانی پتاسیک)..... ۸۰
- شکل ۵-۴- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۷ (دگرسانی فلیک)..... ۸۰
- شکل ۵-۵- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۰ (دگرسانی فلیک)..... ۸۱
- شکل ۵-۶- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۱۵ (دگرسانی آرژلیک)..... ۸۱
- شکل ۵-۷- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۲۱ (دگرسانی آرژلیک)..... ۸۲
- شکل ۵-۸- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۵ (دگرسانی پروپلیتیک)..... ۸۲
- شکل ۵-۹- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۲۸ (دگرسانی پروپلیتیک)..... ۸۳
- شکل ۵-۱۰- نقشه توزیع مس در خاک‌های منطقه ایجو..... ۸۵
- شکل ۵-۱۱- میانگین غلظت مس در زون‌های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه..... ۸۵
- شکل ۵-۱۲- نقشه توزیع روی در خاک‌های معدنی منطقه ایجو..... ۸۶
- شکل ۵-۱۳- میانگین غلظت روی در زون‌های دگرسانی منطقه مورد مطالعه..... ۸۶
- شکل ۵-۱۴- نقشه توزیع سرب در خاک‌های معدنی منطقه ایجو..... ۸۷
- شکل ۵-۱۵- میانگین غلظت سرب در زون‌های دگرسانی منطقه مورد مطالعه..... ۸۸
- شکل ۵-۱۶- نقشه توزیع آرسنیک در خاک‌های معدنی منطقه ایجو..... ۸۹
- شکل ۵-۱۷- میانگین غلظت آرسنیک در زون‌های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه..... ۸۹
- شکل ۵-۱۸- نقشه توزیع کروم در خاک‌های معدنی منطقه ایجو..... ۹۰
- شکل ۵-۱۹- میانگین غلظت کروم در زون‌های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه..... ۹۰
- شکل ۵-۲۰- نقشه توزیع نیکل در خاک‌های معدنی منطقه ایجو..... ۹۱
- شکل ۵-۲۱- میانگین غلظت نیکل در زون‌های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه..... ۹۲
- شکل ۵-۲۲- ضریب غنی‌شدگی عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک منطقه، با در نظر گرفتن زون‌های دگرسانی مختلف..... ۹۳
- شکل ۵-۲۳- نتایج ضریب غنی‌شدگی فلزات مختلف در ایستگاه‌های نمونه‌برداری..... ۹۳
- شکل ۵-۲۴- میانگین ضرایب زمین انباشت فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی کانسار ایجو..... ۹۴
- شکل ۵-۲۵- میانگین شاخص زمین انباشت فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک منطقه ایجو..... ۹۶
- شکل ۵-۲۶- ضرایب زمین انباشت فلزات مورد مطالعه در نقاط نمونه‌برداری از خاک..... ۹۶
- شکل ۵-۲۷- نمودار سه بعدی تحلیل مؤلفه‌های استخراج شده..... ۹۹
- شکل ۵-۲۸- دندوگرام طبقه‌بندی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک منطقه ایجو..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲۹- میانگین نتایج آزمایش استخراج ترتیبی به روش تسیر..... ۱۰۱

- شکل ۵-۳۰- درصد مس استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ۱۰۱
- شکل ۵-۳۱- درصد نیکل استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ۱۰۲
- شکل ۵-۳۲- درصد آرسنیک استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ۱۰۳
- شکل ۵-۳۳- درصد روی استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ۱۰۴
- شکل ۵-۳۴- درصد کروم استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ۱۰۴
- شکل ۵-۳۵- درصد سرب استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی ۱۰۵
- شکل ۵-۳۶- میانگین مقادیر ضرایب تحرک پذیری فلزات سنگین در خاک‌های منطقه مورد مطالعه ۱۰۶
- شکل ۵-۳۷- میانگین مقادیر کد ارزیابی خطر برای فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک منطقه ایجو ۱۰۷
- شکل ۵-۳۸- نمودار ستونی غلظت فلزات Cr, Cu, Zn (اندام‌های هوایی (Shoot) و اندام‌های زمینی (Root)) ۱۱۰
- شکل ۵-۳۹- میانگین ضریب تجمع زیستی عناصر ۱۱۱
- شکل ۵-۴۰- میانگین ضریب انتقال عناصر در گیاه درمنه ۱۱۲
- شکل ۵-۴۱- میانگین ضریب غنی‌شدگی عناصر در گیاه درمنه ۱۱۲
- شکل ۵-۴۲- میانگین مقادیر زیست‌دسترس پذیری فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک ۱۱۴
- شکل ۵-۴۳- الف) غلظت فلزات در نمونه‌های گیاهی (مجموع غلظت در اندام‌های زیرزمینی و روزمینی) و ب) میانگین غلظت فلزات در نمونه‌های گیاه ۱۱۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- مهمترین منابع انسانزاد عناصر شناخته شده، با اثرات مخرب بر روی زیست کره..... ۲۸
- جدول ۲-۲- میانگین غلظت عناصر کمیاب در سنگ‌های آذرین، سنگ‌های رسوبی و خاک‌ها..... ۲۹
- جدول ۱-۳- موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت شده از رخنمون‌های سنگی، در منطقه مورد مطالعه..... ۴۱
- جدول ۲-۳- موقعیت جغرافیایی نمونه‌های خاک برداشت شده..... ۴۳
- جدول ۳-۳- موقعیت نمونه‌های گیاه (درمنه) برداشت شده، از منطقه مورد مطالعه..... ۴۴
- جدول ۴-۳- خلاصه روش استخراج ترتیبی..... ۵۰
- جدول ۵-۳- رده‌بندی مقادیر ضریب غنی‌شدگی..... ۵۲
- جدول ۶-۳- میزان آلودگی خاک بر اساس مقادیر شاخص زمین انباشت در طبقه‌بندی مولر..... ۵۲
- جدول ۷-۳- رده‌بندی خاک‌ها بر اساس کد ارزیابی خطر..... ۵۳
- جدول ۱-۴- نتایج آنالیز XRF سنگ‌های توده نفوذی و میزبان معدن مس ایجو..... ۶۳
- جدول ۲-۴- کانی‌های اصلی موجود در نمونه‌های سنگ برداشت شده از زون‌های دگرسانی..... ۶۸
- جدول ۳-۴- نتایج آنالیز ICP-OES نمونه‌های سنگ..... ۶۹
- جدول ۱-۵- پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک..... ۷۷
- جدول ۲-۵- رده‌بندی خاک‌ها بر مبنای مقادیر pH..... ۷۸
- جدول ۳-۵- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی پتاسیک در منطقه مورد مطالعه..... ۷۹
- جدول ۴-۵- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی فیلیک در منطقه مورد مطالعه..... ۸۰
- جدول ۵-۵- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی آرژیلیک در منطقه مورد مطالعه..... ۸۱
- جدول ۶-۵- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی پروپلیتیک در منطقه مورد مطالعه..... ۸۲
- جدول ۷-۵- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک برداشت شده از زون‌های دگرسانی مختلف..... ۸۴
- جدول ۸-۵- ضرایب همبستگی پیرسون بین عناصر و پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک..... ۹۸
- جدول ۹-۵- نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی..... ۹۹
- جدول ۱۰-۵- مقادیر میانگین ضریب تحرک‌پذیری برای فلزات سنگین در نمونه‌های خاک..... ۱۰۶
- جدول ۱۱-۵- میانگین مقادیر کد ارزیابی خطر فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک ایجو..... ۱۰۶
- جدول ۱۲-۵- غلظت فلزات سنگین مختلف در اندام‌های زیرزمینی (Root) و اندام‌های روزمینی (Shoot) در گیاه درمنه..... ۱۰۸
- جدول ۱۳-۵- مقادیر زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین در نمونه‌های خاک..... ۱۱۴

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه و بیان مسأله

امروزه به دنبال فعالیت‌های انسانی، آلاینده‌های مختلفی به محیط‌زیست، به ویژه به محیط خاک وارد شده‌اند. از این میان، فلزات سنگین یکی از انواع آلاینده‌های محیطی هستند که با ورود به خاک، بر روی سلامت انسان و سایر موجودات اثر می‌گذارند (Kabata-Pendias, 1993). با افزایش روزافزون جمعیت و نیاز جوامع انسانی به منابع فلزی و بهره‌برداری هر چه بیشتر از این منابع، اثرات ناشی از آن نیز شدت یافته است. به طوری که فعالیت‌های معدنکاری را باید یکی از مهم‌ترین منابع ایجاد آلودگی فلزات سنگین در خاک‌ها و سایر بخش‌های محیط به حساب آورد.

کانی‌سازی و دگرسانی‌ها هم از مهم‌ترین منابع تجمع طبیعی فلزات سنگین در خاک هستند. استخراج و بهره‌برداری از معادن فلزی، به دلیل قراردادن کانی‌ها و سنگ‌های حاوی فلزات سنگین، در معرض فرسایش و هوازدگی بیشتر، باعث افزایش میزان آلودگی محیط خاک، خواهند شد؛ بنابراین مدیریت خاک‌های آلوده در محیط‌های معدنی، به درک درستی از غلظت فلزات، مقیاس آلودگی، منشأ و دسترس-پذیری فلزات سنگین در محیط خاک دارد (Luo et al., 2007).

خاک نقش مهمی در اکوسیستم‌های طبیعی ایفا می‌کند. این محیط به عنوان مخزن اصلی دریافت‌کننده فلزات (به صورت طبیعی یا انسان‌زاد) عمل می‌کند و از آنجایی که توانایی انتقال این آلاینده‌ها را به سایر بخش‌های محیط دارد؛ بنابراین کیفیت آن از نظر زیست محیطی، حائز اهمیت است.

در معدن مس پورفیری ایجو (واقع در استان کرمان)، با توجه به وجود کانی‌سازی مس و دگرسانی‌های مختلف، احتمال آلودگی خاک و گیاهان منطقه به فلزات سنگین، وجود دارد و از آنجایی که در این منطقه، هنوز معدنکاری در مقیاس وسیع وجود ندارد؛ بنابراین بیشتر پراکنش عناصر از طریق منابع طبیعی و زون‌های دگرسانی کنترل می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی غلظت کل فلزات سنگین در خاک و گیاهان منطقه و تعیین رابطه احتمالی آنها با هاله‌های دگرسانی و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه و همچنین ارزیابی میزان زیست‌دسترس‌پذیری فلزات در خاک است.

۱-۲- اهداف تحقیق

اهداف کلی این پژوهش، بررسی تأثیر زون‌های دگرسانی (پتاسیک، پروپلیتیک، فیلیک و آرژیلیک) معدن مس ایجو، بر غلظت عناصر و فلزات سنگین، در خاک و گیاهان بومی اطراف آن و همچنین ارزیابی میزان دسترس‌پذیری و خطر این فلزات و تعیین عوامل کنترل‌کننده تمرکز، تحرک و انتقال آنها در محیط خاک است. برای نیل به این اهداف، مراحل زیر انجام گرفت:

۱- مطالعه زمین‌شناسی و زون‌های دگرسانی منطقه.

۲- تحلیل داده‌های به دست آمده بعد از انجام آنالیزهای مربوطه و تعیین شدت آلودگی فلزی در خاک و گیاهان بومی منطقه (از طریق روش‌های آماری، شاخص‌های ژئوشیمیایی و مقایسه با مقادیر مجاز زیست‌محیطی).

۳- مشخص کردن رابطه بین غلظت کل فلزات سنگین و زیست‌دسترس‌پذیری آنها در خاک و عوامل مؤثر بر آنها.

۴- تعیین رابطه بین غلظت کل فلزات با ویژگی‌های خاک‌شناسی (پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک)، کانه‌زایی (توده معدنی و سنگ میزبان) و هاله‌های دگرسانی در منطقه.

۵- پهنه‌بندی و تعیین الگوی پراکندگی غلظت کل فلزات در خاک.

۱-۳- لزوم انجام تحقیق

حضور فلزات سنگین در خاک و گیاهان در مقادیر بیش از حد مجاز، باعث کاهش کیفیت آنها شده و با ورود این فلزات به زنجیره غذایی نیز سلامت جوامع زیستی به خطر می‌افتد. معادن مس پورفیری با توجه به عملکرد گسترده محلول‌های هیدروترمال، دارای زون‌های مختلف کانی‌سازی و آلتراسیون هستند و این کانی‌زایی‌ها و دگرسانی‌ها، جایگاه مناسبی برای تمرکز عناصر فلزی، به ویژه فلزات سنگین محسوب می‌شوند. در حقیقت تجزیه، فرسایش و هوازدگی این سنگ‌ها و کانی‌ها، در اینگونه مناطق باعث رهاسازی و ورود انواع فلزات سنگین به محیط‌های آبی و خاکی می‌شود. لازم به ذکر است که،

اثرات زیست‌محیطی ناشی از فلزات سنگین در خاک، تنها وابسته به غلظت کل آنها نیست، بلکه به میزان تحرک و زیست‌دسترسی‌پذیری 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 (Abollino et al., 2005).

در منطقه مورد مطالعه (معدن مس ایجو)، بهره‌برداری از کانی‌ها و سنگ‌ها، باعث قرارگیری بیشتر آنها در معرض هوازدگی و فرسایش شده، که این خود، منجر به ورود هر چه بیشتر این فلزات به اکوسیستم‌های مختلف، از جمله خاک خواهد شد. از طرف دیگر، محیط‌زیست یکی از ارکان مهم و اصلی توسعه پایدار است؛ بنابراین با ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از این کنسارها، به ویژه از نظر آلودگی فلزی، می‌توان ضمن توسعه و بهره‌برداری از این معادن، بخش‌های مختلف محیط را از آلودگی بیشتر مصون نگه داشت. با توجه به موارد یاد شده، در این مطالعه، با بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاهان اطراف معدن مس ایجو و بررسی زیست‌دسترسی‌پذیری و سرنوشت این فلزات در محیط خاک، می‌توان اثرات بالقوه ناشی از این کنسار را از نظر آلودگی محیطی به شکل دقیقی مورد ارزیابی قرار داده و سهم فعالیت‌های انسان‌زاد آتی را در آلودگی خاک‌ها، پیش‌بینی کرد.

۱-۴- روش انجام تحقیق

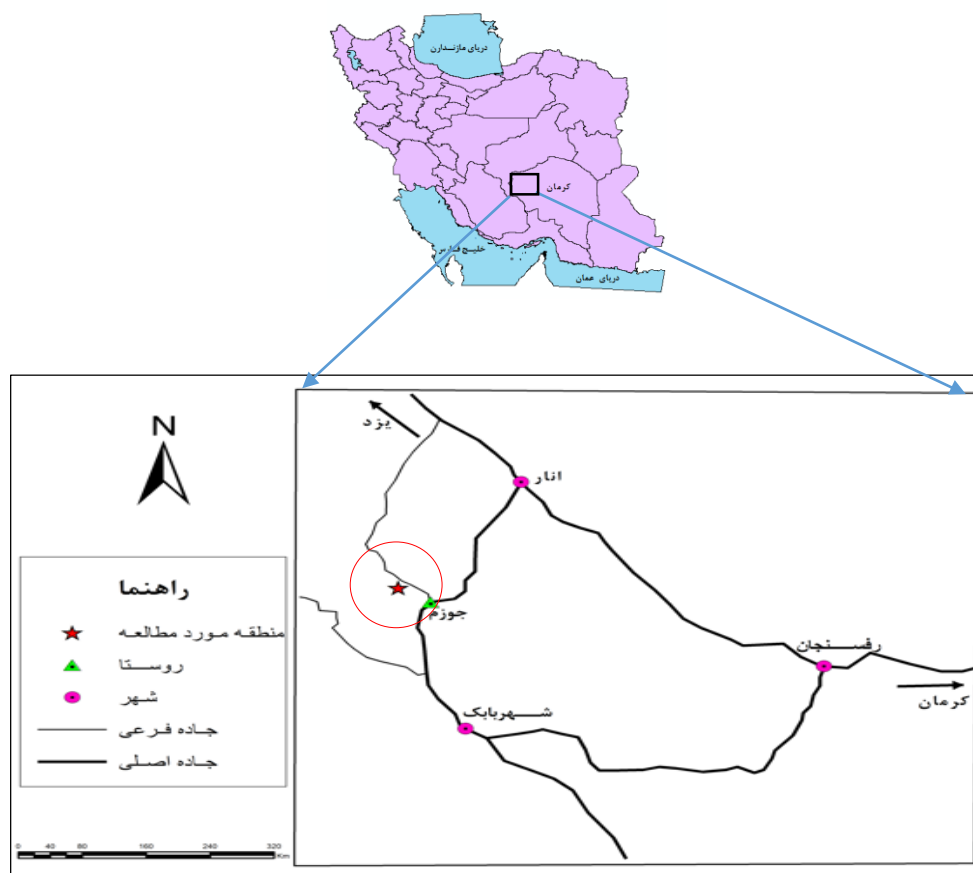
جهت رسیدن به اهداف این پژوهش، در ابتدا مطالعات دفتری و کتابخانه‌ای انجام شد. در این مرحله، منابع مرتبط با موضوع تحقیق و همچنین کلیه اطلاعات موجود در ارتباط با منطقه مورد مطالعه، به ویژه اطلاعات زمین‌شناسی، کانه‌زایی و هاله‌های دگرسانی، جمع‌آوری شد و مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی غلظت کل فلزات و میزان تحرک و زیست‌دسترسی‌پذیری آنها و همچنین تعیین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک، نمونه‌برداری از خاک، سنگ و گیاه (درمنه) منطقه انجام گرفت. برای تعیین کانی‌های موجود در سنگ‌ها و نیز تعیین درصد اکسیدهای اصلی، آنالیزهای XRD و XRF انجام شد و مقاطع نازک و نازک - صیقلی تهیه گردید. برای ارزیابی غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

و سنگ از دستگاه ICP-OES و به منظور تعیین کانی‌شناسی نمونه‌های خاک، از روش XRD استفاده گردید. در این تحقیق برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از جمله pH خاک، بافت نمونه‌های خاک و درصد ماده آلی خاک اندازه‌گیری شد. در نهایت به منظور ارزیابی بخش زیست‌دسترس‌پذیر فلزات، آنالیز استخراج ترتیبی بر روی برخی نمونه‌های خاک انجام شد. به منظور ارزیابی غلظت فلزات سنگین در گیاه غالب منطقه (گیاه درمنه)، از دستگاه ICP-MS استفاده گردید.

۱-۵- معرفی منطقه مورد مطالعه

۱-۵-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

معدن مس ایجو با وسعت ۴ کیلومتر مربع، در استان کرمان و در ۷۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان شهرابک، ۱۴۰ کیلومتری غرب - شمال غربی معدن مس سرچشمه و در ۲۵ کیلومتری بخش شمال-غربی معدن مس میدوک، قرار گرفته است. دسترسی به ایجو، از طریق جاده شهرابک - انار، میسر است (شکل ۱-۱، الف). از نظر جغرافیایی، معدن ایجو، در عرض جغرافیایی شمالی $31^{\circ} 45'$ تا $33^{\circ} 5'$ و عرض جغرافیای شرقی $54^{\circ} 56' 10''$ تا $54^{\circ} 57' 30''$ (شکل ۱-۱، ب) و در مرکز نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ انار و منتهی الیه جنوب شرقی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دهج، قرار دارد. بزرگترین آبادی نزدیک به منطقه مورد مطالعه، روستای جوزم است که در فاصله ۱۲ کیلومتری شرق معدن، واقع شده است.



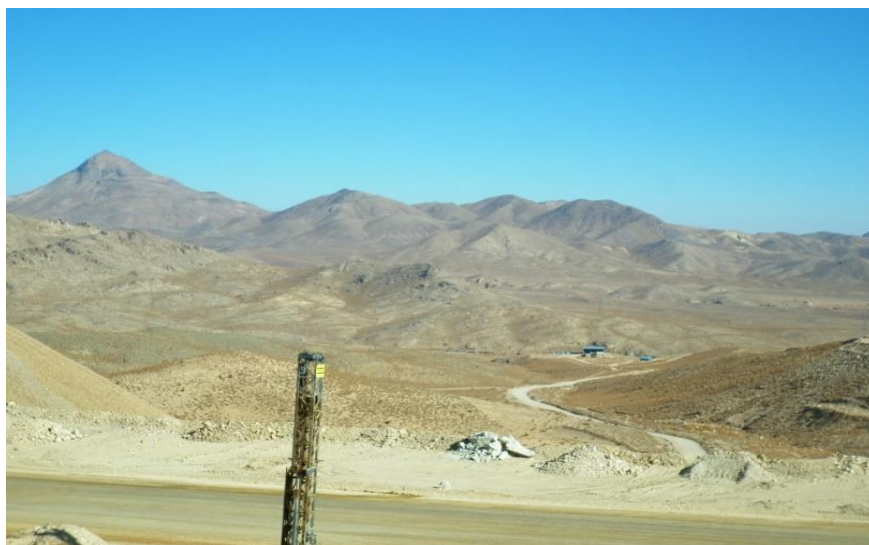
شکل ۱-۱ الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به معدن مس پورفیری ایجو



شکل ۱-۱ ب) تصویر ماهواره‌ای از محدوده کانسار مس ایجو

۱-۵-۲- ژئومورفولوژی و وضعیت اقلیمی

ناحیه شهربابک، در شمال غرب استان کرمان، دارای دو منطقه کوهستانی و هموار است. از نظر رژیم حرارتی دو فصل مشخص و متمایز در این منطقه وجود دارد. فصل تابستان، از خردادماه شروع و تا شهریور ماه، ادامه می یابد. بیشینه دما در این منطقه، به ۴۰ درجه سانتی گراد می رسد. از شهریور ماه دمای هوا کاهش یافته و با یک پاییز کوتاه مدت، زمستان آغاز می شود. اوج سرما در دی ماه است که حداقل دمای آن به ۱۶- درجه سانتی گراد می رسد. سیمای منطقه ایجو کوهستانی است که ارتفاع کوهها در آن از ۲۳۰۰ تا ۲۶۰۰ متر متغیر است. بلندترین ارتفاع مربوط به قله تله کوه است (۲۶۰۰ متر) که در بخش غربی منطقه مورد مطالعه، قرار دارد. منشأ بارندگی در منطقه، سیکلونی و حاصل نفوذ و توسعه توده های مرطوب از سمت غرب است. میانگین بارش سالانه، حدود ۱۲۰ میلی متر است که از این میان، حدود ۵۷/۵ درصد بارش در زمستان، ۱۸/۹ درصد در بهار، ۰/۱ درصد در تابستان و ۲۳/۵ درصد در پاییز، رخ می دهد. پوشش گیاهی در منطقه ایجو، پراکنده و تنک است (شرکت ملی صنایع مس، ۱۳۸۹). شکل ۱-۲ دورنمای کلی از وضعیت توپوگرافی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۱-۲- نمایی کلی از توپوگرافی منطقه ایجو (دید به سمت شمال غرب)

۱-۶- معرفی گیاه درمنه دشتی^۱ (گونه گیاهی مورد مطالعه)

درمنه دشتی یا بیابانی، بوته‌ای بسیار معطر، عنصر اصلی و غالب اجتماعات گیاهی در استپ‌های خشک و نیمه خشک در کشور ایران است. ارتفاع این بوته بین ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و دارای انشعابات متعدد و متراکم بوده که شکل کپه‌ای را به بوته می‌دهد. اغلب در خاک‌های لومی، ماسه‌ای و لومی رسی، ایجاد رویشگاه‌های وسیعی را می‌نماید. این گیاه توسط گوسفندان مورد چرا قرار می‌گیرد. درمنه دشتی از جمله بوته‌های بسیار سازگار به شرایط سخت محسوب می‌شود. در نواحی مختلف از آن برای دفع کرم استفاده می‌شود. خواص ضد عفونی‌کننده، ضد سرفه، بادشکن، اشتها آور داشته و همچنین تب بر و مسکن دردهای احشایی و سردرد است.

۱-۷- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

از نظر زمین‌شناسی، ذخیره مس پورفیری ایجو در بخش جنوب غربی کمربند ولکانوپلوتونیک ارومیه - دختر و در شمال غربی کمربند دهج - ساردوئیه قرار دارد. منطقه مورد مطالعه، از مجموعه آتشفشانی - آذرآواری شامل آندزیت - تراکی آندزیت، آگلومرا، توف، توف برشی و آندزیت بازالت، با سن نسبی ائوسن، تشکیل گردیده است. این مجموعه، توسط یک توده نفودی با سن نسبی الیگومیوسن، قطع شده است. توده نفودی دارای چندین فاز ماگمایی است که ترکیب آنها از دیوریت تا کوارتز دیوریت متغیر است و به عنوان فازهای مولد دگرسانی - کانی‌سازی در کانسار ایجو، محسوب می‌شوند (طالبی، ۱۳۸۴). عمده کانی‌زایی در ارتباط با فاز کوارتز دیوریتی است. دایک‌های داسیتی و آندزیتی، دیوریتی و کوارتز دیوریتی و آندزیت - بازالتی که عمدتاً دارای روند شمالی - جنوبی هستند، بعد از فاز اصلی کانی‌سازی جایگزین شده‌اند. در کانسار ایجو، انواع دگرسانی‌های شاخص کانسارهای مس پورفیری مشاهده می‌گردد. کانی‌سازی در منطقه شامل کانه‌زایی درون‌زاد (پیریت، کالکوپیریت، مولیبدنیت و تتراهدريت)، غنی‌شدگی سولفیدی ثانویه (کالکوسیت، کوولیت و بورنیت) و اکسیدی (ژاروسیت، گوتیت،

^۱- Artemisia

مالاکیت، آزوریت و هماتیت) است (طالبی، ۱۳۸۴).

۱-۷-۱- واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه

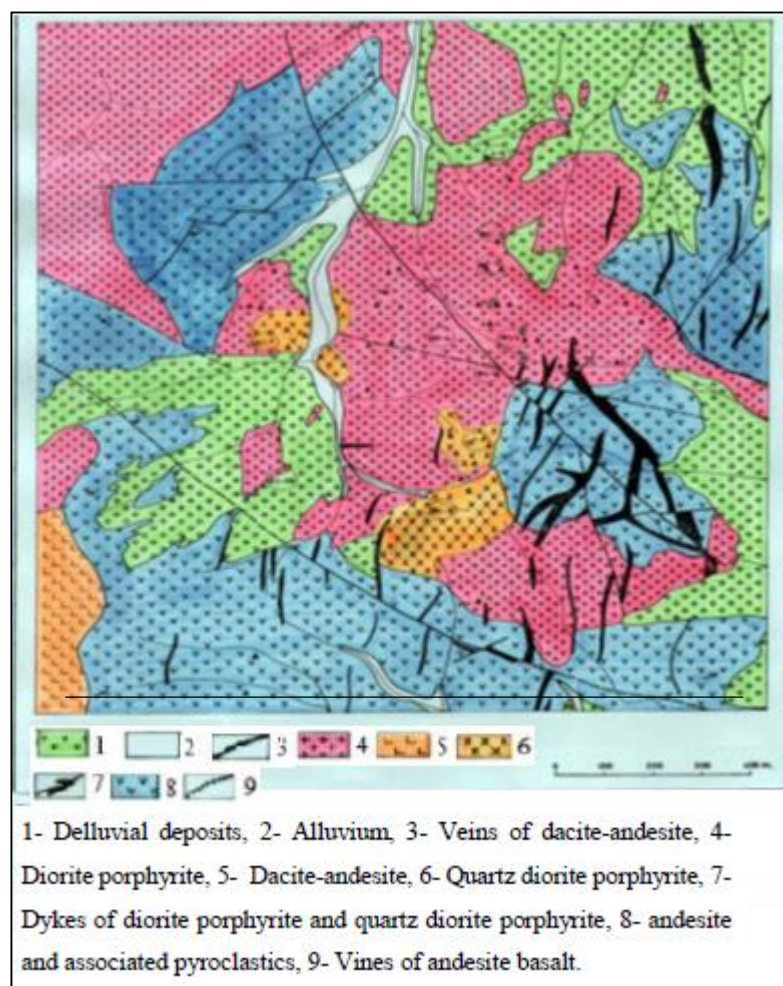
واحدهای لیتولوژیکی رخنمون یافته در منطقه ایجو، از قدیم به جدید عبارتند از (شکل ۱-۳):

۱-۷-۱-۱- سکانس پیروکلاستیک و ولکانیک‌های ائوسن

این سکانس مساحت زیادی از منطقه را به ویژه در قسمت‌های جنوب‌شرقی می‌پوشاند. سکانس مذکور عمدتاً دربردارنده پیروکلاستیک‌ها (توف‌ها، برش‌های آندزیتی و آگلومرا) است. آندزیت و آندزیت - بازالت‌ها به طور محلی و با گسترش جانبی و قائم محدود، در داخل سکانس پیروکلاستیک، رخنمون دارند (حیدری، ۱۳۸۷).

۱-۷-۱-۲- آندزیت‌ها (ائوسن)

آندزیت‌های منطقه با رنگ خاکستری - بنفش و با بافت پورفیری، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و کانی‌های دگرسان‌شده فرومنیزین، مشخص می‌شوند که با حضور الیوین و افزایش درصد کانی‌های فرومنیزین و پلاژیوکلازهای بازیک به سمت آندزیت - بازالت، متمایل می‌شوند. کانی‌های فرومنیزین‌دار، عمدتاً شامل آمفیبول و پیروکسن هستند. ترکیب کانی‌شناسی این واحد، شامل پلاژیوکلاز سدیم‌دار (آلبیت) و پتاسیم‌دار (ارتوکلاز)، هورنبلند، فنوکریست‌های (مینرال‌های درشت) پیروکسن، کوارتز، کلسیت، مسکویت، هماتیت، مالاکیت و زمینه دانه‌ریز تا میکروکریستالین است (طالبی، ۱۳۸۴).



شکل ۱-۳- نقشه زمین‌شناسی معدن ایجو با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۹۷۲)

۱-۷-۱-۳- آندزیت - بازالت‌ها (اؤسن)

این سنگ‌ها به رنگ تیره - خاکستری تا تقریباً سیاه و با بافت پورفیری با فلدسپارهای ریزدانه و کانی‌های فرومنیزین درشت بلور) مشخص می‌شوند. گرچه بخش‌های سالم در این واحد دیده شده اما آنها غالباً دگرسان شده‌اند و از کانی‌های اولیه، تنها اشکال بلوری، با کانی‌های ثانویه حفظ شده است. آندزیت - بازالت‌ها حاوی پیروکسن منوکلینیک، پلاژیوکلاز بازیک و الوین هستند (حیدری، ۱۳۸۷).

۱-۷-۱-۴- برش‌های توفی، برش‌های آندزیتی و آگلومرا (اؤسن)

معمول‌ترین سنگ‌ها در سکانس ولکانیکی اؤسن بوده و رنگی از خاکستری تا خاکستری تیره و بعضاً سبز یا بنفش دارند. این سنگ‌ها بندرت سالم باقی‌مانده و معمولاً کربناته، اکسیده، کلریده، اپیدوته و

سیلیسی شده‌اند. این سنگ‌ها دارای قطعات آلتره آندزیت و آندزیت - بازالت، متشکل از مقادیر متغیری فلدسپار، کوارتز (عمدتاً تیره)، کلریت، سرسیت، زوئیزیت، کربنات، لیمونیت و گاهی کانی‌های رسی هستند (حیدری، ۱۳۸۷).

۱-۷-۵- دیوریت، کوارتز دیوریت و تونالیت پورفیری (الیگوسن - میوسن)

این سنگ‌ها در بخش‌های مرکزی، شمال غربی و جنوب شرقی ناحیه رخنمون داشته و توده‌ای بزرگ با امتداد شمال غرب - جنوب شرق را به نمایش می‌گذارد. اختلاف این دو تیپ سنگ آذرین، در حضور یا غیاب کوارتز اولیه می‌باشد. کوارتز دیوریت پورفیری، نسبت به دیوریت و تونالیت گستردگی بیشتری دارد. این سنگ‌ها در ولکانیک‌های ائوسن، نفوذ کرده که بالطبع قطعات یا زینولیت‌های ولکانیکی فراوانی درون این نفوذی‌ها جای گرفته است (حیدری، ۱۳۸۷).

۱-۷-۶- داسیت - آندزیت‌های پلیوسن - پلیستوسن

این واحد که در غرب منطقه مورد مطالعه رخنمون دارد، ولکانیک‌های ائوسن و توده‌های نفوذی الیگومیوسن را قطع می‌کند و دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز است. زمینه این سنگ‌ها، از میکروولیت‌های فلدسپار، کلریت، کوارتز و کلسیت با مقداری معمول کوارتز ثانویه، تشکیل شده است. کانی‌های اپک، آپاتیت و زیرکن نیز بصورت فرعی در این سنگ‌ها، وجود دارند. به علت تغییرات قابل ملاحظه در مقدار کوارتز، این سکانس محدوده‌ای از آندزیت تا داسیت را شامل می‌شود.

۱-۷-۷- نهشته‌های کواترنری

این نهشته‌ها بخش‌های نسبتاً وسیعی از ناحیه موردنظر را می‌پوشانند و شامل نهشته‌های آبرفتی^۱ و دامنه‌ای^۲ هستند. رسوبات دامنه‌ای، قطعات سنگی با اندازه‌های متفاوت به همراه خاک دانه‌ریز است که در دامنه‌های کم‌شیب، گسترش یافته و در برخی قسمت‌ها ضخامت آن قابل توجه است. رسوبات آبرفتی،

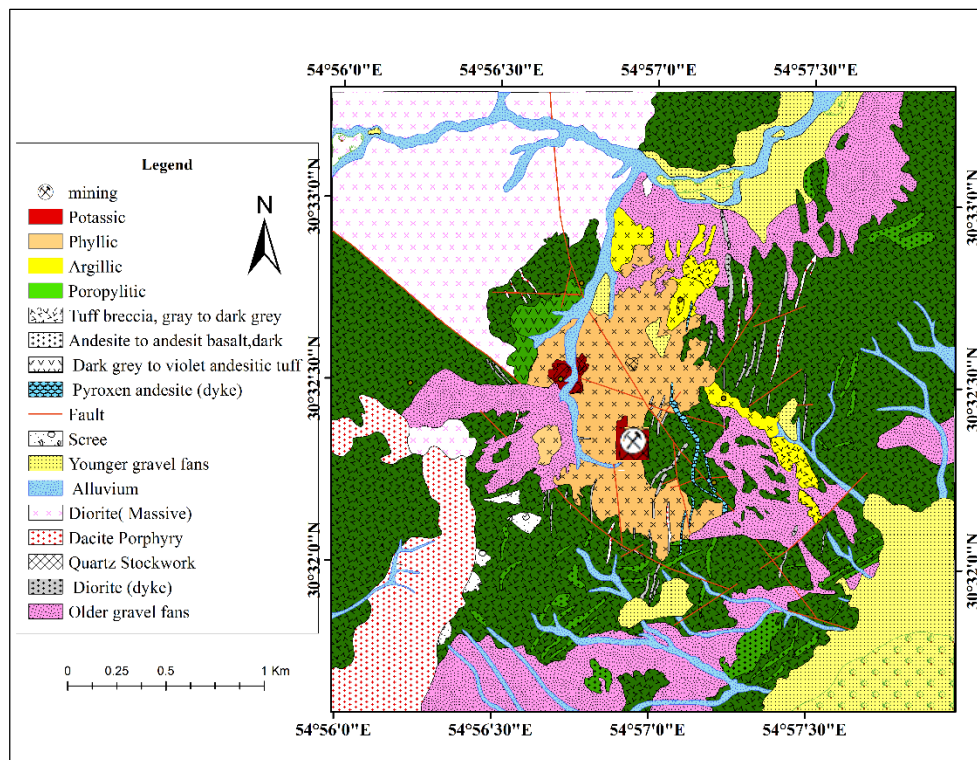
^۱- Alluvial

^۲- Colluvial

در امتداد آبراهه‌ها گسترش یافته و معمولاً ضخامت کمی دارد. این رسوبات به جز در امتداد رودخانه‌های دائمی و قسمت‌های شنی، جابجایی محدودی دارند.

۱-۷-۲- دگرسانی‌ها در معدن مس ایجو

طبق نظر حیدری (۱۳۸۷)، در منطقه ایجو دگرسانی‌ها علاوه بر توده‌های نفوذی ساب‌ولکانیک و سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری، در دایک‌های مرتبط با آنها نیز گسترش یافته، به طوری که مساحتی در حدود ۱ کیلومتر مربع را دربرمی‌گیرد. شکل ۴-۱، نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی‌های معدن مس ایجو را نشان می‌دهد.



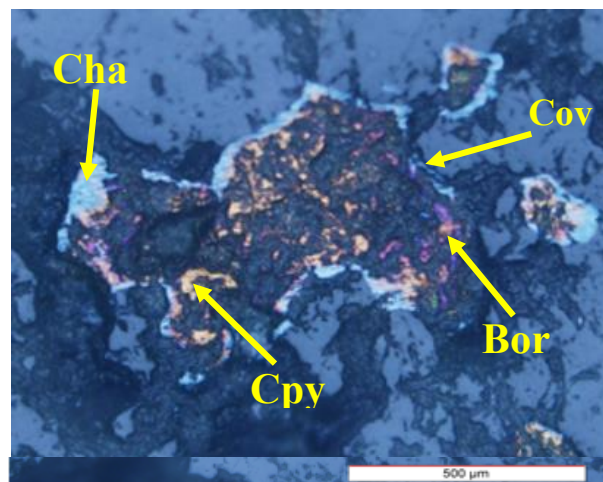
شکل ۴-۱- نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی‌های معدن مس ایجو (شرکت ملی صنایع مس، ۲۰۰۸)

۱-۷-۲-۱- دگرسانی پتاسیک

در دگرسانی پتاسیک (واقع در بخش مرکزی سیستم‌های مس پورفیری)، سنگ‌ها تحت تأثیر جانشینی پتاسیمی که همراه با از دست دادن سدیم و کلسیم است، قرار می‌گیرند. کانی‌های مشخصه این دگرسانی، شامل ارتوز، بیوتیت ثانویه، کوارتز و کانی‌های اپک شامل، مگنتیت، کالکوپیریت، بورنیت و

پیریت است (شکل ۵-۱). ضمن دگرسانی پتاسیک، فلدسپارهای قلیایی از پتاسیم غنی شده و بیوتیت ماگمایی به انواع گرمابی ثانویه غنی از منیزیم، تبدیل می‌شود. آهن آزاد شده از این واکنش، صرف تولید کانی‌های اپک می‌شود (Lowell and guilbert, 1970).

در منطقه ایجو، دگرسانی پتاسیک از شدت و گسترش کمی برخوردار بوده و اغلب با دگرسانی فیلیک همراه است. این دگرسانی در منطقه مورد مطالعه، به صورت واکنش‌های تبدیل هورنبلند و بیوتیت به بیوتیت ثانویه دیده می‌شود. در زون پتاسیک معدن ایجو، علاوه بر بیوتیت ثانویه که به صورت لکه‌های ریز قهوه‌ای جانشین کانی‌های فرومنیزین زمینه و بعضاً فلدسپارها شده، کلریت و کانه‌های مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت نیز مشاهده می‌شود (حیدری، ۱۳۸۷).

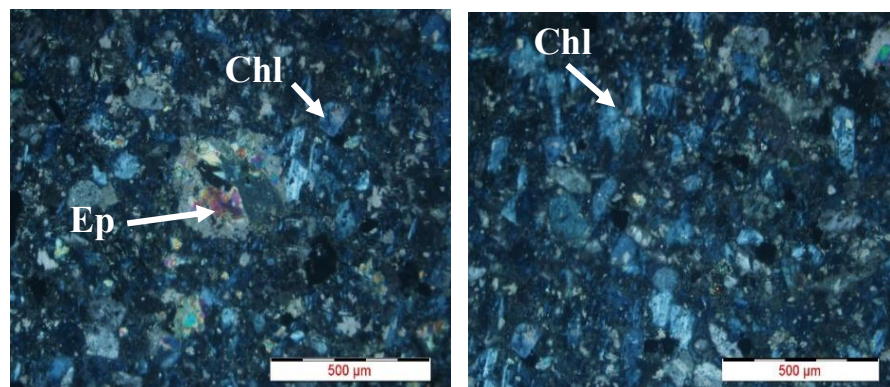


شکل ۵-۱- همراهی کالکوپیریت (Cpy) و بورنیت (Bor) در زون دگرسانی پتاسیک، که از اطراف به کولیت (Cov) و کالکوسیت (Cha) تبدیل شده است.

مگنتیت اغلب به صورت افشان و بندرت رگچه‌ای، در ماتریکس سیلیکاته دیده می‌شود و درصد آن در زون دگرسانی پتاسیک، نسبت به کانسارهای پورفیری شناخته شده کمتر است. کانه اصلی مس در این زون، کالکوپیریت بوده و به صورت افشان، رگچه‌ای و نیز به صورت آغشتگی‌هایی درون رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود. این زون که محل اصلی تجمع ماده معدنی است، بیشتر در سنگ‌های تونالیتی گسترش یافته است.

۱-۷-۲-۲- دگرسانی پروپلیتیک

این دگرسانی، توسط کانی‌های کلسیم و منیزیم‌دار و در نتیجه به وجود آمدن نظم دوباره در اجزاء تشکیل‌دهنده سنگ، مشخص می‌شود. کانی‌های اصلی این دگرسانی، کلریت، اپیدوت و کلسیت هستند. پتاسیم حاصل از کلریتی شدن بیوتیت، بصورت سرسیت درآمده و جزء آلبیتی مربوط به پلاژیوکلاز، ثابت باقی می‌ماند (شهاب‌پور، ۱۳۸۴). سولفیدهایی که همراه با این دگرسانی ممکن است یافت شوند شامل مقادیر ناچیزی پیریت و کالکوپیریت است. این دگرسانی، در خارجی‌ترین قسمت کانسارهای مس پورفیری قرار گرفته و از لحاظ زمان تشکیل همزمان با دگرسانی پتاسیک و تحت تأثیر آب‌های جوی - ماگمایی حاصل می‌شود (Beane and Titley, 1981). دگرسانی پروپلیتیک در منطقه ایجو، در سنگ‌های ولکانیک و پیروکلاستیک منطقه، رخ داده است. سنگ‌های آذرآواری و ولکانیکی دگرسان شده، اغلب بسیار دانه‌ریز بوده و حاوی رگه و رگچه‌های پیریت، کوارتز و کلسیت هستند. ماتریکس سنگ‌های مذکور به کلریت، کلسیت، سرسیت و اپیدوت تبدیل شده است (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶- کلریتی شدن زمینه سنگ به همراه بلورهای اپیدوت (دگرسانی پروپلیتیک)

۱-۷-۲-۳- دگرسانی پتاسیک - فیلیک

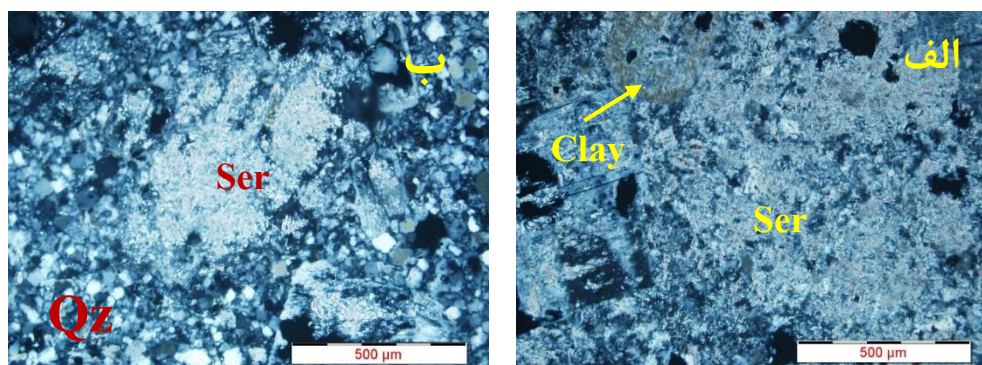
همانطور که قبلاً ذکر شد، دگرسانی پتاسیک در منطقه ایجو، اغلب با دگرسانی فیلیک همراه بوده و در واقع زون‌های دگرسانی فیلیک - پتاسیک نسبت به زون دگرسانی پتاسیک، حجم وسیع‌تری را در بر گرفته‌اند. این دگرسانی، در حقیقت از همپوشانی مجموعه کانیایی فیلیک بر روی دگرسانی پتاسیک تشکیل می‌شود. در این زون، پلاژیوکلاز به سرسیت و بعضاً کانی‌های رسی دگرسان شده و کانی‌های

فرومنیزین به بیوتیت ثانویه، سرسیت و روتیل دگرسان شده‌اند. بیشترین تجمع ماده معدنی در این منطقه و همچنین زون دگرسانی پتاسیک، صورت گرفته است (حیدری، ۱۳۸۷).

۱-۷-۲-۴- دگرسانی فیلیک

دگرسانی فیلیک یا سرسیتی، در نتیجه بیرون رانده شدن سدیم، کلسیم و منیزیم از سنگ‌های آلومینوسیلیکاته و ورود پتاسیم و یا مصرف پتاسیم مربوط به فلدسپارهای موجود در سنگ، برای تشکیل سرسیت حادث می‌شود. آهن حاصل از دگرسانی کانی‌های مافیک با آهن و گوگرد موجود در سیال گرمایی ترکیب و پیریت را تولید می‌نماید. کانی‌های مشخصه این دگرسانی شامل کوارتز، سرسیت و پیریت است (شهاب‌پور، ۱۳۸۴).

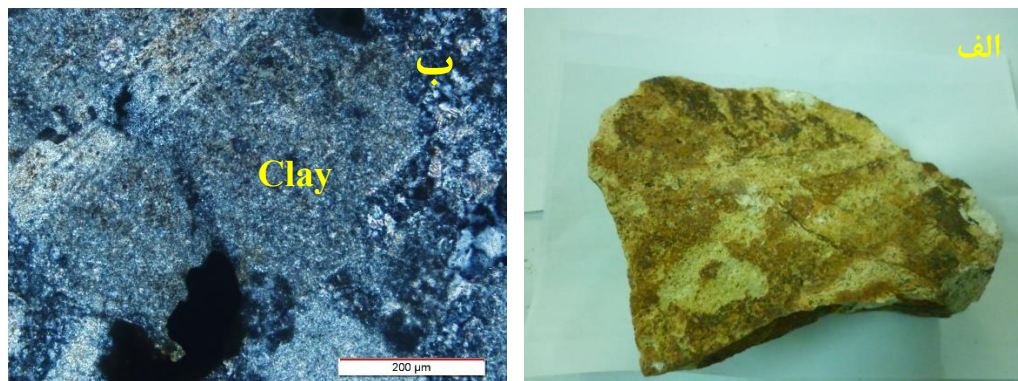
در منطقه ایجو، دگرسانی فیلیک با گسترش زیاد و با رنگ روشن، سنگ میزبان توده نفوذی (به‌خصوص کوارتزدیوریتی) را تحت تأثیر قرار داده است. به دلیل شدت قابل ملاحظه دگرسانی فیلیک، در توده نفوذی کوارتزدیوریتی ایجو، کانی‌های کوارتز، سرسیت و به مقدار کمتر پیریت تنها فازهای قابل مشاهده هستند. در مقاطع میکروسکوپی مطالعه شده، این دگرسانی به صورت تبدیل پلاژیوکلاز و کانی‌های فرومنیزین به سرسیت (شکل ۷-۱، الف) و بعضاً مسکویت و همراه با کانی‌های کوارتز ثانویه، پیریت و کلریت دیده می‌شود. مهم‌ترین کانه سولفیدی در این منطقه، پیریت بوده که غالباً به صورت افشان دیده می‌شود. تغییر از دگرسانی پتاسیک - فیلیک به دگرسانی فیلیک، با افزایش در مقادیر سرسیت و کوارتز همراه است (شکل ۷-۱، ب). کانی‌سازی اقتصادی در این زون، غالباً ضعیف و به صورت افشان است.



شکل ۷-۱- الف) رسی شدن و سرسیتی شدن پلاژیوکلاز (ب) کوارتز و سرسیت فراوان (شاخص دگرسانی فیلیک)

۱-۷-۲-۵- دگرسانی آرژلیک

در حین تشکیل این دگرسانی، شرایط اسیدی بوده و تمام کاتیون‌های قلیایی، به صورت ناقص یا کامل از سنگ خارج می‌شوند که به ترتیب، دگرسانی آرژلیک حدواسط یا پیشرفته نام‌گذاری می‌شوند. این دگرسانی توسط کانی‌های رسی مشخص شده (شکل ۸-۱، الف) و کانی سولفیدی اصلی که با این دگرسانی یافت می‌شود، پیریت است (شهاب‌پور، ۱۳۸۴). در منطقه مورد مطالعه، دگرسانی آرژلیک گسترش محدودی داشته و اغلب با دگرسانی فلیک به صورت مقطعی و معمولاً در سطح زون‌های گسلی (درز و شکاف‌ها)، مشاهده می‌شود. در ضمن تشکیل این دگرسانی، پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی تبدیل شده و در مقاطع میکروسکوپی، به رنگ قهوه‌ای تا گلی دیده می‌شوند (شکل ۸-۱، ب). این دگرسانی، توده نفوذی را تحت تأثیر قرار داده و با کانی‌های رسی، سرسیت، کلریت و کلسیت، مشخص می‌شود.



شکل ۸-۱- نمونه (الف) ماکروسکوپی و (ب) میکروسکوپی (رسی شدن پلاژیوکلازها) از دگرسانی آرژلیک

۱-۷-۳- کانه‌زایی در معدن ایجو

کانه‌زایی در منطقه ایجو، غالباً به شکل افشان (Disseminated) و رگچه‌ای (Veinlets and Stock work) دیده می‌شود. کانی‌سازی مس در معدن ایجو، عمدتاً در استوک پورفیری و سنگ‌های آندزیتی دیواره رخ داده و فاز نفوذی تأخیری و دایک‌ها را می‌توان تقریباً عاری از کانی‌سازی در نظر گرفت (طالبی، ۱۳۸۴). کانه‌هایی که می‌توان در نمونه‌های دستی و نیز مقاطع میکروسکوپی تشخیص داد عبارتند از: کانه‌های مس (کالکوپیریت (CuFeS_2) ، کالکوسیت (Cu_2S) ، مالاکیت $(\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2)$

و کریزوکولا ($\text{CuSiO}_3 + n\text{H}_2\text{O}$)، کانه‌های آهن (پیریت، هماتیت، ژاروسیت، گوتیت و مگنتیت) و کانی‌هایی نظیر روتیل، مولیبدنیت، بورنیت و کوولیت که در ذیل هر یک به تفصیل، شرح داده می‌شوند:

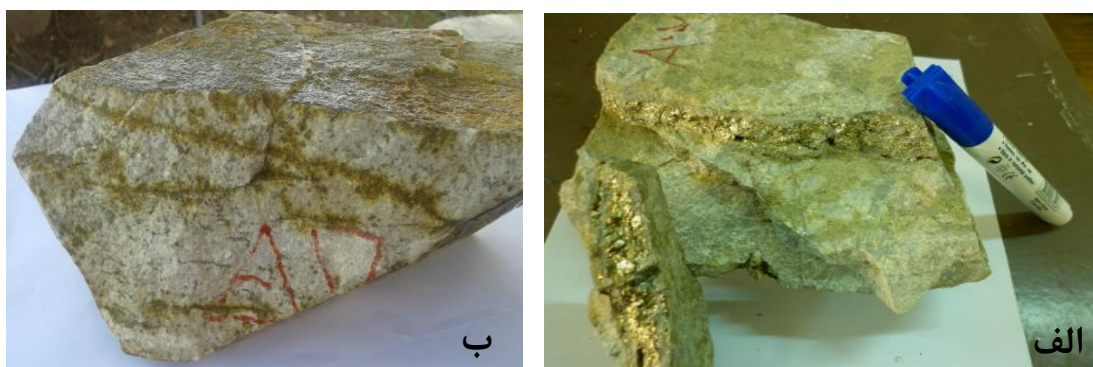
۱-۳-۷-۱- کانه زایی ژرف‌زاد (هیپوژن)

این نوع کانسارسازی که در نتیجه تأثیر سیالات ماگمایی - گرمابی کانه‌دار تشکیل می‌شود، در منطقه ایجو، به صورت استوک‌ورک و شکستگی‌های آغشته به آهن و مالاکیت، مشاهده می‌شود. کانی‌های درون‌زاد، به ترتیب کاهش فراوانی شامل پیریت، کالکوپیریت و مولیبدنیت است. مهم‌ترین کانی‌های این کانی‌سازی عبارتند از:

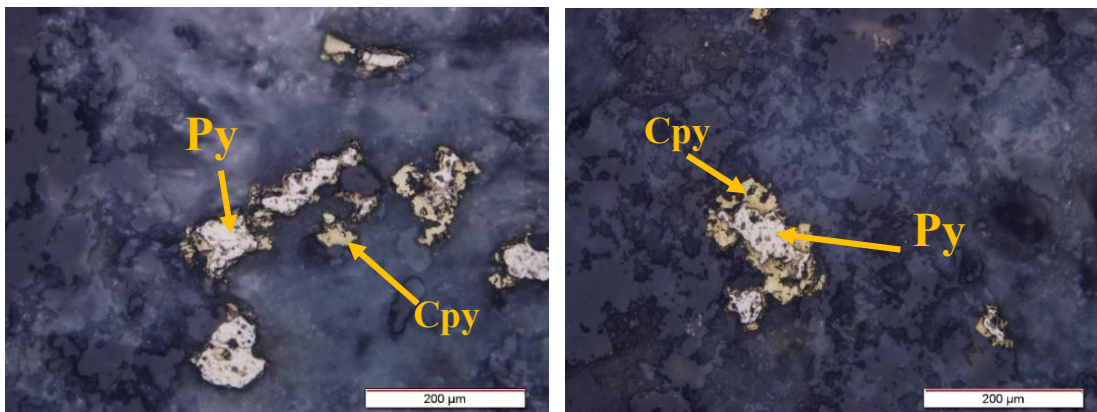
پیریت: فراوان‌ترین کانی سولفیدی اولیه در منطقه و به عنوان اولین کانی فاز فلززایی درون‌زاد، محسوب می‌شود. پیریت در سیستم‌های رگه‌ای و استوک‌ورک (شکل ۱-۹، الف و ب) به صورت منفرد و نیز با کانی‌های کوارتز و ژیپس، همراه است.

کالکوپیریت: با رنگ زرد متمایل به سبز، در نمونه‌های دستی، فراوان‌ترین کانه مس‌دار در منطقه است که هم به صورت اولیه و هم ثانویه تشکیل می‌شود و در مقایسه با پیریت، عمدتاً به صورت افشان و کمتر به صورت رگچه‌ای یافت می‌شود (شکل ۱-۱۰).

مولیبدنیت: که مرتبط با کانسارسازی هیپوژن می‌باشد در ایجو کمیاب بوده، به طوری که عیار مولیبدن در منطقه حدود 25 mg/kg است (حیدری، ۱۳۸۷).



شکل ۱-۹- (الف) رگه و رگچه‌هایی که از پیریت پر شده‌اند و (ب) کانی‌سازی استوک‌ورک



شکل ۱-۱۰- پیریت به همراه کالکوپیریت در زمینه سیلیکاتی

روتیل: یک نوع کانی ثانویه حاصل از دگرسانی کانی‌های فرومنیزین است. این کانی در محل تشکیل کانی‌های فرومنیزین، به صورت تجمعات دانه‌ریز مشاهده می‌شود. این کانی بعضاً به صورت ادخال‌هایی درون کانی‌های پیریت و کالکوپیریت دیده می‌شود.

مگنتیت: یکی از کانی‌های اپک است که با آلتراسیون پتاسیک و کانی‌های ارتوز و بیوتیت ثانویه همراه است. از آنجائیکه این کانی، در شرایط سطحی پایدار نیست؛ لذا بندرت در زون‌های هوازده دیده می‌شود. مگنتیت نسبت به سایر کانی‌های هیپوژن کمتر دیده شده و اغلب به صورت افشان و بندرت رگچه‌ای در ماتریکس سیلیکاته دیده می‌شود (حیدری، ۱۳۸۷).

۱-۷-۳-۲- کانه‌زایی برون‌زاد (سوپرژن)

این نوع کانه‌زایی، حاصل دگرسانی سوپرژنی است که توسط سیالات جوی فرو رو ایجاد می‌شود. در بالای سفره آب زیرزمینی و تحت شرایط اکسیداسیون، پیریت و سایر کانی‌های سولفیدی، به اسید سولفوریک و اسید کربنیک تبدیل می‌شوند. آب‌های فرو رو نیز به واسطه این ترکیبات، قدرت انحلال بالایی پیدا کرده و باعث انحلال کانی‌های مس‌دار در طول مسیر خود می‌شود. این محلول به محض رسیدن به یک محیط احیایی، شروع به ته‌نشینی کانی‌های ثانویه مس‌دار (مانند کالکوسیت، کالکوپیریت) نموده و ایجاد یک محیط غنی‌سازی سولفیدی می‌کند.

در معدن ایجو، کانسارسازی سوپرژن گسترش چندانی نداشته و معمولاً در اعماق ۴۰ تا ۱۲۰ متری و

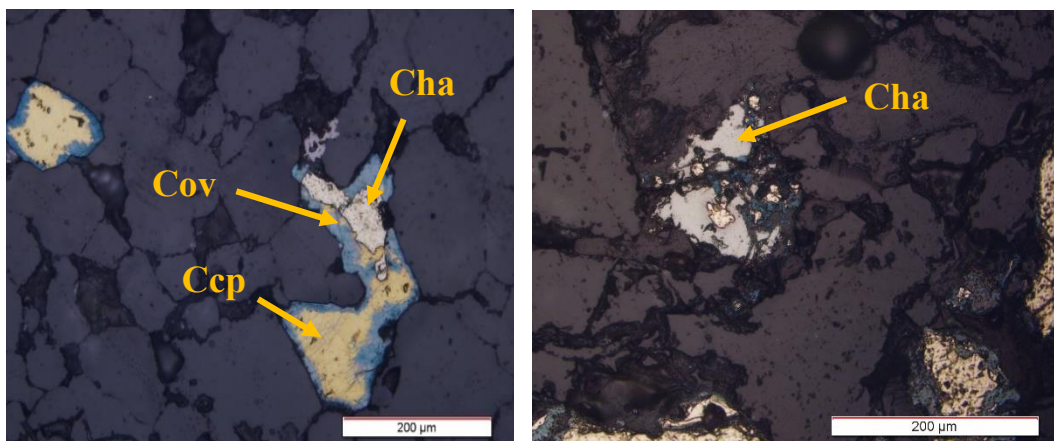
به صورت محلی (local) تشکیل می‌شود. البته گاهی این کانه‌زایی تا اعماق ۱۷۰ متری نیز ادامه می‌یابد. هم‌پوشانی زون‌های اکسیدی - سوپرژن و سوپرژن - هیپوژن در معدن ایجو معمول است (شکل ۱-۱۱). کانی‌های شاخص این نوع کانه‌زایی، علاوه بر کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت و بورنیت را نیز شامل می‌شود (حیدری، ۱۳۸۷).



شکل ۱-۱۱- تفکیک منطقه اکسیدی و سوپرژن (غنی‌شده) در منطقه ایجو (تحت تأثیر پدیده گسلش)

کالکوسیت: این کانی نسبت به سایر کانی‌های ثانویه مس، از فراوانی بیشتری برخوردار است. با توجه به خصوصیات ظاهری آن (پور مانند و خاکستری سربی)، جانشینی آن توسط کالکوپیریت و عیار کم مس در منطقه، احتمالاً فقط به صورت ثانویه تشکیل شده است. این کانی در نمونه دستی، پودر مانند و به رنگ سیاه براق تا خاکستری سربی بوده و بعضاً به صورت افشان و رگه و رگچه‌ای است (شکل ۱-۱۲).

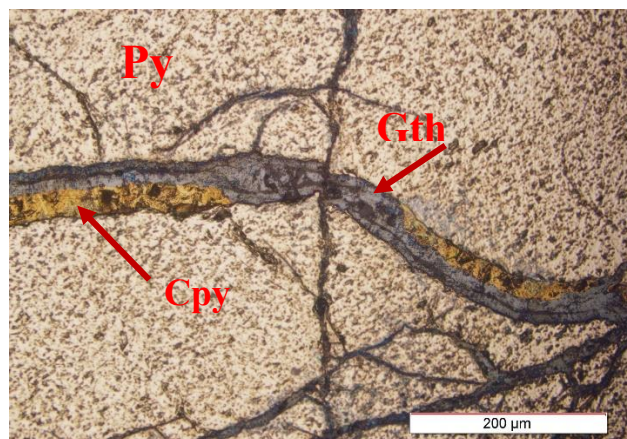
کوولیت و بورنیت: این دو کانی در معدن ایجو کمیاب بوده و به صورت ثانویه تشکیل می‌گردند. مطالعه مغزه‌ها، حضور کانی بورنیت را نشان داده که با رنگ‌های قوس و قزحی ارغوانی تا آبی مشخص می‌شود. کوولیت در نمونه دستی دارای یک رنگ آبی نیلی است. این کانی، معمولاً پیرامون دانه‌های کالکوپیریت یافت می‌شود که حاصل فرایند آلتراسیون است (شکل ۱-۱۲).



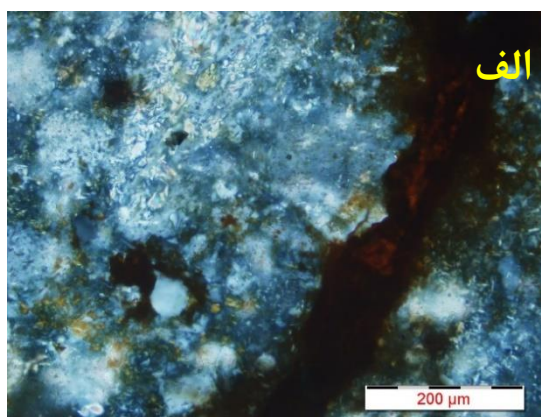
شکل ۱-۱۲- جانشرینی کالکوپیریت توسط کوولیت و کالکوسیت

۱-۷-۳- منطقه هوازده (اکسیدان)

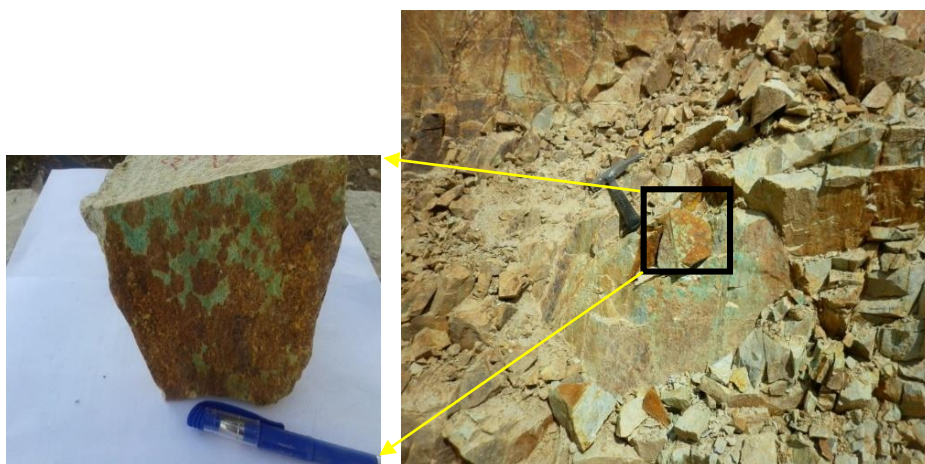
در سطح منطقه مورد مطالعه، به دلیل شدت فرایندهای اکسیداسیون، زون هوازده به شکل کلاhek آهنین (Gossan) و پوشش‌هایی از مالاکیت ظاهر می‌شود. منطقه فروشست که به خوبی در منطقه گسترش پیدا کرده، با افزایش کانی‌های اکسید آهن و کاهش کانی‌های سولفیدی همراه است و در سطح منطقه به صورت کلاhek آهنی متشکل از کانی‌های ژاروسیت، هماتیت و گوتیت دیده می‌شود (شکل ۱-۱۳). همچنین کانی‌های اکسید آهن حاصل از اکسیداسیون پیریت و کالکوپیریت در منطقه، به شکل رگه و رگچه‌های نامنظم در سنگ‌های نفوذی آلتزه شده، پراکنده شده‌اند (شکل ۱-۱۴، الف و ب). در این زون اغلب رگه و رگچه‌های اولیه پیریت و بعضاً کالکوپیریت، اکسیده شده و مس به زون‌های پایین‌تر، مهاجرت نموده است. در گوسان‌های منطقه، کانی ژاروسیت به رنگ زرد خردلی در رگچه‌ها و زمینه سنگ دیده می‌شود. هماتیت به رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز و گوتیت به رنگ قرمز متمایل به نارنجی به همراه ژاروسیت، کانی‌های اکسیدی گوسان را تشکیل می‌دهند. کانی‌های مذکور به صورت یک لایه هوازده روی سنگ‌های کوارتز دیوریتی تشکیل شده‌اند. کانی‌های اکسیدی آهن، به صورت افشان و رگچه‌ای در منطقه یافت می‌شوند. سنگ‌های زون اکسیدان در ایجو، غنی از مس هستند و کانی‌های مالاکیت و کریزوکولا در آنها توسعه یافته‌اند. فراوان‌ترین کانی اکسیدی، مالاکیت می‌باشد که به رنگ سبز کم‌رنگ تا سبز - آبی و اغلب با بافت رگه و رگچه دیده می‌شود (شکل ۱-۱۵).



شکل ۱-۱۳۳- هوازدگی رگه اولیه کالکوپیریت و تبدیل آن به گوتیت در زمینه‌ای از پیریت



شکل ۱-۱۴۴- (الف) رگه اکسید آهن حاصل از اکسیداسیون پیریت (ب) دگرسانی زون اکسیدی با رگه و رگچه‌های اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن



شکل ۱-۱۵۵- حضور گسترده کانی مالاکیت در زون اکسیدی معدن مس ایجو

فصل دوم

مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه

این فصل، ابتدا به کلیاتی در مورد کانسارهای مس پورفیری، تعریف خاک و فرایندهای تشکیل آن، فلزات سنگین و نحوه حضور آنها در خاک و گیاه، همچنین نحوه حضور فلزات سنگین در اجزاء خاک آورده می‌شود و سپس به مطالعات و تحقیقات انجام شده در ارتباط با موضوع مورد مطالعه در ایران و جهان، اشاره خواهد شد.

۲-۲- کلیاتی در مورد کانسارهای مس پورفیری

ذخایر مس پورفیری، کانسارهای استوک‌ورک تا افشان بزرگ و کم عیار مس هستند که ممکن است حاوی مقادیر ناچیز اما قابل بازیافت مولیبدن، طلا و نقره نیز باشند. استخراج انتخابی در این معادن امری ناممکن است و سنگ میزبان، استوک‌ورک و کانه‌زایی افشان باید یکجا استخراج شوند و از این راه برخی از بزرگ‌ترین حفره‌های ساخت بشر در پوسته زمین ایجاد شده است (Evans, 2009).

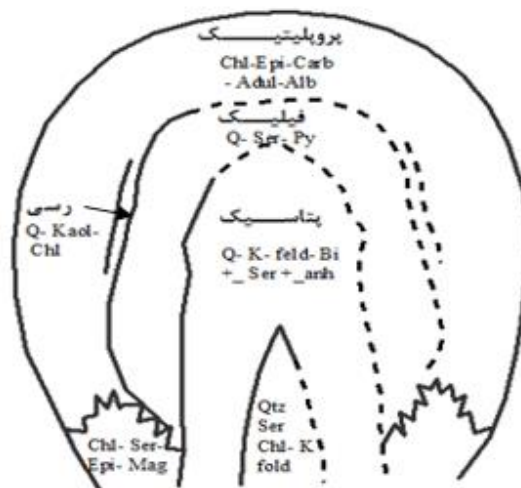
یک کانسار تیپیک مس پورفیری، توده نفوذی مرکب، استوانه‌ای و استوک‌مانندی است که رخنمونی کشیده یا نامنظم با ابعادی حدود 1.5×2 کیلومتر دارد و اغلب، سنگ‌هایی متوسط دانه با بافتی همسان دانه آن را در بر می‌گیرد. رایج‌ترین سنگ‌های میزبان این ذخایر، سنگ‌های آذرین درونی اسیدی از خانواده گرانیت با ترکیبی از گرانیت به سمت گرانودیوریت تا تونالیت، کوارتزمونزونیت و دیوریت است. در هر حال سنگ‌هایی با ترکیب دیوریت تا مونزونیت (به ویژه کوارتزمونزونیت) تا سینیت (گاه آلکالی سینیت) نیز سنگ‌های میزبان مهم محسوب می‌شوند. وجود وقایع مکرر نفوذی، در مناطق دارای کانه‌زایی مس پورفیری، امری عادی بوده و توده‌های میزبان کانه‌زایی، معمولاً جوان‌ترین بوده و بیشترین تفکیک را از خود بروز می‌دهند. توده‌های نفوذی میزبان، بیشتر به آرامی در بخش‌های بالاتر پوسته مستقر می‌شوند، تا از راه ایجاد فشار و کنار زدن سنگ‌ها، اثر خود را اعمال نمایند (Evans, 2009).

۲-۲-۱- دگرسانی و کانی‌سازی در کانسارهای مس پورفیری

به طور کلی، به کلیه تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که تحت تأثیر آب‌های ماگمایی و یا گرمابی در

سنگ‌ها ایجاد می‌شود، دگرسانی گفته می‌شود. گسترش و شدت دگرسانی به عوامل مختلفی از جمله، حجم محلول‌های ماگمایی، ساختمان‌های اولیه و ثانویه مفید، واکنش‌پذیری سنگ‌ها، دما و فشار محلول بستگی دارد. آلتراسیون در کانسارهای رگه‌ای محدود به رگه است، حال آنکه در کانسارهای پورفیری منطقه وسیعی را در برمی‌گیرد (کریم‌پور و سعادت، ۱۳۸۴).

لاول و گیلبرت (Lowell and Guilbert, 1970) با مطالعه ۲۸ کانسار مس پورفیری یک مدل ارائه دادند که بر اساس این مدل، عموماً ۴ منطقه دگرسانی در اطراف کانسارهای مس پورفیری وجود دارد. این زون‌ها، بیشتر در اطراف استوک پورفیری به صورت مناطق هم‌محوری که پوسته‌هایی هم‌مرکز و اغلب ناکامل را می‌سازند، متمرکز می‌شوند و در بیشتر موارد نیز در اکتشاف ذخایر مس پورفیری، به عنوان یک راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرند (Evans, 2009). این مناطق در مدل لاول-گیلبرت به ترتیب از داخل به سمت خارج عبارتند از: منطقه پتاسیک، منطقه فلیک، منطقه آرژیلیک، منطقه پروپلیتیک (شکل ۱-۲).



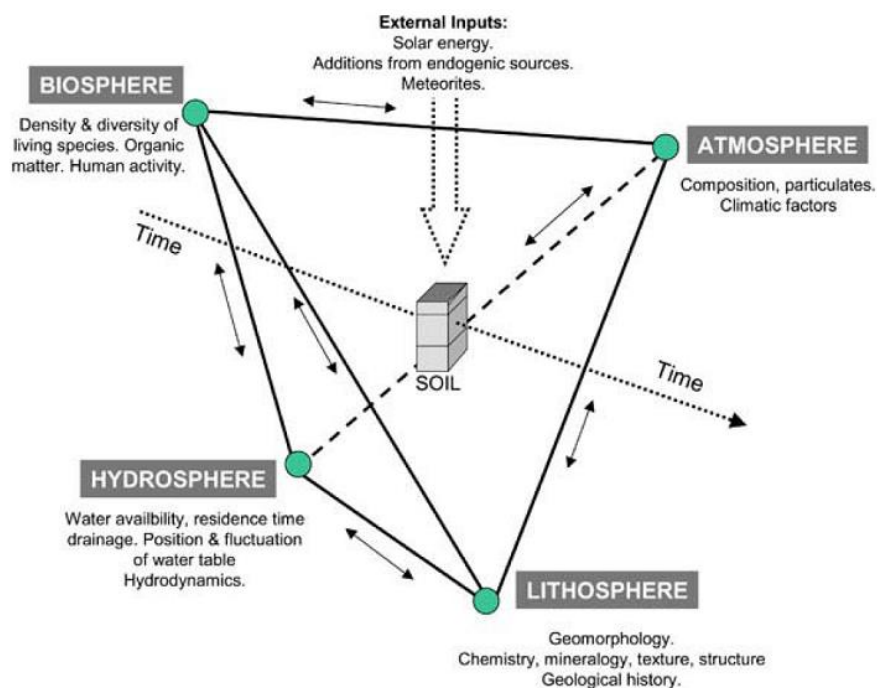
شکل ۱-۲ ساخت منطقه‌ای در دگرسانی‌های موجود در یک کانسار مس پورفیری (Lowell and Guilbert, 1970)

در کانسارهای مس پورفیری مدل دیوریتی مناطق دگرسانی از داخل به خارج شامل: زون پتاسیک و زون پروپلیتیک است. منطقه دگرسانی در توده نفوذی و اطراف آن با حضور بیوتیت ثانویه یا فلدسپار پتاسیم (دگرسانی پتاسیک) و به سمت خارج با کوارتز و سرسیت (دگرسانی فلیک)، کانی‌های رسی

(آلتراسیون آرژلیک) و سپس کلریت، اپیدوت، آلبیت، کربنات (دگرسانی پروپلیتیک) شناخته می‌شود (شهاب‌پور، ۱۳۸۴).

۲-۳- تعریف خاک

خاک ترکیبی پیچیده و پویا است که در اثر عملکرد توأم لیتوسفر، اتمسفر، هیدروسفر و بیوسفر ایجاد می‌شود (شکل ۲-۲). خاک همچنین محیطی برای رشد گیاهان است که مهم‌ترین پشتوانه اکوسیستم و زنجیره غذایی موجودات زنده به حساب می‌آید. در یک نگاه کلی، خاک مجموعه‌ایس ناهمگن متشکل از یک فاز جامد (شامل کانی‌ها و مواد آلی) و یک فاز مایع (شامل آب) و گاز است (Bradl, 2005). این بخش از بیوسفر، به عنوان یک بافر کننده طبیعی، ذخیره‌کننده، انتقال‌دهنده و کنترل‌کننده عناصر شیمیایی عمل کرده و مهم‌ترین نقش آن تولیدکنندگی یا باروری است. بنابراین حفاظت و نگهداری از خاک از نظر زیست‌محیطی، اهمیت زیادی برای بقای بشر دارد (Kabata-Pendias, 2011).



شکل ۲-۲- نقش بیوسفر، لیتوسفر، اتمسفر و هیدروسفر، در تشکیل خاک (Chesworth, 2008)

۲-۴- فرایندهای تشکیل خاک

خاک محصول هوازدگی پوسته جامد زمین است که تحت تأثیر عوامل و فرایندهای مختلف تشکیل

می‌شود. به طور کلی عوامل مؤثر در تشکیل خاک عبارتند از:

الف) عوامل فیزیکی: این عوامل در اولین مرحله از تشکیل خاک، فعال هستند و موجب خردشدن سنگ‌ها و تبدیل آنها به قطعات کوچک‌تر می‌شوند (بدون تغییر در خواص شیمیایی). برخی از مهم‌ترین عوامل فیزیکی عبارتند از: یخبندان و فشار مکانیکی ریشه گیاهان.

ب) عوامل شیمیایی: در اثر عوامل شیمیایی، جنس مواد و خواص شیمیایی سنگ‌ها و کانی‌ها تغییر می‌نماید. مهم‌ترین عوامل شیمیایی عبارتند از: هیدرولیز، هیدراسیون (آبگیری)، فرایندهای اکسیداسیون - احیا، انحلال.

ج) عوامل زیستی: از جمله این عوامل می‌توان به فعالیت موجودات ریز و درشت در خاک، از قبیل جلبک‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها اشاره کرد.

د) زمان: زمان لازم برای تشکیل خاک، بسیار طولانی است و بستگی به نوع و ماهیت مواد مادری، نوع اقلیم و شکل زمین دارد (واروی پور، ۱۳۸۹).

۲-۵- فلزات سنگین و حضور آنها در خاک

تعریف فلزات سنگین در متون علمی، متفاوت است. به طور کلی عناصر با عدد اتمی بیشتر از ۲۰ و چگالی بیشتر از ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (به استثناء فلزات قلیایی و قلیایی خاکی) را فلز سنگین می‌نامند (Sherene, 2010). از جمله این فلزات، می‌توان به کادمیوم، سرب، آهن، نیکل، روی، منگنز، مس و کروم اشاره کرد. البته برخی عناصر مانند آرسنیک و مولیبدن به عنوان شبه فلز شناخته می‌شوند که خواص هر دو گروه فلزات و نافلزات را دارا هستند. مشکلات زیست‌محیطی ناشی از فلزات سنگین در محیط، ناشی از پایداری آنها در محیط‌زیست است؛ چرا که آنها بر خلاف آلاینده‌های آلی یا پرتوزا، غیرقابل تجزیه هستند (Takac et al., 2009) و به دلیل ماهیت نسبتاً بی‌حرک خود، برخی از این فلزات به صورت مداوم در خاک حضور دارند (Sherene, 2010). این فلزات پس از ورود به بدن جانداران در بافت‌های بدن موجودات زنده، مجتمع شده و در غلظت‌های بسیار بیشتری در سطوح بالاتر زنجیره

غذایی، انباشته می‌شوند.

۲-۵-۱- منشأ فلزات سنگین در خاک

از میان آلاینده‌های مختلف خاک، فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین و پایدارترین آلاینده‌ها محسوب می‌شوند. این فلزات می‌توانند از هر دو منشأ طبیعی و انسانزاد به محیط‌زیست (به ویژه به محیط خاک) وارد شوند.

۲-۵-۱-۱- منشأ انسانزاد فلزات سنگین

آلودگی در سیستم خاک به شدت وابسته به فعالیت‌های بشری مانند صنعت، کشاورزی، احتراق سوخت-های فسیلی، معدنکاری و صنایع وابسته به آن و حمل و نقل است. در جدول ۱-۲ به طور خلاصه مهم‌ترین منابع انسانزاد ورود برخی عناصر به محیط‌زیست از جمله خاک، آورده شده است.

جدول ۱-۲- مهم‌ترین منابع انسانزاد عناصر شناخته شده، با اثرات مخرب بر روی زیست‌کره (Selinus et al., 2005)

عناصر	منبع
آنتیموان	معدنکاری، ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی
آرسنیک	معدنکاری، ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، فولاد سازی، تولید انرژی گرمایی، کودهای فسفاته، آفت‌کش‌ها
کادمیم	معدنکاری، ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، کودهای فسفاته، لجن فاضلاب، وسایل نقلیه موتوری
کروم	ذوب، فولادسازی، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، کودهای فسفاته، لجن فاضلاب
کبالت	معدنکاری، ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی
مس	معدنکاری، ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، کودهای کشاورزی، لجن فاضلاب، آفت‌کش‌ها
سرب	کودهای کشاورزی، لجن فاضلاب، آفت‌کش‌ها، وسایل نقلیه موتوری
جیوه	ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، لجن فاضلاب
نیکل	معدنکاری، ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، فولادسازی، پالایش نفت، لجن فاضلاب، وسایل نقلیه موتوری
سلنیوم	ذوب، سوزاندن سوخت‌های فسیلی
روی	معدنکاری، ذوب، فولادسازی، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، کودهای فسفاته، آفت‌کش‌ها، وسایل نقلیه موتوری، آبکاری فلزات

۲-۵-۱-۲- منشأ طبیعی فلزات سنگین

یکی از منابع آلوده کننده خاک، هوازدگی سنگ‌ها و کانی‌ها است. کانی‌سازی و دگرسانی‌ها از جمله فرایندهای طبیعی هستند که تغییرات ترکیبی و کانی‌شناسی مهمی در سنگ اولیه ایجاد می‌کنند. تجزیه و هوازدگی این سنگ‌ها باعث رهاسازی و ورود فلزات سنگین به درون خاک می‌شوند و در نتیجه می‌توانند آلودگی‌های طبیعی شدیدی را به وجود آورند. آلودگی خاک توسط فلزات سنگین، باعث کاهش کیفیت و سلامت خاک می‌شود که در نتیجه بر سلامت گیاه و انسان، اثر می‌گذارد. در جدول ۲-۲ میانگین غلظت برخی عناصر جدول تناوبی، در سنگ‌های آذرین و رسوبی و همچنین خاک‌ها آورده شده است.

جدول ۲-۲- میانگین غلظت عناصر کمیاب (mg/kg) در سنگ‌های آذرین، سنگ‌های رسوبی و خاک‌ها (Kabata-Pendias, 2011)

عنصر	سنگ‌های آذرین	سنگ‌های رسوبی	خاک‌ها
Mn	۹۵۰	۶۷۰	۸۵۰
Cr	۱۰۰	۱۶۰	۲۰۰
Zn	۷۰	۸۰	۵۰
Cu	۵۵	۵۷	۲۰
Pb	۱۲	۲۰	۱۰
Sn	۲	۳۰	۱۰
B	۱۰	۱۲	۱۰
Co	۲۵	۲۳	۸
Be	۳	۳	۶
As	۲	۷	۵
Mo	۱/۵	-	۲
Cd	۰/۲	۰/۳	۰/۵
Ag	۰/۰۷	۰/۹	۰/۱
Se	۰/۰۵	۰/۶	۰/۰۱
Hg	۰/۰۸	۰/۴	۰/۰۱

۲-۶- گیاهان و حضور فلزات سنگین در آنها

خاک محیطی منحصر به فرد برای زندگی انواع حیات، به‌ویژه گیاهان است. گیاهان می‌توانند فلزات را

از آب، خاک و هوا جذب کنند، ولی بیشترین مقدار جذب از طریق خاک صورت می‌گیرد. جذب از طریق خاک، نه تنها به غلظت کل فلز، بلکه به میزان دسترس‌پذیری آن نیز بستگی دارد. غلظت کل فلز در خاک، خود متأثر از سنگ منشأ اولیه و فعالیت‌های انسان‌زاد است. به طور کلی می‌توان میزان جذب عناصر جزئی توسط گیاه را به صورت زیر خلاصه نمود (Kabata-Pendias, 2011):

Ti, Sn, Cr, Ag, Y: این عناصر به آرامی در محلول خاک حل می‌شوند و به راحتی در دسترس گیاه قرار نمی‌گیرند.

F, Pb, Hg, As: این عناصر توسط ذرات خاک به صورت نسبتاً قوی جذب شده و به راحتی به سمت بالا و بخش‌های زمینی گیاه منتقل نمی‌شوند.

Ni, Mn, Cu, Co, B: این عناصر در خاک متحرک‌اند و به راحتی توسط گیاه جذب می‌شوند.

Zn, Se, Cd: این عناصر در خاک بسیار متحرک‌اند و به راحتی توسط گیاهان زیست‌انباشت می‌شوند گیاهان به صورت مخازنی عمل می‌کنند که عناصر کمیاب را دریافت کرده و سپس آنها را به انسان و حیوانات منتقل می‌کنند (Kabata-Pendias, 2011).

۷-۲- زیست‌دسترس‌پذیری^۱

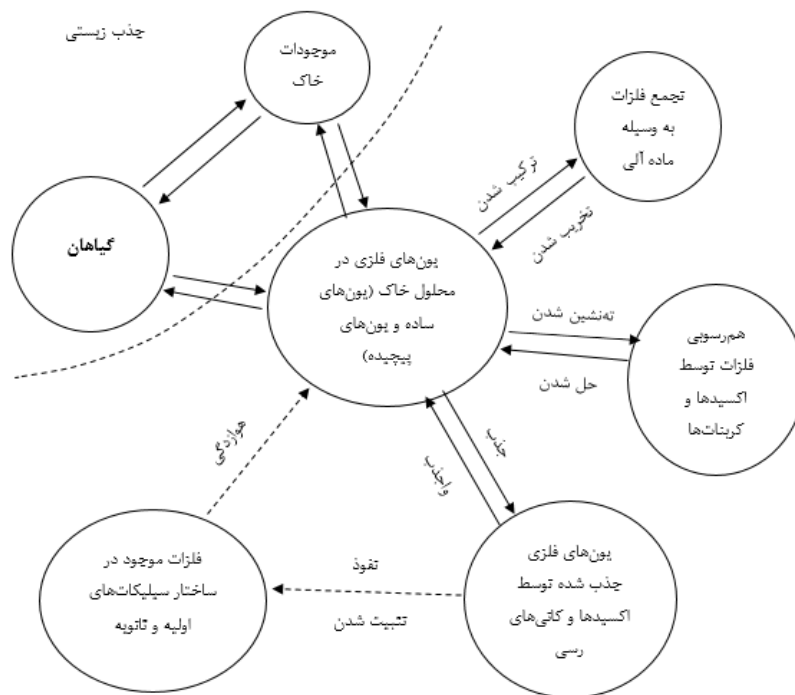
اثرات زیست‌محیطی ناشی از فلزات سنگین در خاک، وابسته به غلظت کل آنها نیست، بلکه به میزان تحرک و دسترس‌پذیری آنها نیز وابسته است، که در نتیجه بر آزاد شدن آنها و ورود به دیگر اجزاء اکوسیستم مانند آب، هوا و گیاهان اثر می‌گذارد (Abollino et al., 2005). زیست‌دسترس‌پذیری، تحرک‌پذیری^۲ و به عبارتی سرنوشت فلزات در خاک، به شکل و نحوه رخداد آنها در محیط خاک بستگی دارد (Kabata Pendias and Pendias, 2001). در شکل ۲-۳ مهم‌ترین شکل‌های ژئوشیمیایی رخداد عناصر نشان داده شده است.

¹- Bioavailability

²- Mobility

۲-۷-۱- جزء تبادل پذیر / کاتیون های حل شده^۱

فلزاتی که در این جزء قرار می گیرند با پیوندهای بسیار ضعیف الکترواستاتیک، بر روی سطح ذرات جامد خاک نگهداشته می شوند. بنابراین به راحتی تحت تأثیر فرایندهای تبادل یونی (جذب - واجذب) و تغییر شرایط محیطی از سطح ماده جامد، رها شده و وارد محیط آب یا محلول خاک می شوند. فلزات موجود در این جزء، نسبت به دیگر اجزاء، به سادگی وارد محیط خاک می گردند و به عنوان جزء دسترس پذیر برای گیاهان در نظر گرفته می شوند.



شکل ۲-۳- نحوه رخداد فلزات در خاک (Chesworth, 2008)

۲-۷-۲- جزء متصل به کربنات ها^۲

کربنات ها یکی از بهترین جذب کننده های فلزات به حساب می آیند. عناصر جزئی می توانند همراه با کربنات ها ته نشین شوند، در ساختار آنها شرکت کنند، روی سطح کربنات ها جذب شوند یا به نسبت های

^۱- Exchangeable fraction

^۲- Carbonate bound fraction

مختلف جانشین کلسیم موجود در ساختار کلسیت (رایج‌ترین فرم کربنات در خاک‌ها و رسوبات) شوند (فرقانی و مر، ۱۳۹۱). یک فلز در شکل کربناتی دارای اتصال ضعیفی بوده و با تغییر شرایط محیطی (به ویژه کاهش pH) آزاد می‌شود (Rao et al., 2007).

۲-۷-۳- جزء متصل به اکسیدهای آهن و منگنز^۱

اکسیدهای آهن و منگنز، مخازن اصلی برای جذب فلزات سنگین هستند (Gleyzez et al., 2002). این ترکیبات، اغلب به صورت پوشش روی سطح کانی یا به صورت ذرات مجزای ریز، حضور داشته و توسط سازوکارهای تشکیل کمپلکس سطحی با فلزات، تبادل یونی و نفوذ به درون شبکه، فلزات جزئی را جذب می‌کنند (Rao et al., 2007). اکسی هیدروکسیدهای آمورف آهن و منگنز در ابتدا عناصر جزئی را به صورت فازهای تبادل‌پذیر جذب می‌کنند؛ اما با گذشت زمان، فلزات جذب سطحی شده وارد ساختار فازهای اکسیدی آمورف و متبلور می‌شوند و در نتیجه تحرک آنها کاهش می‌یابد (فرقانی و مر، ۱۳۹۱). با وجود اینکه اکسیدهای آهن و منگنز اجزاء نسبتاً پایداری هستند اما تغییر در شرایط اکسیداسیون - احیا می‌تواند منجر به آزادسازی عناصر متصل به این فاز شود (Salomons, 1995). موفق‌ترین روش استخراج فلزات از اکسیدهای آهن و منگنز، استفاده از معرف‌هایی است که فلزات موجود در فازها را به صورت فاز احیایی در می‌آورند (Tessier et al., 1979).

۲-۷-۴- جزء متصل به ماده آلی^۲

فلزات می‌توانند از طریق کمپلکس شدن یا زیست انباشت با اشکال مختلف ماده آلی مانند موجودات زنده یا جذب توسط پوشش آلی واقع بر روی ذرات کانی، با مواد آلی همراه شوند (Rao et al., 2007). تحرک فلزات در این جزء متوسط تا بالاست و رهاسازی عناصر سمی با گذشت زمان و در اثر تجزیه و اکسیداسیون مواد آلی رخ می‌دهد (Salomons, 1995). مواد آلی از جمله اجزاء خاک‌ها هستند که به

^۱-Fe-Mn oxide - bound fraction

^۲- Organic matter - bound fraction

مقادیر مختلف و به صورت هوموسی و غیر هوموسی اثر بسزایی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها می‌گذارند. این مواد همچنین نقش مهمی در جذب و نگهداشت فلزات سنگین در خاک ایفا می‌کنند (Kabata-Pendias and Pendias, 2001).

۲-۷-۵- جزء متصل به اجزاء سیلیکاته خاک (جزء باقی‌مانده)^۱

این جزء شامل فلزات متصل به ساختاری بلوری کانی‌های اولیه و ثانویه است و مقاوم‌ترین جزء تشکیل دهنده خاک است (Zimmerman et al., 2010). برای استخراج فلزات از فاز باقی‌مانده (ساختار سیلیکات‌ها)، نیاز به اسیدهای قوی است (Tessier et al., 1979). تحرک فلزات در این فاز بسیار پایین است و فلزات بعد از تخریب و هوازدهی کانی‌ها و شکسته شدن ساختار بلوری آنها آزاد می‌شوند (Salomons, 1995)؛ بنابراین در شرایط طبیعی، فازهای باقی‌مانده بسیار مقاوم هستند و احتمال رهاسازی عناصر از آنها، پایین است.

۲-۸- تأثیر ویژگی‌های خاک (پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک) بر جذب یا تحرک عناصر

اولین گام جهت ارزیابی زیست‌محیطی خاک، بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن است؛ چراکه غلظت فلزات، تمرکز و تحرک آنها با خواص ذاتی خاک ارتباط نزدیکی دارند. مهم‌ترین این ویژگی‌ها عبارتند از: pH خاک، میزان ماده آلی خاک و بافت نمونه‌های خاک (به‌ویژه محتوای رس آن).

۲-۸-۱- pH خاک

pH یا قدرت یون هیدروژن، پارامتری است که میزان اسیدی یا قلیایی بودن یک محیط را نشان می‌دهد. احتمالاً pH مهم‌ترین عامل حاکم بر گونه‌سازی و انحلال‌پذیری فلزات از سطح کانی‌ها، تحرک و انتقال فلزات و در نهایت زیست‌دسترس‌پذیری فلزات در خاک است (USGS, 1995). قابلیت تحرک و دسترس‌پذیری فلزات سنگین، رابطه معکوس با pH دارد. اغلب مکان‌های جذب فلزات در خاک‌ها (مانند اکسیدهای آهن و منگنز، مواد آلی، کربنات‌ها)، تحت تأثیر pH قرار می‌گیرند، زیرا همزمان با کاهش

¹- Residual fraction

pH (افزایش H^+) ، شمار مکان‌های با بار منفی برای جذب کاتیون‌ها، کاهش و برای جذب آنیون‌ها، افزایش می‌یابد. با اسیدی شدن محیط و افزایش H^+ ، رقابت شدیدی میان کاتیون‌ها برای جای‌گیری در مواضع دسترس‌پذیر به وجود می‌آید، اما ته‌نشینی و تجمع هیدروکسیدها، اکسیدها، کربنات‌ها و فسفات‌های فلزی تنها در شرایط قلیایی رخ می‌دهد (Lindsay, 1972).

۲-۸-۲- ماده آلی

ماده آلی در خاک، شامل اندام‌های تخریب شده گیاهان، هوموس و میکروارگانیسم‌های زنده است. ماده آلی خاک، نقش کلیدی در جذب فلزات در خاک دارد (Sherene, 2010). مواد آلی داخل خاک، می‌توانند تحرک فلزات را تحت تأثیر قرار دهند؛ چرا که با ایجاد یکسری لیگاندها در محلول خاک (و جذب بیشتر فلزات)، باعث کاهش تحرک‌پذیری آنها می‌شوند (Arenas-Lago, 2014). لیگاندها شامل اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین مانند اسید اگزالات، اسید سیتریک، اسید فورمیک و استیک اسید است (Sherene, 2010) که با کاتیون‌ها تشکیل پیوند ساده یا چندگانه می‌دهند.

۲-۸-۳- بافت خاک

بافت خاک، نقش مهمی در تحرک فلزات در خاک ایفا می‌کند و نشان‌دهنده توزیع اندازه ذرات خاک است (Sherene, 2010). تمرکز فلزات سنگین درون اجزاء خاک، معمولاً با اندازه ذرات آن، رابطه معکوس دارد. به صورتی که با کاهش اندازه ذرات، سطح ویژه و توان جذب فلزات، افزایش می‌یابد؛ بنابراین در خاک‌های رسی جذب فلزات در مقایسه با خاک‌های ماسه‌ای، بسیار بیشتر است (Sherene, 2010).

۲-۹- مروری بر مطالعات انجام شده در جهان

تاکنون مطالعات متعددی بر روی آلودگی‌های فلزی در خاک و گیاهان اطراف معادن مس پورفیری انجام شده است. در بسیاری از این مطالعات، به ارزیابی آلودگی فلزی در بخش‌های مختلف خاک و زیست‌دسترس‌پذیری آنها، پرداخته شده است. در این بخش به تعدادی از این مطالعات اشاره می‌شود. در پژوهشی که منظور ارزیابی توزیع فلزات در گیاهان در حال رشد، بر روی باطله‌های معدن مس

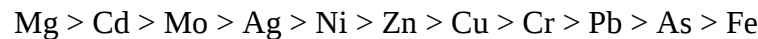
Vigonzano (شمال Apennines در ایتالیا) توسط دینلی و لومبینی (Dinelli and Lombini, 1996) انجام گرفت، مشخص شد که باطله‌های معدن، غلظت بالایی از Ni و Fe, Mg, Cu, Cr, Co, S را دارند هستند که با کانه زایی سولفیدی (S, Cu, Fe) در منطقه مرتبط است. از برخی گونه‌های گیاهی مانند Salk spp (Salicaceae) و Populus nigra (Salicaceae) نیز برای ارزیابی تغییرات فصلی برداشت گردید. نتایج نشان داد که، غلظت فلزات با افزایش سن گیاه، افزایش می‌یابد و بالاترین غلظت آن در برگ‌ها، مشاهده می‌شود. در این پژوهش غلظت بالای فلزات و pH خاک، اولین عوامل محدودکننده رشد گیاهان در منطقه، معرفی شده‌اند.

در پژوهشی که توسط کلاگری (۲۰۰۳) به منظور ارزیابی غلظت عناصر اصلی و فرعی در کانسار مس پورفیری سونگون در شرق آذربایجان، با توجه به زون‌های دگرسانی منطقه انجام گرفت، تغییرات عمودی غلظت ۱۲ عنصر S, Cu, Mo, K, Rb, Ca, Sr, Na, Mg, Fe, Al و Si در میان زون‌های دگرسانی هیپوژن در منطقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که، تمرکز اصلی عناصر (S, Cu, Mo, Fe, K, Rb)، در زون پتاسیک – فلیک است. فراوانی عناصر Ca, Sr, Mg و Na به طور قابل ملاحظه‌ای در زون پتاسیک پایین است. در این پژوهش مشخص شد که، غلظت دو عنصر Al و Si در زون سوپرژن نسبتاً بالا است و فراوانی آنها به تدریج به سمت زون پتاسیک کاهش می‌یابد. Cu و Mo به طور ذاتی در زون فلیک و پتاسیک – فلیک متمرکز شده‌اند.

در پژوهش انجام شده به منظور ارزیابی گونه‌سازی فلزات در رسوبات ساحلی متأثر از معدن مس Salvador در شیلی، مشخص شد که غلظت عمده فلزات Cd, Fe, Mn, Ni, Pb و Zn در فاز باقی‌مانده قرار دارد. با اینکه فلز مس تمایل به حضور در فازهای تبادل‌پذیر و متصل به کربنات‌های رسوبات را دارد ولی بخش اصلی این فلز، در فاز باقی‌مانده حضور داشته است (Ramirez et al., 2005).

در مطالعه انجام شده توسط مر و همکاران (۲۰۱۰) در خاک‌های اطراف معدن مس میدوک در استان کرمان، به منظور ارزیابی غلظت کل و بخش زیست‌دسترس‌پذیر فلزات سنگین در خاک منطقه، از روش استخراج ترتیبی (Tessier et al., 1979) استفاده شد. نتایج آنالیز استخراج ترتیبی نشان داد که بیشتر

از ۶۶ درصد فلز مس، متصل به فاز اکسیدهای آهن و منگنز بوده و بالاترین غلظت آرسنیک (۴۸/۶ درصد) در فاز باقی مانده حضور دارد. میانگین تحرک عناصر به ترتیب به صورت زیر است:



در این پژوهش به منظور بررسی احتمال تجمع این فلزات در ریشه‌ها، از ۳ گونه گیاهی زیر نمونه‌برداری شد. Astragalus (گون)، Caryophyllaceae (کلاه میرحسن)، Artemisia (درمنه). نتایج آنالیز نمونه‌های گیاهی نشان داد که بالاترین ضریب انتقال در گونه‌های گیاهی، مربوط به عناصر Cd, Mo و Cu و پایین‌ترین ضریب انتقال متعلق به Cr, Co و Al است. سطح بالایی از As, Cu و Ag در نمونه‌های خاک، نشان‌دهنده خطری بالقوه در این منطقه است.

در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین، در اطراف معدن مس Murgal در ترکیه انجام گرفت، نمونه‌برداری از خاک و خز، در نزدیکی معدن و در فواصل مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های خز و خاک، حاوی غلظت بالایی از Al, V, Cr, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn, As و Pb هستند و مقایسه غلظت آنها با مقادیر مجاز برای سلامت انسان، نشان داد که آلودگی فلزی در منطقه در حد بحرانی است. به طور کلی غلظت فلزات در نمونه‌های خاک به صورت زیر تغییر می‌کند (Koz et al., 2012):

Al (۸/۸۴ g/kg), V (۷۶/۱۷ mg/kg), Cr (۴۵/۵۲ mg/kg), Mn (۱۰۱۸/۷۸ mg/kg), Fe (۵/۴۱ g/kg), Ni (۲۸/۷۴ mg/kg), Cu (۲۸۱/۳۹ mg/kg), Zn (۱۵۲/۹۵ mg/kg), As (۱۷/۵۶ mg/kg).

در مطالعه‌ای دیگر که به منظور بررسی میزان تجمع فلزات در خاک و گیاهان بومی اطراف معدن مس سرچشمه انجام شد، مشخص شد که غلظت کل فلزات Cu, Zn, Pb, Ni در نمونه‌های خاک به ترتیب ۳۵، ۷۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۳۰۰ میکروگرم بر گرم است و غلظت این فلزات در بخش تبادل‌پذیر خاک به ترتیب ۰/۵، ۱/۵، ۸ و ۱۱ میکروگرم بر گرم است. در این مطالعه تعداد ۱۴۶ گونه گیاهی برداشت شد. بازه تغییرات غلظت فلزات در برگ گیاهان خشک شده، به صورت زیر است: مس (۱-۴۰۱۲ میکروگرم بر گرم)، روی (۲-۱۰۷۴۰ میکروگرم بر گرم)، سرب (۱-۷۶ میکروگرم بر گرم) و نیکل (۱-۲۲ میکروگرم بر گرم).

بر گرم) (Ghaderian and Ravandi, 2012).

در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معدن مس تورو (Touro) در شمال غربی اسپانیا انجام گرفت، غلظت کل فلزات Cr, Cd, Mn, Ni, Pb, Zn و بخش زیست‌دسترس-پذیر آنها با استفاده از روش استخراج ترتیبی تعیین شد. سنگ‌های منطقه شامل آمفیبولیت، با مقدار قابل توجهی از سولفیدهای فلزی مانند پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت است. نتایج نشان داد که غلظت کل مس (2429 mg/kg - 104) است که بالاتر از حد مجاز است و بیشترین غلظت فلزات سنگین نیز در فاز باقی‌مانده حضور دارد (کروم (% 92 - 85)، مس (% 70 - 30)، منگنز (% 96 - 60)، نیکل (% 95 - 70)، سرب (% 68 - 47) و روی (% 97 - 85)) که نشان‌دهنده منشأ طبیعی و زمین‌زاد آنهاست. نتایج آنالیز استخراج ترتیبی نشان داد که اکسیدهای آهن و منگنز خاک، میل ترکیبی بالایی برای جذب فلزات سنگین داشته‌اند (Arenas-Lago, 2014).

در مطالعه‌ای دیگری که توسط مر و همکاران (1391) به منظور ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از کانی‌سازی طبیعی و معدنکاری، در کانسار مس پورفیری دره‌زار در استان کرمان انجام شد، از محیط‌های آب، خاک و رسوبات منطقه نمونه‌برداری گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که به دلیل رخداد کانی‌سازی سولفیدی در منطقه و هوازدگی سنگ‌های حاوی این کانی‌ها، تیپ اکثر نمونه‌های آب، کلسیم - سولفاتی است. محاسبه ضریب غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشت، نشان داد که رسوبات منطقه از فلزات سنگین Cu, Mo, Pb و Sb غنی شده‌اند. تغییر شرایط محیطی مانند تغییر pH و پتانسیل اکسیداسیون - احیا، می‌تواند باعث تحرک و آزادسازی این عناصر از رسوبات شده و زیست‌دسترس‌پذیری آنها را در آب و رسوبات پایین‌دست کانسار، افزایش دهد. در نمونه‌های خاک، بیشترین ضریب غنی‌شدگی مربوط به عناصر Cu, Mo و Pb می‌باشد. محاسبه شاخص زمین‌انباشت نیز نشان داد که خاک منطقه نسبت به عنصر مولیبدن آلودگی زیاد، نسبت به عنصر مس دارای آلودگی متوسط و نسبت به عنصر آنتیموان بدون آلودگی تا کمی آلوده است.

در پژوهشی که به منظور بررسی ارتباط بین کانه‌زایی و میزان عناصر سنگین در کانسار مس پورفیری

دره‌زار انجام گرفت، مشخص شد که غنی‌شدگی اصلی فلز مس، در زون‌های دگرسانی پتاسیک و فلیک بوده و غنی‌شدگی اصلی آرسنیک، مربوط به زون دگرسانی آرژیلیک است که دلیل آن، وجود فراوان کانی‌های فیلوسیلیکاتی است که باعث جذب و تثبیت فلزات سنگین می‌شوند. براساس شاخص آلودگی نمونه‌های خاک، عناصر Zn, Se, Mn, Co, Cd و As دارای آلودگی کم، عناصر Sb, Ni, Fe, Al و Pb آلودگی متوسط و عناصر Mo و Cu دارای آلودگی زیاد در خاک منطقه می‌باشند (سلطانی، ۱۳۹۱).

در پژوهش انجام شده توسط صالحی (۱۳۸۳) جهت بررسی ژئوشیمیایی زون‌های دگرسانی در معدن مس سرچشمه، مشخص شد که نمونه‌های سنگ برداشت شده از زون دگرسانی آرژیلیک، از نظر کادمیوم، مس و روی، به شدت آلوده و از نظر سلنیوم، آلوده هستند، حال آنکه نسبت به آرسنیک و سرب غیر آلوده می‌باشند. نتایج این مطالعه نشان داد که مس بیشترین تمرکز را در زون سوپرژن و کمترین غنی‌شدگی را در زون اکسیدی نشان می‌دهد، که عامل آن، عملکرد فرایندهای فروشست در منطقه است. تمرکز روی در زون هیپوژن نیز بسیار فراتر از زون اکسیدی و سوپرژن برآورد گردید.

فصل سوم

روش انجام تحقیق

۳-۱ مقدمه

در هر مطالعه و پژوهش زیست‌محیطی، برای ارزیابی دقیق محیط مورد نظر و دستیابی به نتایج مطلوب، روش‌های نمونه‌برداری، آنالیز نمونه‌ها و تحلیل داده‌ها، بسیار حائز اهمیت است. در این بخش، به شرح روش نمونه‌برداری، آنالیز نمونه‌ها، تعیین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک و روش استخراج ترتیبی (Tessier et al., 1979)، محاسبه شاخص‌های ژئوشیمیایی و بیوژئوشیمیایی و همچنین روش‌های تحلیل آماری داده‌ها، پرداخته می‌شود.

۳-۲- نمونه‌برداری

پس از بررسی و مطالعه اطلاعات اولیه و بررسی نقشه‌های موجود (نقشه ۱:۵۰۰۰ دگرسانی-زمین‌شناسی منطقه معدنی ایجو)، نمونه‌برداری از خاک و سنگ‌های منطقه مورد مطالعه، در آبان ماه ۱۳۹۴ و نمونه‌برداری از گیاه نیز در اردیبهشت ۱۳۹۵ انجام گرفت.

۳-۲-۱- نمونه‌برداری از سنگ میزبان و کانسنگ

براساس مشاهدات صحرایی صورت گرفته و مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی و زون‌های دگرسانی و با توجه به تنوع واحدهای سنگی در منطقه، تعداد ۱۸ نمونه سنگ برداشت شد و موقعیت نقاط توسط دستگاه GPS، ثبت گردید. نمونه‌برداری به صورت چکشی و بر اساس تنوع واحدهای سنگی، صورت گرفت.

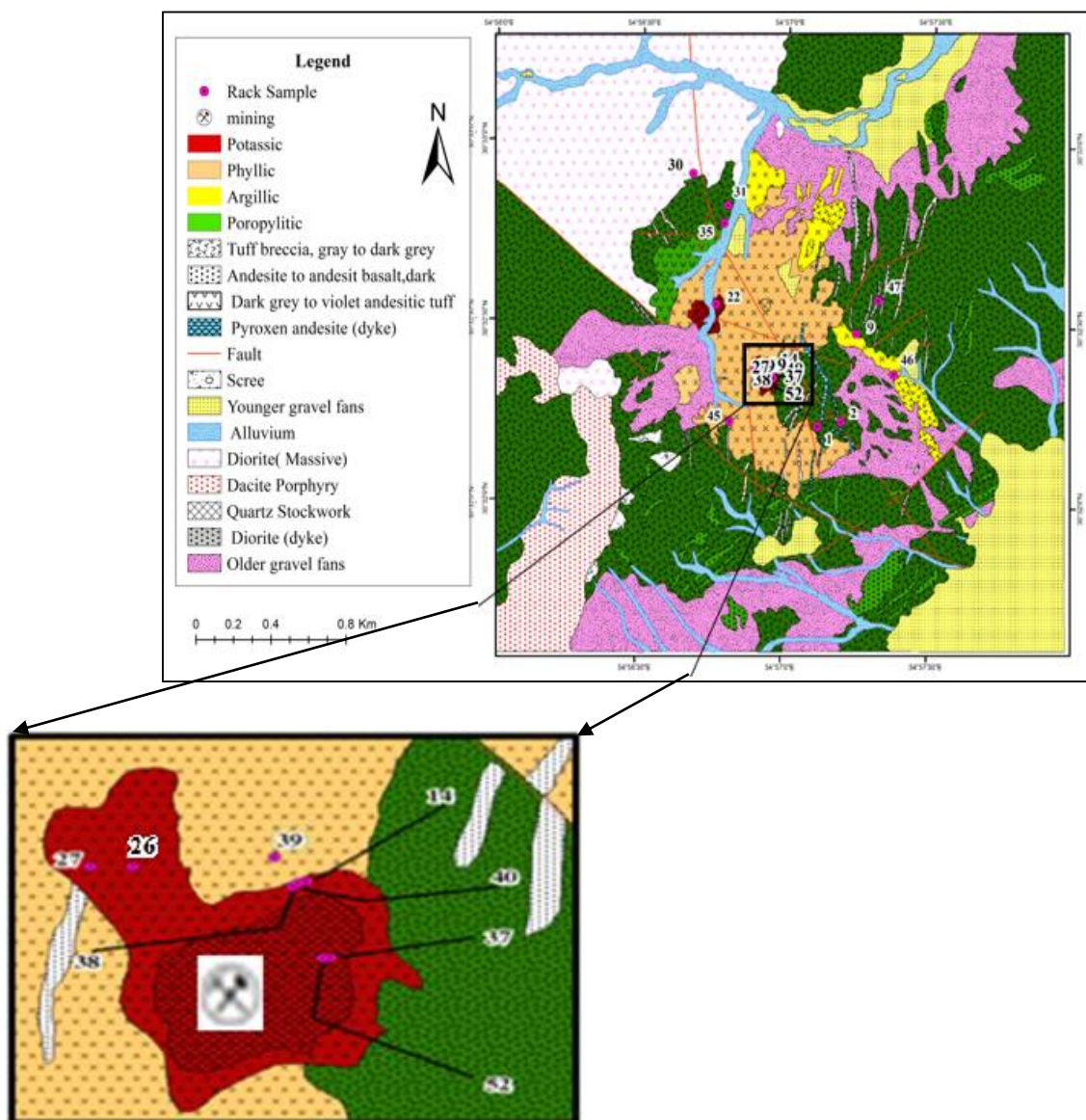
در جدول ۳-۱ نام و موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری از سنگ و در شکل ۳-۱ نیز توزیع آنها بر روی نقشه GIS شده دگرسانی‌های منطقه، آورده شده است.

جدول ۳-۱- موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت شده از رخنمون‌های سنگی، در منطقه مورد مطالعه

ردیف	شماره نمونه	دگرسانی	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)
۱	۱	سنگ میزبان	۳۰۳۵۲۲	۳۳۸۰۰۷۰
۲	۲	پروپلیتیک	۳۰۳۶۵۳	۳۳۸۰۰۹۴
۳	۹	پروپلیتیک	۳۰۳۷۳۷	۳۳۸۰۵۴۶
۴	۱۴	پتاسیک-فیلیک	۳۰۳۲۷۲	۳۳۸۰۳۶۶
۵	۲۲	آرژیلیک ثانویه	۳۰۲۹۶۸	۳۳۸۰۷۰۱
۶	۲۶	فیلیک	۳۰۳۱۹۸	۳۳۸۰۳۷۵
۷	۲۷	فیلیک	۳۰۳۱۸۰	۳۳۸۰۳۷۵
۸	۳۰	پروپلیتیک	۳۰۲۸۴۴	۳۳۸۱۳۷۱
۹	۳۱	پروپلیتیک	۳۰۳۰۳۴	۳۳۸۱۲۰۶
۱۰	۳۵	پروپلیتیک	۳۰۳۰۱۴	۳۳۸۱۱۱۶
۱۱	۳۷	پتاسیک	۳۰۳۲۸۲	۳۳۸۰۳۲۰
۱۲	۳۸	فیلیک	۳۰۳۲۶۶	۳۳۸۰۳۶۳
۱۳	۳۹	فیلیک	۳۰۳۲۵۸	۳۳۸۰۳۸۱
۱۴	۴۰	پتاسیک	۳۰۳۲۶۸	۳۳۸۰۳۶۵
۱۵	۴۵	فیلیک	۳۰۳۰۴۰	۳۳۸۰۰۹۸
۱۶	۴۶	آرژیلیک	۳۰۳۹۴۴	۳۳۸۰۳۳۸
۱۷	۴۷	پروپلیتیک	۳۰۳۸۵۸	۳۳۸۰۷۱۷
۱۸	۵۲	پتاسیک	۳۰۳۲۷۹	۳۳۸۰۳۲۰

۳-۲-۲- نمونه‌برداری از خاک

تعداد ۳۴ نمونه خاک، با توجه به وسعت منطقه و توزیع واحدهای سنگی و زون‌های دگرسانی، به صورت تصادفی برداشت شد. عمق نمونه‌برداری با توجه به عمق خاک و سنگ بستر، از ۰ تا ۴۰ سانتی‌متر متغیر بود. برای برداشت نمونه‌ها از بیلچه فولادی ضدزنگ، استفاده گردید (شکل ۳-۲). پس از برداشت و ثبت موقعیت هر یک از نمونه‌ها، اجزاء درشت‌دانه و سنگریزه‌های آنها جدا شده و درون کیسه‌های مقاوم نگهداری و شماره‌گذاری گردید. در جدول ۳-۲ موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری از خاک و در شکل ۳-۳ نیز موقعیت همین نقاط بر روی نقشه دگرسانی-زمین‌شناسی منطقه، آورده شده است.



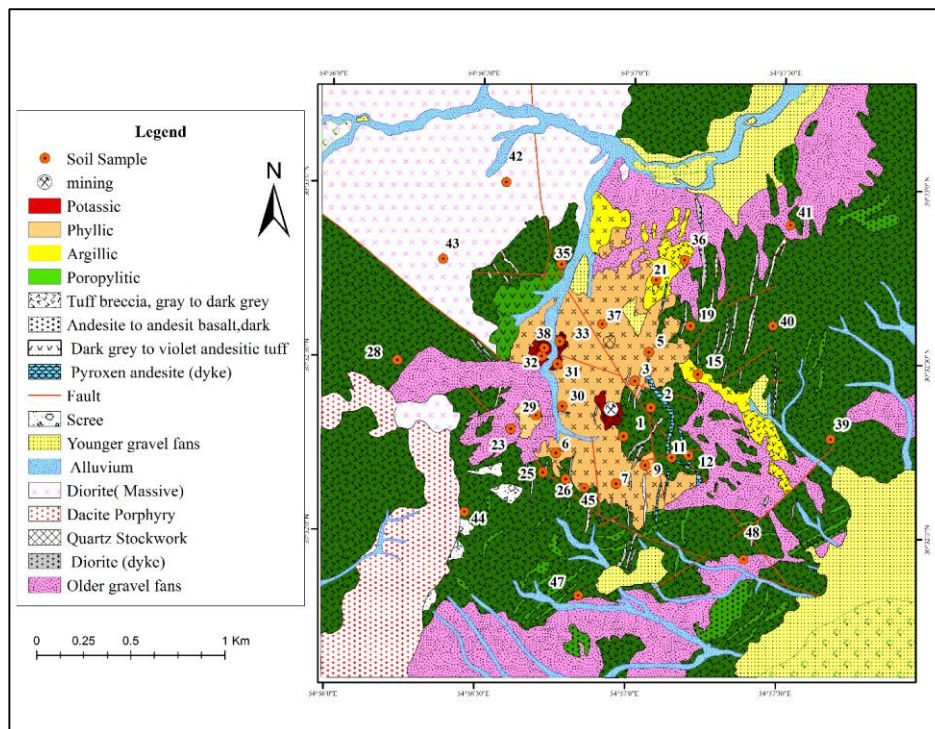
شکل ۳-۱- موقعیت نمونه‌های سنگی برداشت شده از منطقه مورد مطالعه



شکل ۳-۲- نمونه‌برداری از خاک‌های اطراف معدن مس ایجو

جدول ۳-۲- موقعیت جغرافیایی نمونه‌های خاک برداشت شده

شماره نمونه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	شماره نمونه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)
۱	۳۰۳۳۱۱	۳۳۸۰۱۹۵	۳۰	۳۳۸۰۲۹۸۶	۳۳۸۰۳۵۵
۲	۳۰۳۴۵۶	۳۳۸۰۳۴۸	۳۱	۳۰۲۹۶۱	۳۳۸۰۵۷۹
۳	۳۰۳۳۷۱	۳۳۸۰۴۸۸	۳۲	۳۰۲۸۷۷	۳۳۸۰۶۲۱
۵	۳۰۳۴۴۶	۳۳۸۰۶۴۱	۳۳	۳۰۲۹۷۳	۳۳۸۰۶۹۹
۶	۳۰۲۹۵۳	۳۳۸۰۱۰۷	۳۵	۳۰۲۹۸۳	۳۳۸۱۱۰۸
۷	۳۰۳۲۷۳	۳۳۷۹۹۴۴	۳۶	۳۰۳۶۳۷	۳۳۸۱۱۳۰
۹	۳۰۳۴۲۷	۳۳۸۰۰۴۱	۳۷	۳۰۳۲۰۱	۳۳۸۰۷۹۱
۱۱	۳۰۳۵۶۷	۳۳۸۰۰۸۲	۳۸	۳۰۲۸۹۳	۳۳۸۰۶۶۴
۱۲	۳۰۳۶۵۷	۳۳۸۰۰۹۴	۳۹	۳۰۴۴۱۱	۳۳۸۰۱۷۹
۱۵	۳۰۳۸۰۶	۳۳۸۰۵۲۳	۴۰	۳۰۴۱۰۶	۳۳۸۰۷۸۰
۱۹	۳۰۳۶۶۷	۳۳۸۰۷۸۰	۴۱	۳۰۴۱۹۹	۳۳۸۱۳۱۴
۲۱	۳۰۳۴۸۵	۳۳۸۱۰۲۳	۴۲	۳۰۲۶۹۳	۳۳۸۱۵۴۴
۲۳	۳۰۲۷۱۳	۳۳۸۰۲۳۶	۴۳	۳۰۲۳۵۶	۳۳۸۱۱۳۷
۲۵	۳۰۲۸۸۳	۳۳۸۰۰۰۴	۴۴	۳۰۲۴۶۸	۳۳۷۹۷۹۵
۲۶	۳۰۳۰۰۴	۳۳۷۹۹۶۸	۴۵	۳۰۳۱۰۵	۳۳۷۹۹۲۱
۲۸	۳۰۲۱۱۱	۳۳۸۰۶۰۱	۴۷	۳۰۳۰۷۲	۳۳۷۹۳۵۱
۲۹	۳۰۲۸۴۷	۳۳۸۰۳۰۷	۴۸	۳۰۳۹۵۰	۳۳۷۹۵۴۱



شکل ۳-۳- موقعیت نمونه‌های خاک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

۳-۲-۳- نمونه برداری از گیاه

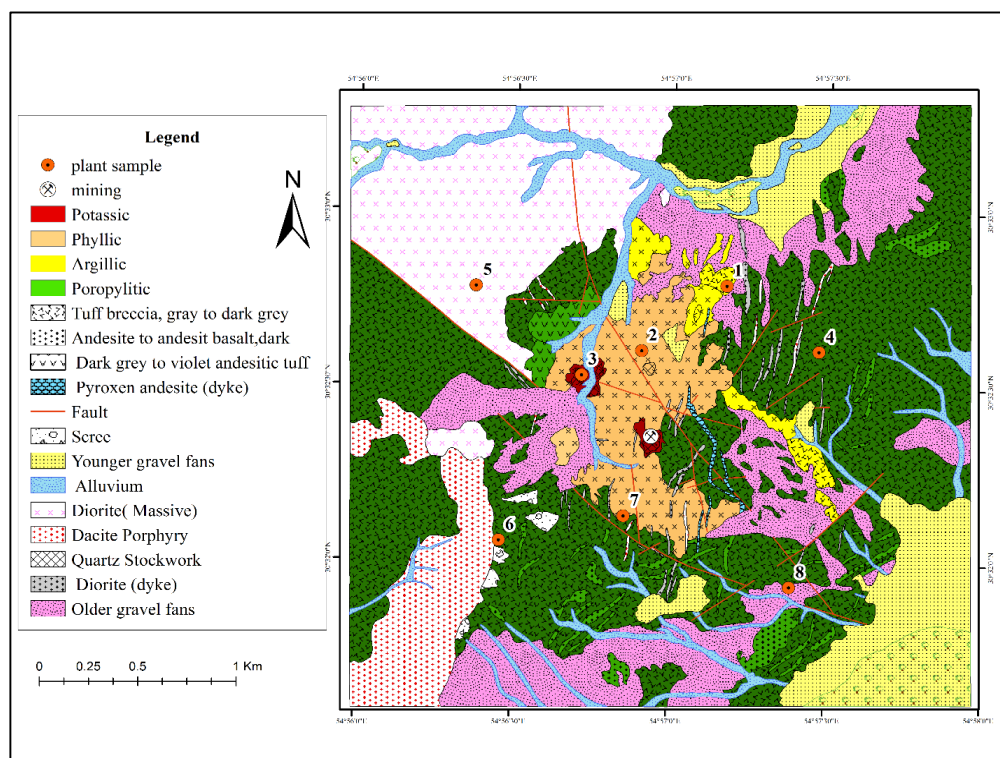
گیاه درمنه، با توجه به تراکم بالای آن در منطقه، به عنوان گونه غالب انتخاب شده و تعداد ۸ نمونه از این گیاه به صورت تصادفی، برداشت شد (شکل ۳-۴). پس از برداشت هر نمونه و ثبت موقعیت آن، درون کیسه‌های مقاوم نگهداری و شماره‌گذاری گردید. در جدول ۳-۳ و شکل ۳-۵ به ترتیب موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری از گیاه و بر روی نقشه دگرسانی-زمین‌شناسی آورده شده است.



شکل ۳-۴- تصاویری از برداشت نمونه‌های گیاه درمنه، در منطقه مورد مطالعه

جدول ۳-۳- موقعیت نمونه‌های گیاه (درمنه) برداشت شده، از منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)
۱	۳۰۳۶۳۷	۳۳۸۱۱۳۰
۲	۳۰۳۲۰۱	۳۳۸۰۷۹۱
۳	۳۰۲۸۹۳	۳۳۸۰۶۶۴
۴	۳۰۴۱۰۶	۳۳۸۰۷۸۰
۵	۳۰۲۳۵۶	۳۳۸۱۱۳۷
۶	۳۰۲۴۶۸	۳۳۷۹۷۹۵
۷	۳۰۳۱۰۵	۳۳۷۹۹۲۱
۸	۳۰۳۹۵۰	۳۳۷۹۵۴۱



شکل ۳-۵- موقعیت نمونه‌های گیاه برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

۳-۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌های سنگی

نمونه‌های سنگ برداشت‌شده، ابتدا در کارگاه تهیه مقطع دانشگاه صنعتی شاهرود، برش زده شدند و سپس در آزمایشگاه مجتمع مس میدوک، نمونه‌های سنگ پودر گردیدند. در نهایت، به منظور انجام آنالیز XRD و تهیه مقاطع نازک به آزمایشگاه مجتمع مس سرچشمه، برای انجام آنالیز XRF به آزمایشگاه مجتمع ذوب مس خاتون‌آباد و همچنین به منظور انجام آنالیز ICP-OES و تهیه مقاطع نازک صیقلی به آزمایشگاه زرآزما، ارسال گردیدند.

۳-۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های خاک

پس از انجام نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک به مدت ۳ روز در یک محیط بسته و به دور از آلودگی، خشک شدند. بعد از خشک شدن، ابتدا از الک ۲ میلی‌متر (الک مش شماره ۱۰) عبور داده شده و سپس بخشی از هر نمونه با استفاده از هاون دستی از جنس سرامیک پودر گردید و در نهایت نمونه‌ها از الک ۶۳

میکرون (مش شماره ۲۳۰) عبور داده شدند. میزان ۵۰ گرم از هر نمونه خاک عبور داده شده از الک‌ها، در کیسه‌های پلاستیکی مخصوص نگهداری و شماره‌گذاری گردید. سپس نمونه‌های خاک، برای انجام آنالیزهای XRD (جهت تعیین کانی‌شناسی نمونه‌های خاک) و تعیین غلظت کل فلزات سنگین به روش ICP-OES و همچنین تعیین بافت نمونه‌های خاک به روش هیدرومتری به ترتیب به آزمایشگاه مجتمع مس سرچشمه، زرازمای ماهان و پارک علم و فناوری استان سمنان، ارسال گردیدند.

۳-۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌های گیاه

نمونه‌های گیاهی، ابتدا توسط آب معمولی و سپس توسط آب مقطر شستشو داده شدند. بعد از جدا کردن ریشه و اندام‌های هوایی، نمونه‌های گیاه در یک محیط بسته و به دور از آلودگی خشک شدند (شکل ۳-۶) و در نهایت، نمونه‌ها به آزمایشگاه زرازمای ماهان ارسال شدند و بعد از پودر شدن و هضم با اسید، غلظت فلزات سنگین در آنها توسط دستگاه ICP-MS تعیین گردید.



شکل ۳-۶- تصویری از آماده‌سازی نمونه‌های گیاهی در آزمایشگاه

۳-۴- روش‌های آنالیزی

پس از آماده‌سازی نمونه‌های خاک، اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک، از جمله pH و ماده آلی خاک و آنالیز استخراج ترتیبی تسیر و همکاران (۱۹۷۹)، در آزمایشگاه آب و محیط زیست دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. در زیر به طور خلاصه به چگونگی اندازه‌گیری این پارامترها

اشاره می‌شود.

۳-۴-۱- اندازه‌گیری pH نمونه‌های خاک

اندازه‌گیری pH نمونه‌های خاک با استفاده از روش استاندارد ۹۰۴۵D سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA, 2004)، انجام شد. براساس این روش، ۲۰ گرم نمونه خاک (عبور کرده از الک ۲ میلی‌متر) را به یک بشر ۵۰ میلی‌متری منتقل کرده و به نسبت ۱:۱ یا ۱:۲ آب مقطر اضافه شد. بشرها به مدت ۵ دقیقه بر روی دستگاه همزن، قرار گرفته و سپس مخلوط آب و خاک به مدت ۱ ساعت به حالت سکون کنار گذاشته شد تا رس‌های معلق در محلول، ته‌نشین شوند. سپس pH عصاره تهیه شده توسط pH متر مدل YK2001-CT که از قبل کالیبره شده بود، اندازه‌گیری گردید (شکل ۳-۷، الف).

۳-۴-۲- اندازه‌گیری درصد ماده آلی نمونه‌های خاک

در این مطالعه، جهت تعیین مقدار ماده آلی نمونه‌های خاک، از روش دی کرومات پتاسیم استفاده شد. در این روش ابتدا مقدار ۱ گرم از نمونه خاک (عبور کرده از الک ۰/۵ میلی‌متر) به یک ظرف ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری، منتقل شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر از محلول دی کرومات پتاسیم ۱ نرمال اضافه و به آرامی تکان داده شد تا ذرات در محلول، پراکنده شوند. سپس ۲۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ ۹۶ درصد، به محلول اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه تکان داده شد تا خاک با مواد مخلوط گردد و سپس به مدت نیم ساعت کنار گذاشته شد. در مرحله بعد، ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه کرده و بعد از سرد شدن ۱۰ قطره ارتوفنانترولین به محلول اضافه و با فروآمونیم سولفات ۰/۵ نرمال، تیتراژ گردید (شکل ۳-۷، ب). عمل تیتراسیون تا زمانی که رنگ محلول از سبز کدر به قرمز تغییر کند، ادامه می‌یابد (برای این سری خاک، دو نمونه شاهد تهیه شد). در نهایت با استفاده از رابطه ۳-۱، درصد کربن آلی در نمونه‌ها تعیین گردید:

$$\% \text{ OC} = M \times 0.39 \times [V1 - V2/S] \quad \text{رابطه ۳-۱}$$

M: نرمالیت فروآمونیم سولفات

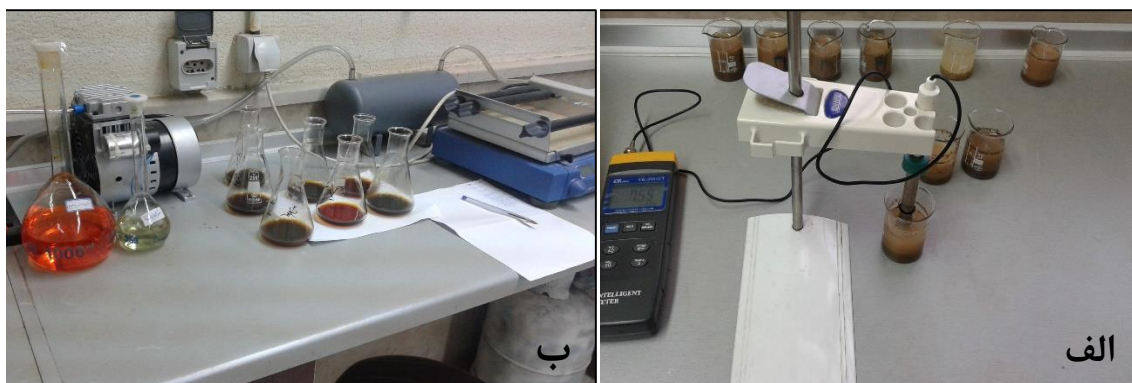
V1: فرو آمونیوم سولفات مصرفی برای نمونه شاهد (ML)

V2: فرو آمونیوم سولفات مصرفی برای نمونه مجهول (ML)

S: وزن خاک خشک شده در هوای آزاد

در این روش ۷۷ درصد کربن آلی، اکسید می‌گردد. اعمال ضریب ۰/۳۹ در رابطه فوق، برای جبران کمبود ناشی از اکسیداسیون می‌باشد. مقدار ماده آلی خاک، با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$۱/۷۲ \times \text{درصد کربن آلی} = \text{درصد ماده آلی}$$



شکل ۳-۷- الف) اندازه‌گیری pH و ب) درصد ماده آلی نمونه‌های خاک

۳-۴-۳- تعیین بافت نمونه‌های خاک

بافت خاک، نقش مهمی در تحرک فلزات در خاک ایفا می‌کند و نشان‌دهنده توزیع اندازه ذرات خاک است. (Sherene, 2010). جهت تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری، نمونه‌های خاک (عبور کرده از الک ۲ میلی‌متر) به آزمایشگاه پارک علم و فناوری استان سمنان، ارسال شدند. هیدرومتری روشی برای تعیین درصد ماسه (۲ تا ۰/۵ میلی‌متر)، سیلت (۰/۰۵ تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر) و رس (کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر) در نمونه‌های خاک است. در این روش، مقداری خاک (که می‌تواند بسته به بافت خاک متفاوت باشد) با افزودن محلول هگزامتافسفات سدیم و بهم زدن با هم‌زن برقی یا شیکر، تا حدودی پراکنده می‌شوند. این مخلوط به استوانه مدرج یک لیتری منتقل شده و هم زده می‌شود و غلظت آن در فواصل زمانی ۰/۵ دقیقه تا ۲۴ ساعت با هیدرومتر قرائت می‌گردد. اعداد قرائت شده از روی هیدرومتر، پس از

انجام محاسبات ریاضی و انجام تصحیحاتی چون تصحیحات دمایی و چگالی و رسم نمودار فراوانی تجمعی، به درصد ماسه، رس و سیلت تبدیل می‌شوند. سپس با قرار دادن آنها در مثلث طبقه‌بندی خاک، بافت نمونه‌های خاک تعیین می‌گردد.

۳-۴-۴- تعیین غلظت کل فلزات سنگین

به منظور اندازه‌گیری غلظت کل فلزات سنگین به روش ICP-OES، نمونه‌های خاک پودر شده و عبور کرده از الک ۶۳ میکرون، به آزمایشگاه زرازمای ماهان، ارسال گردیدند.

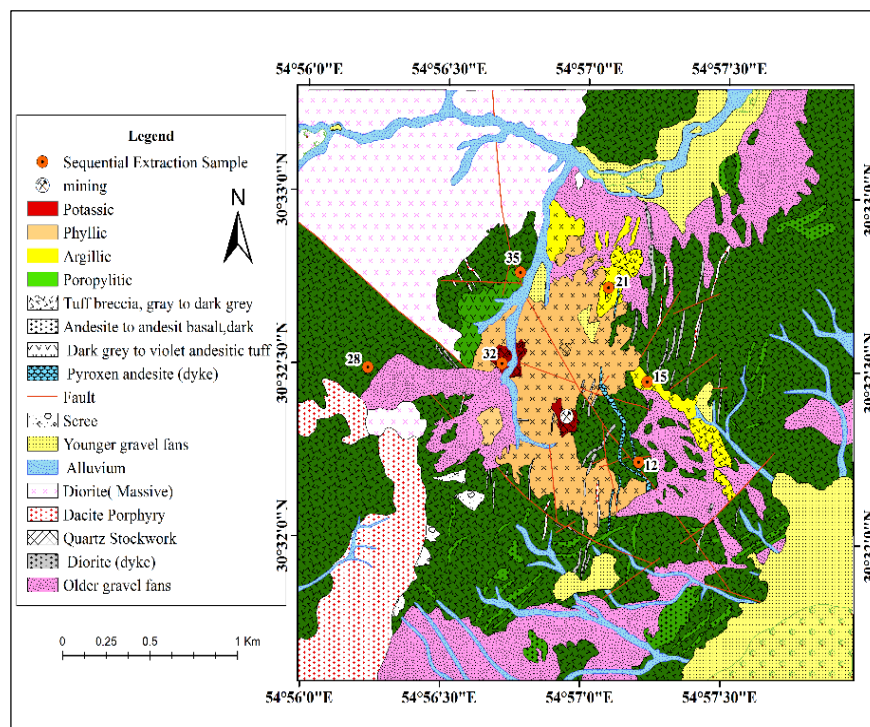
۳-۴-۵- تعیین کانی‌شناسی نمونه‌های خاک

برای این منظور، بخشی از نمونه‌های پودر شده و عبور کرده از الک ۶۳ میکرون، به آزمایشگاه مجتمع مس سرچشمه ارسال و توسط روش XRD، آنالیز گردیدند.

۳-۴-۶- استخراج ترتیبی فلزات در نمونه‌های خاک^۱

در این تحقیق به منظور استخراج فلزات متصل به فازهای مختلف، ۶ نمونه خاک که موقعیت آنها در شکل ۳-۸ آورده شده است، به روش استخراج ۵ مرحله‌ای تسیر و همکاران (Tessier et al., 1979) تجزیه گردیدند. 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. در جدول ۳-۴ مراحل انجام این آزمایش به اختصار توضیح داده شده است.

^۱- Sequential Extraction Method



شکل ۳-۸- موقعیت نمونه‌های خاک برداشت شده برای انجام آنالیز استخراج ترتیبی

جدول ۳-۴- خلاصه روش استخراج ترتیبی (Tessier et al., 1979)

مرحله	فاز	واکنشگر	شرایط آزمایشگاهی
۱	تبادل پذیر	۸ میلی لیتر منیزیم کلراید ۱ مولار اسید (pH:۷)	۱ ساعت در دمای ۲۵ °C
۲	متصل به کربنات‌ها	۸ میلی لیتر سدیم استات ۱ مولار (pH:۵ توسط استیک اسید)	۵ ساعت در دمای ۲۵ °C
۳	متصل به اکسیدهای آهن و منگنز	۲۰ میلی لیتر هیدروکسیل آمونیوم کلراید ۰/۰۴ مولار در ۲۵ درصد استیک اسید	۶ ساعت در دمای ۹۶ °C
۴	متصل به ماده آلی	۳ میلی لیتر اسید نیتریک ۰/۰۲ مولار + ۵ میلی لیتر از پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد (pH:۲ توسط اسید نیتریک)	۲ ساعت در دمای ۸۵ °C
		۳ میلی لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد (pH:۲ توسط اسید نیتریک)	۳ ساعت در دمای ۸۵ °C
		۵ میلی لیتر آمونیوم استات ۳/۲ مولار در ۲۰ درصد اسیدنیتریک (V/V)	۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ °C
۵	متصل به فاز باقی مانده	پرکلریک اسید + اسید فلوریدریک + اسید کلریدریک	-

۳-۵- نقشه‌های توزیع فلزات سنگین در خاک

رسم نقشه‌های توزیع درک روشن‌تری نسبت به پراکندگی عناصر و آلودگی ناشی از غلظت فلزات سنگین، به دست می‌دهد. از این‌رو نقشه‌های توزیع فلزات سنگین مورد مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10 رسم گردید.

۳-۶- شاخص‌های ژئوشیمیایی برای ارزیابی شدت آلودگی خاک

۳-۶-۱- ضریب غنی‌شدگی^۱

بر اساس این ضریب، می‌توان مقدار یک عنصر را نسبت به مقدار طبیعی آن سنجید و برای ارزیابی میزان غنی‌شدگی فلزی یک عنصر در یک محیط، توسط محیطی دیگر، مورد استفاده قرار داد (Loska et al., 1995). در واقع محاسبه ضریب غنی‌شدگی، روشی مناسب برای ارزیابی غلظت عنصر مورد نظر در محیط، در مقایسه با غلظت همان عنصر، در شرایط طبیعی است (Chabukdhara and Nema, 2012). این ضریب از رابطه ۳-۲ محاسبه می‌شود (Loska et al., 1995):

$$EF = (C_{1Me+n} / C_{1n}) / (C_{2Me+n} / C_{2n}) \quad \text{رابطه ۳-۲}$$

در این رابطه EF، ضریب غنی‌شدگی، C_{1Me+n} ، غلظت فلز در محیط مورد نظر (نمونه خاک)، C_{1n} ، غلظت عنصر مرجع در محیط مورد نظر (نمونه خاک)، C_{2Me+n} ، غلظت همان فلز در محیط مرجع (پوسته زمین)، C_{2n} ، غلظت عنصر مرجع در محیط مرجع (پوسته زمین) است. عنصری به عنوان عنصر مرجع انتخاب می‌شود که در محیط مورد بررسی، روند تغییرات کمی داشته باشد (Loska et al., 1995). در این پژوهش، عنصر اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع یا بهنجار کننده مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۳-۵، رده‌بندی شدت غنی‌شدگی را بر اساس مقادیر ضرایب آن، آورده شده است.

^۱ - Enrichment Factor

جدول ۳-۵- رده‌بندی مقادیر ضریب غنی‌شدگی (Chen et al., 2007)

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

۳-۶-۲- شاخص زمین انباشت^۱

شاخص زمین انباشت 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 ۳-۳، محاسبه می‌شود (Muller, 1969):

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5 B_n} \right] \quad \text{رابطه ۳-۳}$$

که در آن I_{geo} ، شاخص زمین انباشت، 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 است. مولر بر اساس این شاخص، خاک‌ها را از نظر درجه آلودگی، به ۷ گروه طبقه‌بندی نمود (جدول ۳-۶).

جدول ۳-۶- میزان آلودگی خاک بر اساس مقادیر شاخص زمین انباشت در طبقه‌بندی مولر (Muller, 1969)

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

^۱- Geoaccumulation Index

۳-۶-۳- ضریب تحرک^۱ فلزات سنگین و کد ارزیابی خطر^۲

به منظور ارزیابی تحرک و انحلال پذیری فلزات سنگین در خاک، معمولاً از ضریب تحرک پذیری (MF)

استفاده می شود که از رابطه ۳-۴ محاسبه می گردد: (Kabala and Singh, 2001)

$$\text{رابطه ۳-۴} \quad MF = \frac{F_1 + F_2}{\sum Fraction} \times 100$$

که در این رابطه F_1 ، فلزات موجود در فاز تبادل پذیر و F_2 ، فلزات متصل به کربنات ها (که فلزات موجود در این دو فاز، بیشترین تحرک را نسبت دیگر فازهای خاک دارند و جذب گیاهان می شوند) و $\sum Fraction$ ، مجموع فلزات موجود در ۵ فاز ژئوشیمیایی خاک، هستند.

کد ارزیابی خطر (RAC): به منظور ارزیابی خطر زیست محیطی مرتبط با آلودگی فلزات سنگین در نمونه های خاک، از کد ارزیابی خطر استفاده شد. بر اساس این ضریب، می توان توانایی اتصال بین فلزات و فازهای ژئوشیمیایی مختلف در خاک و توانایی فلزات در رهاسازی و ورود به زنجیره غذایی را سنجید (Radriguez et al., 2009). RAC بر حسب درصد بیان می شود و عبارت است از مجموع غلظت فلزات در فازهای F_1 و F_2 . جدول ۳-۷، رده بندی خاک ها را بر اساس کد ارزیابی خطر نشان می دهد.

جدول ۳-۷- رده بندی خاک ها بر اساس کد ارزیابی خطر (Favas et al., 2011)

مجموع غلظت فازهای F_1 و F_2	کد ارزیابی خطر (RAC)
<۱	بدون خطر
۱-۱۰	خطر کم
۱۱-۳۰	خطر متوسط
۳۱-۵۰	خطر بالا
۵۰ >	خطر خیلی بالا

۳-۷- شاخص های بیوژئوشیمیایی

برای تعیین رابطه فلزات سنگین در خاک و گیاهان در یک منطقه، از شاخص های بیوژئوشیمیایی

^۱- Mobility Factor

^۲- Risk Assessment Code

مختلفی استفاده می‌شود. مهم‌ترین این شاخص‌ها عبارتند از:

۳-۷-۱- ضریب زیست تمرکز^۱

یکی از فاکتورهای مهم و اساسی برای اندازه‌گیری میزان تمرکز فلزات سنگین در نمونه‌های گیاهی و ارزیابی میزان جذب و آلودگی عناصر در گیاه، ضریب زیست تمرکز (BCF) است. این ضریب توانایی گیاه را برای تجمع یا تمرکز فلزات از خاک، نشان می‌دهد (Yoon et al., 2006) و از رابطه ۳-۵ محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۳-۵} \quad BCF = C_r / C_{\text{Soil}}$$

در این رابطه C_{Soil} ، غلظت فلز مورد نظر در خاک و C_r ، غلظت فلز مورد نظر در ریشه (اندام زیرزمینی) 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 (Yoon et al., 2006).

۳-۷-۲- ضریب انتقال^۲

این ضریب توانایی گیاه را برای انتقال فلزات از ریشه به اندام‌های هوایی، نشان می‌دهد و از طریق رابطه ۳-۶ محاسبه می‌شود: (Bu-Olgan and Thomas, 2009)

$$\text{رابطه ۳-۶} \quad TF = C_s / C_r$$

در این رابطه C_s ، غلظت فلز در اندام‌های هوایی (روزمینی) و C_r ، غلظت فلز مورد نظر در ریشه (اندام زیرزمینی) است. مقادیر کمتر از ۱ برای ضریب 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 (Yoon et al., 2006). مقادیر بیشتر از ۱ نیز، نشان‌دهنده تمایل گیاه در انتقال فلزات، از ریشه به اندام‌های هوایی است (Baker and Brooks, 1989).

^۱- Bioconcentration Factor

^۲- Translocation Factor

۳-۷-۳- ضریب غنی‌شدگی^۱

ضریب غنی‌شدگی (EF)، شاخصی دیگر برای بیان میزان انتقال فلزات، از خاک به اندام‌های هوایی گیاه است. این ضریب از رابطه ۳-۷ به دست می‌آید (Branquinho et al, 2006):

$$EF = C_s / C_{\text{Soil}} \quad \text{رابطه ۳-۷}$$

در این رابطه C_s ، غلظت فلز در اندام‌های هوایی (روزمینی) و C_{Soil} ، غلظت فلز مورد نظر خاک است. به طور کلی، از گیاهانی که دارای ضریب غنی‌شدگی بیشتر از ۱ هستند، گیاهان انباشتگر و گیاهان با مقادیر ضریب غنی‌شدگی کمتر از ۱، گیاهان دافع محسوب می‌شوند (Baker, 1981).

۳-۸- تحلیل آماری داده‌ها

در مطالعات زیست‌محیطی، آگاهی از پارامترها و ویژگی‌های آماری گروهی از داده‌ها، اولین قدم برای شناسایی ماهیت داده‌ها است. آنالیز آماری، ابزاری قدرتمند در ارزیابی خواص و آلودگی خاک است و در تفسیر داده‌های زیست‌محیطی، کمک شایانی می‌کند. آلودگی یکی از پدیده‌های زیست‌محیطی است که دارای ماهیت چند متغیره و کمی است و بدین علت می‌توان از روش‌های آماری در توصیف یا تحلیل آن استفاده نمود (Sielaff and Einax, 2007). مهم‌ترین روش‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، شامل ضریب همبستگی^۲، روش تحلیل خوشه‌ای^۳ و روش تحلیل مؤلفه اصلی^۴ است. از ضریب همبستگی، برای تعیین روابط احتمالی بین متغیرها، از تحلیل خوشه‌ای، برای طبقه‌بندی یا تقسیم‌بندی مجموعه داده‌های موجود (بر اساس اشتراکات یا تشابهات احتمالی) و از روش تحلیل مؤلفه اصلی، برای تعیین عوامل مؤثر بر تغییرپذیری داده‌ها (از جمله منشأ آنها) استفاده می‌شود (Qishlaqi et al., 2009). در زیر به صورت مختصر به توصیف هر یک از پارامترهای آماری پرداخته می‌شود.

^۱- Enrichment Factor

^۲- Correlation Coefficient

^۳- Cluster Analysis

^۴- Principle Component Analysis

۳-۸-۱- آمار توصیفی

آمار توصیفی، شامل تعیین پارامترهایی مانند حداکثر و حداقل داده‌ها، میانگین و انحراف معیار داده‌ها است و می‌تواند تصویری کلی از داده‌ها ارائه دهد.

۳-۸-۲- ضریب همبستگی

ضریب همبستگی، ابزاری آماری، برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. این ضریب، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین شدت وابستگی دو متغیر به یکدیگر است، که نوع رابطه بین آنها (مستقیم یا معکوس) را نیز نشان می‌دهد. این ضریب، بین ۱- تا ۱ تغییر می‌کند و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است. اگر با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش یابد، ضریب همبستگی مثبت است و در صورتی که با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر کاهش یابد، ضریب همبستگی منفی خواهد بود. هر چه ضریب همبستگی به یک نزدیک‌تر باشد بدین معنی است که وابستگی دو متغیر بیشتر است. انواع مختلفی از ضرایب همبستگی وجود دارد. اگر داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند، در این صورت از روش همبستگی پیرسون^۱، که یک روش همبستگی پارامتریک است استفاده می‌شود، اما اگر توزیع داده‌ها، غیر نرمال باشد می‌توان از روش‌های غیرپارامتریک چون اسپیرمن^۲ استفاده نمود. در این مطالعه پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها، از روش همبستگی پیرسون استفاده شد.

۳-۸-۳- تحلیل مؤلفه اصلی^۳

تحلیل مؤلفه اصلی از جمله مهم‌ترین روش‌های آماری چند متغیره است و از آن برای ارائه اطلاعات بیشتر در مورد ارتباط بین نقاط نمونه‌برداری، غلظت آلاینده‌ها، الگوهای همبستگی و عوامل نهفته در ساختار مجموعه داده‌ها، به طور گسترده استفاده شده است (Yalcin et al., 2008). این روش همچنین

^۱- Pearson Correlation

^۲- Spearmans Rank Correlation

^۳- PCA

می‌تواند در شناسایی منابع یا منشأهای آلودگی، مورد استفاده قرار گیرد (Luo et al., 2007).

۳-۸-۴- تحلیل خوشه‌ای

تحلیل خوشه‌ای یک روش آماری چندمتغیره برای گروه‌بندی داده‌ها یا مشاهدات، با توجه به شباهت یا درجه نزدیکی آنهاست. از طریق تحلیل خوشه‌ای، داده‌ها، به خوشه‌های همگن و متمایز از هم تقسیم می‌شوند. آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی^۱، فاصله بین نمونه‌ها را بررسی می‌کند و شبیه‌ترین نقاط را در یک گروه یا خوشه قرار می‌دهد. این فرایند تکرار می‌شود تا همه نقاط در یک خوشه کلی قرار گیرند (Brith, 2003). نتیجه به دست آمده را می‌توان در یک طرح دو بعدی به نام نمودار درختی، نشان داد (Chabukdhara and Nema, 2012).

^۱ - Hierarchical Cluster Analysis

فصل چهارم

ژئوشیمی سنگ‌های آذرین و مجموعه‌های

دگرسانی کانسار ایجو

۴-۱- مقدمه

در این فصل، ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه، کانی‌شناسی زون‌های دگرسانی، ژئوشیمی فلزات سنگین و توزیع آنها در زون‌های دگرسانی مختلف، مورد بحث قرار می‌گیرد. بدین منظور، تعداد ۱۸ نمونه سنگ به روش XRD و XRF و ۸ نمونه به روش ICP-OES، مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. در پردازش داده‌ها و رسم نمودارها نیز از نرم‌افزارهای EXCEL 2013 و GCDKit استفاده شده است.

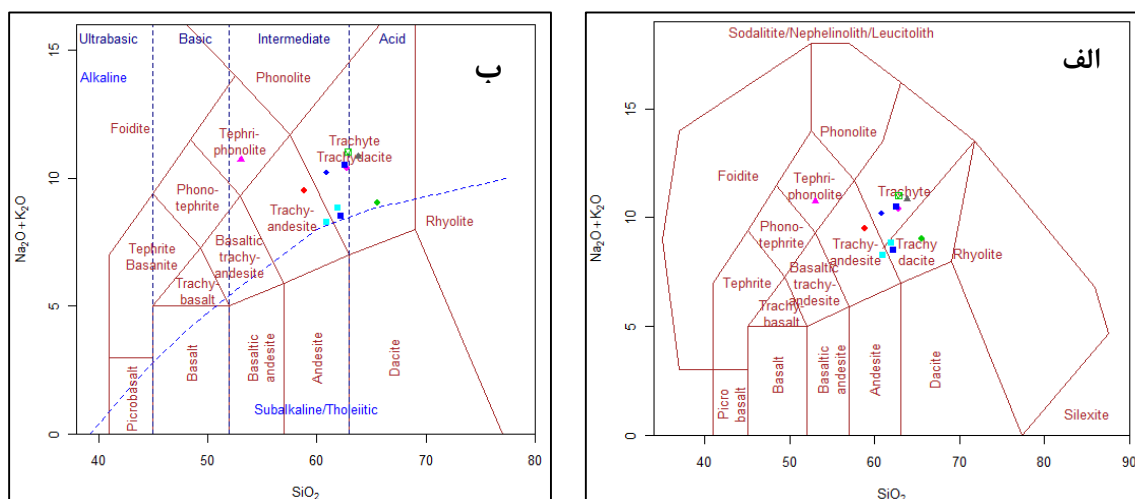
۴-۲- ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی معدن ایجو

سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری معدن ایجو که توده‌های نفوذی دیوریتی و کوارتز دیوریتی درون آنها نفوذ کرده‌اند، مربوط به مجموعه‌های آتشفشانی ائوسن در منطقه هستند که در ادامه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی و رده‌بندی آنها اشاره می‌شود.

۴-۲-۱- ژئوشیمی عناصر اصلی

با استفاده از نمودارهای SiO_2 در مقابل $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (Middlemost, 1994)، سنگ‌های آتشفشانی معدن ایجو، ترکیب سنگ‌شناختی تراکیت، تراکیت داسیت و تراکیت آندزیت را نشان می‌دهند (شکل ۴-۱، الف). میانگین SiO_2 نمونه‌های سنگ آتشفشانی برداشت شده از کانسار ایجو، ۵۶/۴۵٪ بوده و درصد K_2O آنها حدود ۳/۲۷٪ است. میانگین Na_2O سنگ‌های آتشفشانی نیز ۵/۷۲٪ می‌باشد. سنگ‌های آتشفشانی منطقه، از آلومینیوم غنی بوده، به طوریکه میانگین Al_2O_3 در آنها به ۲۱/۱۴ درصد وزنی می‌رسد. آلومینیوم در محیط دگرسانی نسبت به سایر عناصر تحرک کمتری دارد (Mason and Moore, 1982).

بر اساس رده‌بندی نام‌گذاری سنگ‌های پلوتونیک با استفاده نمودار TAS (Le Bas et al., 1986)، بیشتر نمونه‌های برداشت شده، در محدوده تراکیت، تراکیت آندزیت و تراکیت داسیت قرار می‌گیرند (شکل ۴-۱، ب).



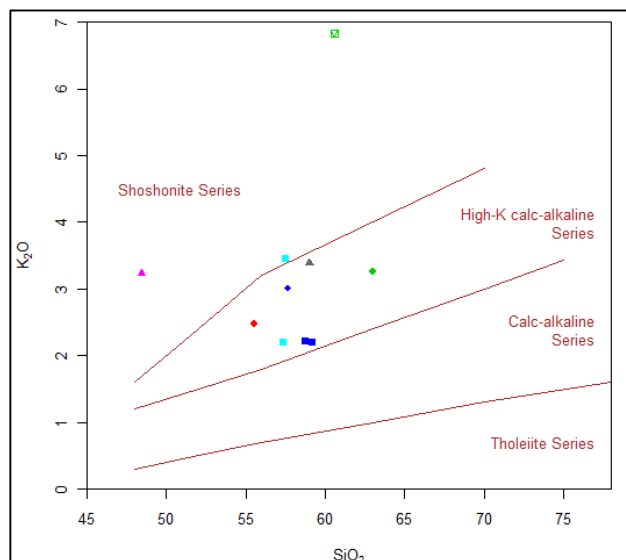
شکل ۴-۱- رده‌بندی شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی معدن مس ایجو (الف) (Middlemost, 1994) و (ب) (Le Bas et al., 1986)

۴-۲-۲- تعیین سری ماگمایی فعالیت‌های آتشفشانی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای نتایج تجزیه شیمیایی در مباحث پترولوژی، استفاده از این نتایج در تعیین سری ماگمایی است. یک سری ماگمایی شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین با ترکیب شیمیایی مختلف است که از یک ماگمای مادر، بر اثر تبلور بخشی، حاصل گردیده‌اند (Kuno, 1968). در مطالعات مربوط به زمین‌شناسی اقتصادی، تعیین سری ماگمایی سنگ میزبان کانی‌سازی، کمک شایانی به مقایسه کانسار مورد بررسی با انواع کانسارهای دیگر و کشف نوع و منشأ کانی‌سازی می‌کند.

به طور کلی سنگ‌های آذرین را به کمک اکسیدهای اصلی و کانی‌های تشکیل‌دهنده آنها، به سه سری ماگمایی شامل سری ساب آلكالن (Sub Alkaline)، سری آلكالن (Alkaline) و سری پراآلكالن (Per Alkaline) تقسیم‌بندی کرده‌اند. سری ساب آلكالن به دو سری کلی کالک آلكالن (کلسیم قلیایی) و ماگمای تولیتی تقسیم می‌شود (کریم‌پور، ۱۳۸۸). سری کلسیم قلیایی خود نیز به دو سری کلسیم قلیایی نوع معمولی و غنی از پتاسیم، تقسیم می‌شود.

بر پایه استفاده از نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976)، بیشتر سنگ‌های آتشفشانی در منطقه مورد مطالعه، در محدوده سری کلسیم قلیایی با پتاسیم زیاد و کمتر در محدوده شوشونیت‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۴-۲).



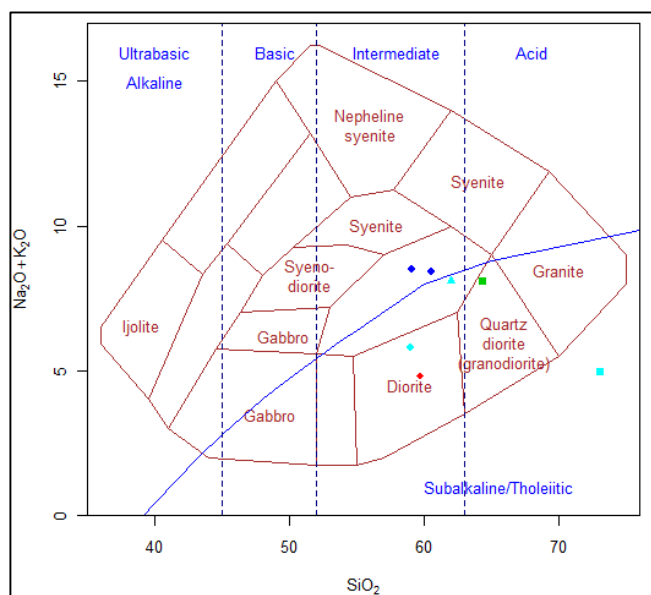
شکل ۴-۲- نمودار تعیین سری ماگمایی برای سنگ‌های آتشفشانی معدن ایجو (Peccherillo and Taylor, 1976)

۴-۳- ژئوشیمی توده‌های نفوذی ایجو

توده نفوذی ایجو، یک توده نیمه‌ژرف با ترکیب سنگ‌شناختی دیوریت و کوارتز دیوریت متعلق به سنگ‌های نیمه‌عمیق به سن الیگوسن- میوسن است. مطالعات میکروسکوپی و آنالیزهای XRD و XRF بر روی نمونه‌های برداشت شده در منطقه، نشان می‌دهد که ترکیب غالب سنگ‌شناختی توده‌های نفوذی، عمدتاً دیوریت تا کوارتز دیوریت است.

۴-۳-۱- ژئوشیمی عناصر اصلی

بر اساس رده‌بندی شیمیایی نامگذاری سنگ‌های پلوتونیک، با استفاده از نمودار SiO_2 در مقابل $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (TAS) (Cox et al., 1979)، نمونه‌های برداشت شده از توده نفوذی ایجو در محدوده سینودیوریت، دیوریت و کوارتز دیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۴-۳). میانگین SiO_2 نمونه‌های سنگ برداشت شده از منطقه، ۶۲/۵۴٪ بوده و میانگین $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$ در نمونه‌های برداشت شده نیز به ترتیب، ۲/۹۴٪ و ۴٪ است و درصد اکسید آلومینیم در نمونه‌های مورد مطالعه از ۱۴/۳۵٪ تا ۲۶/۳۱٪ تغییر می‌کند که از این نظر سنگ‌ها، نسبتاً غنی از Al هستند. نتایج آنالیز XRF نمونه‌های توده نفوذی و سنگ میزبان، در جدول ۴-۱ آورده شده است.



شکل ۴-۳- رده‌بندی ژئوشیمیایی نمونه‌های توده نفوذی منطقه ایجو، بر روی نمودار TAS (Cox et al., 1979)

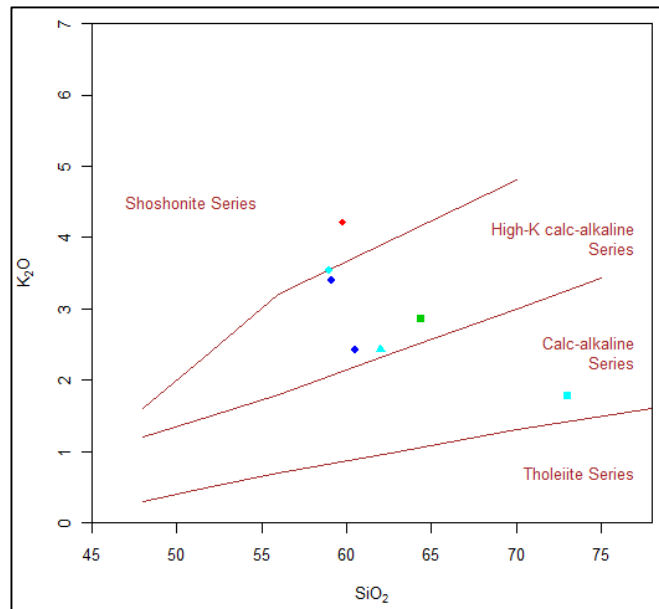
جدول ۴-۱- نتایج آنالیز XRF سنگ‌های توده نفوذی و میزبان معدن مس ایجو (مقادیر بر حسب درصد)

Element	Cu	Fe	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	ZnO	TiO ₂
A01	۰/۰۳	۲/۷۰	۵/۸۲	۲/۴۵	۱۹/۵۸	۵۸/۷۳	۵/۰۵	۲/۲۱	۰/۰۳	۰/۵۳
A02	۰/۰۶	۲/۸۲	۵/۹۹	۲/۲۶	۲۰/۰۱	۵۷/۳۴	۴/۱۹	۲/۱۹	۰/۰۳	۰/۵۰
A09	۰/۱۴	۲/۹۳	۳/۵۰	۰/۶۰	۱۷/۴۱	۴۴/۱۱	۰/۴۳	۳/۸۰	۰/۰۵	۰/۴۰
A14	۲/۶۵	۲/۰۵	۲/۲۴	۱/۶۵	۲۱/۲۰	۵۹/۰۰	۰/۳۵	۳/۵۴	۰/۰۲	۰/۴۰
A22	۰/۰۸	۱/۴۲	۵/۴۳	۱/۱۰	۲۲/۵۶	۶۳/۰۲	۰/۲۵	۳/۲۶	۰/۰۲	۰/۵۰
A26	۰/۰۹	۳/۴۵	۶/۶۳	۱/۹۳	۲۰/۴۵	۵۹/۰۱	۰/۵۷	۳/۳۸	۰/۰۵	۰/۵۳
A27	۰/۱۰	۲/۲۷	۷/۷۳	۲/۶۳	۲۱/۸۴	۵۹/۱۶	۰/۵۰	۲/۱۹	۰/۰۵	۰/۵۲
A30	۰/۰۲	۲/۱۵	۶/۴۶	۲/۷۴	۲۱/۱۵	۵۵/۵۱	۵/۴۰	۲/۴۷	۰/۰۱	۰/۵۳
A31	۰/۰۷	۳/۹۷	۶/۵۷	۶/۱۷	۲۱/۷۴	۴۴/۴۳	۴/۶۱	۳/۲۳	۰/۰۳	۰/۵۶
A35	۰/۰۱	۱/۹۰	۶/۶۷	۲/۸۰	۲۱/۵۵	۵۷/۶۳	۲/۴۷	۳/۰۱	۰/۰۲	۰/۵۳
A37	۰/۱۲	۱/۸۵	۶/۰۰	۲/۰۰	۲۲/۳۰	۶۰/۵۲	۱/۵۳	۲/۴۲	۰/۰۲	۰/۴۷
A38	۰/۵۶	۱/۳۱	۵/۶۹	۱/۷۰	۲۱/۵۰	۶۲/۰۱	۱/۴۱	۲/۴۲	۰/۰۱	۰/۴۴
A39	۰/۰۶	۸/۵۷	۰/۶۱	۰/۵۳	۲۱/۴۰	۵۹/۷۷	۰/۲۴	۴/۲۲	۰/۰۱	۰/۳۷
A40	۰/۸۲	۲/۳۸	۵/۲۰	۱/۸۷	۱۸/۲۸	۶۷/۳۶	۰/۷۰	۲/۸۶	۰/۰۱	۰/۴۵
A45	۰/۰۲	۲/۱۷	۵/۱۰	۱/۷۶	۲۶/۳۱	۵۹/۱۰	۰/۱۵	۳/۴۰	۰/۰۲	۰/۵۲
A46	Tr	۱/۱۰	۳/۷۸	۰/۷۴	۲۳/۴۲	۶۰/۵۵	۰/۶۰	۶/۸۳	۰/۰۷	۰/۴۳
A47	Tr	۲/۰۹	۴/۳۷	۱/۹۶	۲۲/۷۶	۵۷/۵۱	۳/۸۵	۳/۴۵	۰/۲۲	۰/۴۵
A52	۱/۵۸	۱/۲۸	۳/۱۷	۰/۷۳	۱۴/۳۵	۷۳/۰۶	۰/۳۷	۱/۷۷	۰/۰۱	۰/۳۳

۴-۳-۲- تعیین سری ماگمایی توده نفوذی

بر پایه استفاده از نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976)، بیشتر نمونه‌های

مربوط به توده نفوذی، در محدوده کلسیم قلیایی با پتاسیم زیاد قرار می‌گیرند (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴- نمودار تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نفوذی معدن ایجو (Peccerillo and Taylor, 1976)

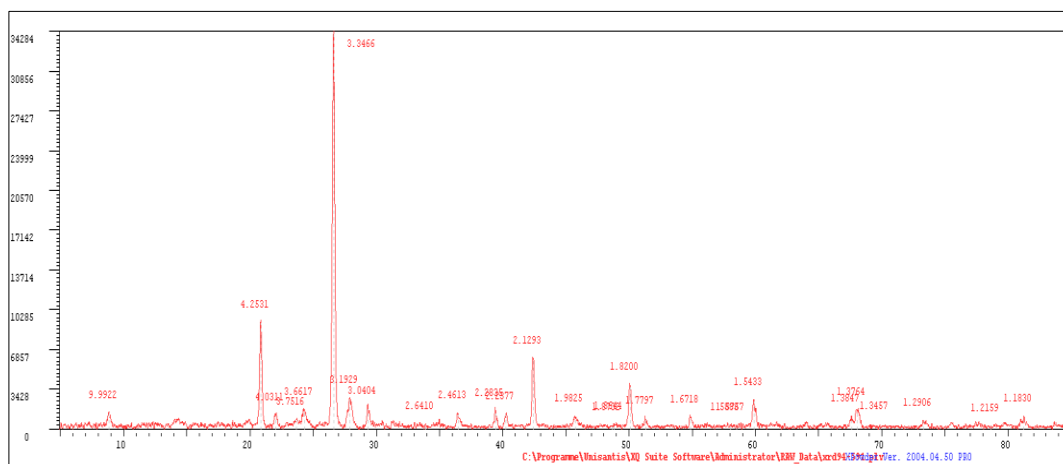
۴-۴- کانی‌شناسی زون‌های دگرسانی

منطقه‌بندی دگرسانی و کانی‌زایی، از مهم‌ترین مشخصات کانسارهای مس پورفیری است. در کانسارهای حاشیه قاره‌ای، دگرسانی‌ها به ترتیب از مرکز به سمت حاشیه شامل پتاسیک، فلیک، آرژیلیک (رسی) و پروپلیتیک است. در منطقه ایجو، چندین نوع دگرسانی مشاهده می‌شود که از شدت درجات مختلفی برخوردار هستند. دگرسانی‌ها بیشتر در توده‌های نفوذی دیوریت پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری و همچنین در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و آذرآواری‌ها گسترش دارند.

۴-۴-۱- دگرسانی پتاسیک

این دگرسانی با مجموعه‌های بیوتیت، فلدسپار پتاسیم، کلریت، انیدریت (Winant, 2010)، بیوتیت، فلدسپار پتاسیم مشخص است (Sillito, 2010). دگرسانی پتاسیک در ایجو، با حضور فلدسپار پتاسیم و

بیوتیت ثانویه مشخص می‌گردد و در بخش‌های مرکزی توده نفوذی، وجود دارد. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس نمونه‌های مرتبط با این دگرسانی (شکل ۴-۵)، نشان می‌دهد که دگرسانی مذبور، به طور عمده شامل کانی‌های کوارتز، پیریت، آلبیت و در برخی نمونه‌ها، کالکوسیت و کالکوپیریت است. همچنین در نمونه‌های برداشت‌شده از این دگرسانی، حضور کانی‌های رسی از جمله ایلیت قابل توجه است که نشان از شدت فرایندهای هوازدگی فلدسپات‌ها است. با توجه به اینکه، دگرسانی کلریتی، بیوتیت‌های ثانویه را نیز تحت تأثیر قرار داده، در برخی نمونه‌ها، کانی‌های کلریتی از جمله کلینوکلر و شاموزیت هم دیده می‌شود.

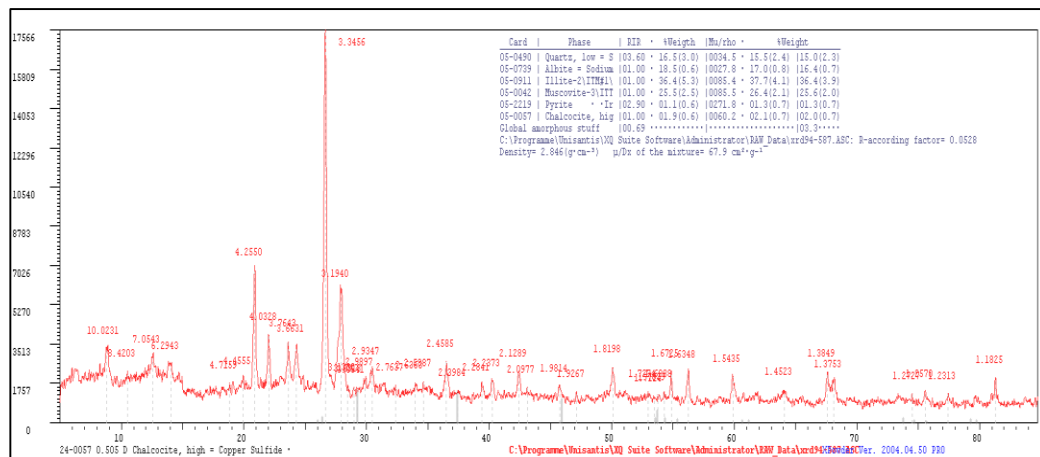


شکل ۴-۵- نتایج XRD نمونه A52 از زون دگرسانی پتاسیک کانسار ایجو

۴-۲-۴- دگرسانی فیلیک

دگرسانی فیلیک یا سرسیتی، در نتیجه شسته شدن سدیم و کلسیم از کانی‌های آلومینوسیلیکاتی و منیزیم‌دار به وجود می‌آید (Beane and Titly, 1981). کانی‌های شاخص این دگرسانی، می‌تواند شامل مجموعه‌های کوارتز، سرسیت، پیریت، هیدرومیکا، کلریت (Lowell and Guilber, 1970)، سرسیت، کوارتز (Sillito, 2010) و مجموعه سرسیت، کوارتز، پیریت باشد (Winant, 2010). این دگرسانی در منطقه ایجو، وسعت قابل توجه دارد و توده نفوذی و سنگ‌های درونگیر آن را تحت تأثیر قرار داده است. به طور کلی همراهی پیریت، کوارتز، سرسیت با کانی‌های رسی و کلریت، ویژگی عمده این نوع دگرسانی در ایجو است (طالبی، ۱۳۸۴). نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس (شکل ۴-۶) هم حضور عمده کانی‌های

کوارتز، مسکویت، پیریت و کانی‌های رسی (ایلیت) را نشان می‌دهد.

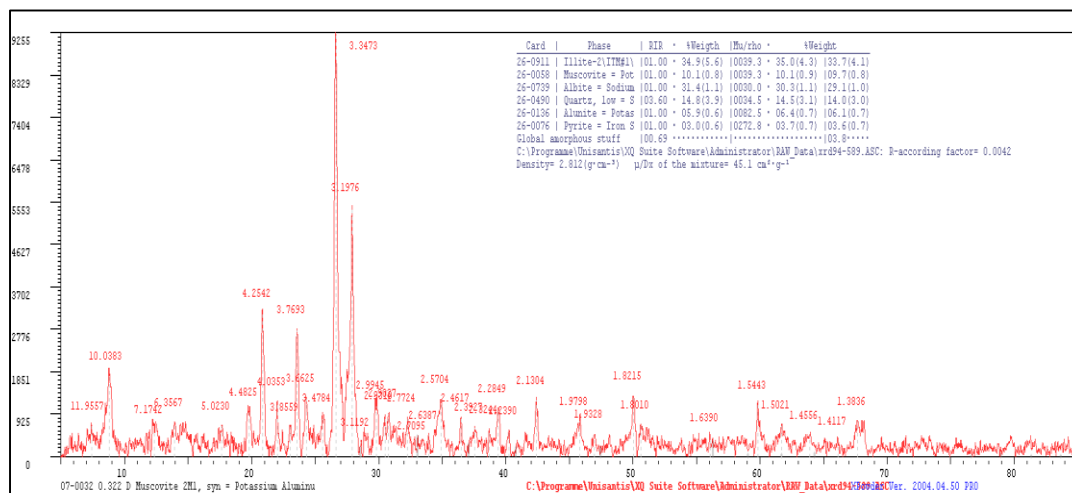


شکل ۴-۶- نتایج XRD نمونه A39 از زون دگرسانی فیلک در معدن ایجو

۴-۳- دگرسانی آرژلیک

این دگرسانی در کانسارهای مس پورفیری با مجموعه‌های کانیایی کائولینیت، مونتموریلونیت، کوارتز (Lowell and Guilbert, 1970)، کوارتز، آلونیت، دیکیت، پیروفیلیت (آرژلیک پیشرفته) و کائولینیت مشخص می‌شود (Sillito, 2010). کائولینیت در شرایط pH اسیدی و در دمای کمتر از ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد و در اثر دگرسانی سنگ‌های غنی از Al_2O_3 به وجود می‌آید. در چنین محیطی، قلیایی‌های حاصل از تجزیه شیمیایی سنگ مادر و به ویژه اکسیدهای سدیم و پتاسیم آن، بر اثر جریان‌های آب خارج می‌شوند. اگر مواد قلیایی به طور کامل از محیط خارج شوند، کائولینیت، و چنانچه درصدی از آن خارج شوند، مونتموریلونیت و ایلیت تشکیل می‌شود (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۰).

نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس (شکل ۴-۷) نمونه‌های این دگرسانی، به حضور عمده کانی‌های رسی (ایلیت)، آلبیت، کوارتز، مسکویت و پیریت (سولفید رایج همراه با این دگرسانی) اشاره می‌کند. وجود کانی آلونیت نیز در برخی نمونه‌ها که نشان‌دهنده شرایط بسیار اسیدی و شستشوی شدید در این زون است، دگرسانی زون آرژلیک را به آرژلیک پیشرفته تأیید می‌کند.

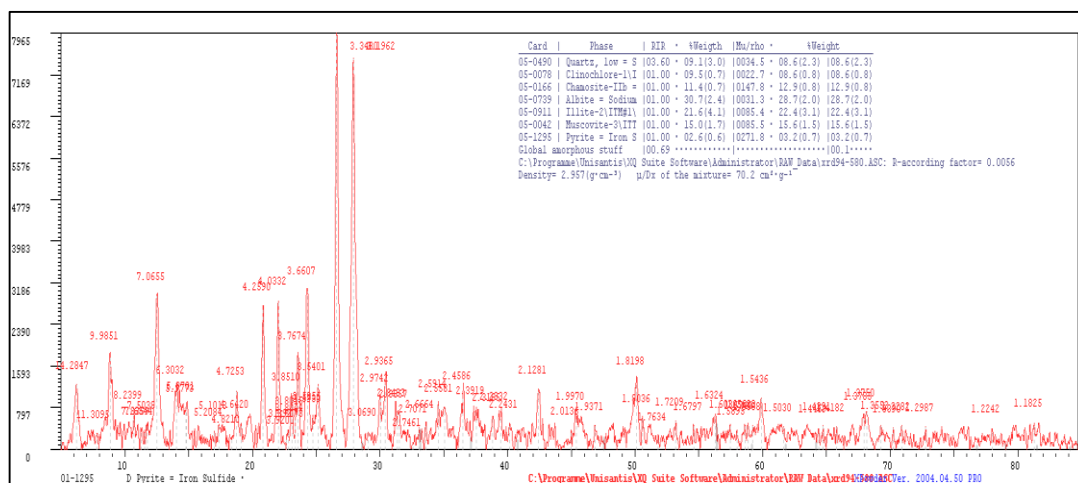


شکل ۴-۷- نتایج XRD نمونه A۴۶ از زون دگرسانی زون آرژلیک در معدن ایجو

۴-۴-۴- دگرسانی پروپلیتیک

دگرسانی پروپلیتیک تحت تأثیر آب‌های جوی و ماگمایی تشکیل شده و توسط مجموعه کانایی آلبيت، اپیدوت، کلریت، کربنات (Sillito, 2010)، کلریت، اپیدوت و کلسیت (Lowell and Guilbert, 1970) مشخص می‌شود. این دگرسانی به طور کلی حاوی کانی‌های کلریت، اپیدت، کلسیت و آلبيت است. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس نمونه‌های مورد آنالیز (شکل ۴-۸) نیز حضور آلبيت، کوارتز، کلریت و کلسیت را نشان می‌دهد.

در جدول ۴-۲ کانی‌های موجود در تعدادی از نمونه‌های سنگ برداشت شده از زون‌های دگرسانی منطقه، ارائه شده است.



شکل ۴-۸- نتایج XRD نمونه A۳۵ از زون دگرسانی زون پروپلیتیک

جدول ۴-۲- کانی‌های اصلی موجود در نمونه‌های سنگ برداشت شده از زون‌های دگرسانی

زون‌های دگرسانی	شماره نمونه	کانی‌های اصلی
پتاسیک	۴۰	کوارتز (۱۵٪)، آلبیت (۱۶/۴٪)، ایلیت (۳۶/۴٪)، مسکویت (۲۵/۶٪)، پیریت (۱/۳٪)، کالکوپیریت (۲٪)، فازهای آمورف (۳/۳٪)
	۵۲	کوارتز (۷۵/۹٪)، آلبیت (۲۱/۵٪)، کالکوپیریت (۲/۶٪)
فیلیک	۳۹	کوپریت (۰/۷٪)، کوارتز (۱۵/۸٪)، مسکویت (۳۲/۲٪)، ایلیت (۳۸/۵٪)، آلونیت (۱/۷٪)، پیریت (۷/۱٪)، فازهای آمورف (۴٪)
	۳۸	کوارتز (۳۹/۷٪)، آلبیت (۳۷/۲٪)، آلونیت (۶/۶٪)، کلسیت (۷/۴٪)، کلینوکلر (۹/۱٪)
	۴۶	ایلیت (۳۳/۷٪)، مسکویت (۹/۷٪)، آلبیت (۲۹/۱٪)، کوارتز (۱۴٪)، آلونیت (۶/۱٪)، پیریت (۳/۶٪)، فازهای آمورف (۳/۸٪)
پروپلیتیک	۳۵	شاموزیت (۶/۱٪)، آلبیت (۴۴/۵٪)، کوارتز (۱۳/۵٪)، ایلیت (۲۷/۴٪)، کلینوکلر (۸/۳٪)، فازهای آمورف (۰/۱٪)
	۲	کلینوکلر (۶/۶٪)، آلبیت (۵۹/۳٪)، کوارتز (۱۵/۶٪)، شاموزیت (۸/۲٪)، کلسیت (۸/۵٪)، پیریت (۱/۷٪)
	۳۰	کلسیت (۵/۸٪)، کلینوکلر (۱۰/۸٪)، کوارتز (۱۰/۸٪)، شاموزیت (۱۳/۵٪)، آلبیت (۳۸/۱٪)، مسکویت (۱۸/۴٪)، پیریت (۲/۵٪)
	۳۱	کلینوکلر (۱۲/۸٪)، آلبیت (۷۰/۸٪)، پیریت (۷/۶٪)، کلسیت (۸/۷٪)، فازهای آمورف (۰/۱٪)

۴-۵- ژئوشیمی فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی

مناطق معدنی با توجه به تمرکز بالای برخی فلزات سنگین در خود، توانایی قابل توجهی برای آلودگی آب و خاک و رهاسازی فلزات سنگین به محیط‌های پیرامونی را دارا هستند. به واسطه عملکرد سیالات گرمابی، در تمام زون‌های دگرسانی، عناصر فلزی به صورت پراکنده در ساختار کانی‌ها و سنگ‌ها جای می‌گیرند. معدن مس ایجو با دارا بودن زون‌های دگرسانی پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک و تمرکز کانی‌های فلزی و غیرفلزی از جمله پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، اکسیدها و هیدروکسیدهای

آهن و کانی‌های رسی، مکان مناسبی برای تمرکز و رهاسازی عناصری چون آرسنیک، سرب، مس، کادمیوم، روی، کروم، کبالت و نیکل به‌ویژه در خاک‌های منطقه است. وفور کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، در زون‌های دگرسانی منطقه ایجو و هوازدگی و فرسایش آن می‌تواند باعث فلزات سنگین آلاینده به محیط شود.

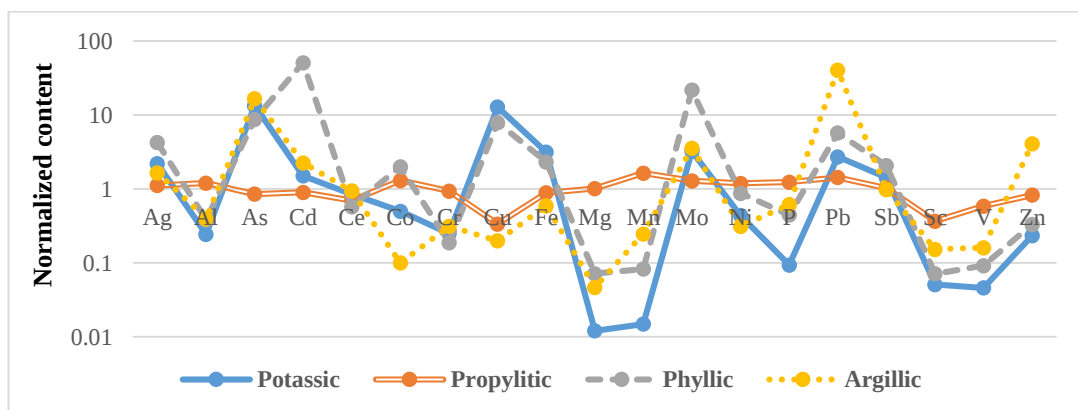
در جدول ۴-۲ غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های مربوط به زون‌های دگرسانی مختلف آورده شده است.

جدول ۴-۳- نتایج آنالیز ICP-OES نمونه‌های سنگ (مقادیر بر حسب mg/kg)												
دگرسانی	Ag	As	Cd	Cr	Co	Cu	Ni	Mg	Mo	Pb	Zn	
A01 میزبان	۰/۲۶	۲/۷	۰/۲	۱۶	۱۰	۱۳۱	۱۶	۱۶۵۱۸	۰/۵۲	۷	۱۰۳	
A14 پتاسیک-فیلیک	۲/۱	۲۰/۸	۱/۲	۸	۱۱	۱۲۹۱۸	۱۲	۱۰۵۴۷	۱/۹۸	۲۲	۹۶	
A22 آرژیلیک ثانویه	۰/۱۸	۲/۴	۰/۱۷	۲	۱	۲۹	۲	۲۵۲۳	۱/۱۹	۳۵	۲۰	
A35 پروپلیتیک	۰/۲۹	۲/۳	۰/۱۸	۱۵	۱۳	۴۴	۱۹	۱۶۷۴۷	۰/۶۷	۱۰	۸۵	
A39 فیلیک	۱/۱	۲۳/۶	۱۰/۲	۳	۲۰	۱۰۳۶	۱۴	۱۱۸۲	۱۱/۳	۴۰	۳۴	
A45 فیلیک	۰/۳۶	۲/۹	۰/۱۸	۹	۱۴	۶۸۶	۲۵	۹۶۹۳	۱/۱۳	۱۳	۶۷	
A46 آرژیلیک	۰/۴۳	۴۵	۰/۴۵	۵	۱	۲۶	۵	۷۷۰	۱/۸۵	۲۸۳	۴۱۹	
A52 پتاسیک	۰/۵۷	۱/۳۶	۰/۳	۴	۵	۱۶۷۴	۷	۲۰۰	۱/۶۸	۱۹	۲۴	

۴-۵-۱- الگوی پراکنش فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی معدن ایجو

به منظور بررسی رفتار زمین‌شیمیایی عناصر سنگین در زون‌های دگرسانی معدن ایجو، از نمودار عنکبوتی استفاده شد (شکل ۴-۹). این نمودار با توجه به نمونه سنگ میزبان آندزیتی دگرسان نشده کانسار، بهنجار شده است. مشاهدات صحرایی و مطالعه مقاطع میکروسکوپی نشان می‌دهد که زون‌های دگرسانی فیلیک و پروپلیتیک در منطقه دارای بیشترین گسترش هستند. با توجه به خاصیت کالکوفیلی برخی فلزات سنگین، بیشترین تمرکز آنها احتمالاً در ساختار کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت و کالکوپیریت، وجود دارد. پیریت کانی اصلی در تمام زون‌های دگرسانی منطقه، به ویژه در دگرسانی

فیلیک است؛ بنابراین انتظار می‌رود این زون، پتانسیل عمده، از نظر رهاسازی فلزات سنگین به محیط را دارا باشد. با این حال، با توجه به عملکرد سیالات گرمایی در تمام زون‌های دگرسانی دیگر نیز، عناصر فلزی به صورت پراکنده در ساختار کانی‌ها و سنگ‌ها، جای گرفته‌اند. این فرایند به همراه فرایندهای بعدی هوازدگی، فروشست و انباشت، نقش مهمی در جابه‌جایی عناصر ایفا کرده و باعث تمرکز بیشتر آنها در زون‌های دگرسانی شده‌اند؛ به طوری که در زون اکسیدان کانی‌هایی مانند اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، کربنات‌های مس، در زون هیپوژن سولفیدهای مس (پیریت و کالکوپیریت)، سولفات‌های مس و آهن و سایر عناصر و در بخش سوپرژن، کانی‌های کالکوسیت، کولیت، بورنیت و سایر سولفیدهای فلزی تشکیل شده‌اند. بر این اساس، طی جابه‌جایی‌های عناصر، از پراکندگی اولیه عناصر کاسته شده و غنی‌شدگی یا تهی‌شدگی آنها در زون‌ها و کانی‌های مشخص، بیشتر قابل تشخیص است. تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از نمونه‌های سنگی زون‌های دگرسانی در محدوده معدن ایجو، نشانگر تمرکز متفاوت عناصر در زون‌های دگرسانی مختلف است. شکل ۴-۹ غنی‌شدگی، تهی‌شدگی و بدون تغییر مانند فلزات سنگین را، در زون‌های مختلف دگرسانی در منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که در زیر به آنها اشاره می‌شود.



شکل ۴-۹- نمودار عنکبوتی زون‌های دگرسانی معدن پورفیری ایجو از نظر غلظت فلزات سنگین

مس (Cu)

در طبقه‌بندی ژئوشیمیایی، مس در گروه عناصر کالکوفیل قرار دارد و در پوسته زمین به طور عمده، در

فازهای سولفیدی تجمع می‌یابد، با این حال در فازهای اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی نیز حضور دارد (Mason and Moore, 1982). از آنجایی که مس یک عنصر کالکوفیل بوده و پیوند بسیار قوی بین مس و گوگرد برقرار است، این موضوع می‌تواند منجر به خروج مس از ساختمان سیلیکات‌ها و ترکیب آن با سولفیدها گردد.

در معدن ایجو نیز غلظت مس در زون دگرسانی پتاسیک، نسبت به سایر دگرسانی‌ها بالاتر است. عنصر مس، از قسمت‌های بالایی و اکسیدی توده‌های سولفیدی اولیه شسته شده و با رسیدن به شرایط احیایی (در منطقه سوپرژن)، به صورت کانی‌های ثانویه ته‌نشین می‌شود؛ بنابراین عیار مس در این منطقه به طور قابل توجهی بالاست. بعد از دگرسانی پتاسیک، دگرسانی فیلیک بیشترین غلظت مس را دارا است.

سرب (Pb)

با توجه به شکل ۴-۹، سرب در دگرسانی آرژیلیک، غنی‌شدگی از خود نشان می‌دهد و در دگرسانی پروپلیتیک، کمترین غنی‌شدگی آن مشاهده می‌شود. سرب، توسط کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن و مواد آلی قابل جذب است که بیشترین مقدار آن، کانی‌های رسی حضور دارد (Kabata-Pendias, 2011). عنصر سرب، بعد از حضور در دگرسانی آرژیلیک، بیشترین مقدار را در دگرسانی فیلیک دارا است. سرب در ابتدا وارد ساختار میکا و فلدسپات‌های پتاسیم‌دار سنگ‌های ماگمایی و دگرگونی می‌شود. این کانی‌ها به استثناء بیوتیت، در برابر هوازدگی مقاوم هستند. مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده غلظت سرب در سنگ‌های آذرین حضور کانی‌های پتاسیم‌دار و به‌ویژه فلدسپات‌های پتاسیک است و سنگی که در ترکیب کانی‌شناسی از این نظر غنی باشد، دارای مقدار سرب بیشتری است (Wedepohl, 1972).

روی (Zn)

غنی‌شدگی فلز روی نیز مانند عنصر سرب، در زون دگرسانی آرژیلیک مشاهده می‌شود (شکل ۴-۹). عنصر روی نخست در ساختار سیلیکات‌ها و اکسیدها مستقر می‌شود و در خلال هوازدگی شیمیایی این کانی‌ها، وارد سیال می‌شود. هوازدگی و اکسیداسیون سولفیدها می‌تواند باعث تمرکز نسبتاً زیاد روی را

در اکسیدها شود (Wedepohl, 1972). صالحی (۱۳۸۳)، با بررسی دقیق غلظت فلزات در زون دگرسانی آرژیلیک، طی برداشت ۲ نمونه از این دگرسانی، که یکی از آنها، غنی از کانی‌های سولفیدی، به ویژه پیریت بوده و دیگری فقیر از کانی‌های سولفیدی بوده است، به این نتیجه رسید که افزایش چشمگیر روی، در این بخش، به رس‌ها تعلق دارد و کانی‌های سولفیدی نقش کمتری در تمرکز این عنصر ایفا کرده‌اند. از این رو، دگرسانی آرژیلیک می‌تواند منبعی بالقوه، جهت آلودگی محیط از نظر فلز روی، به حساب آید.

کروم و نیکل (Cr and Ni)

کروم و نیکل از فلزات سولفیدی شاخص در کانی‌های فرومنیزین‌دار هستند. کروم به صورت Cr^{+3} از نظر ویژگی‌های ژئوشیمیایی مشابه Fe^{+3} است و این موضوع باعث ورود فلز کروم به ساختمان مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک و کلریت و همچنین اپیدوت در زون پروپلیتیک می‌شود (Liang et al., 2013, Philips, 1964). با اینکه کروم در دگرسانی پروپلیتیک معدن ایجو، نسبت به سایر دگرسانی‌ها غلظت بیشتری دارد. کروم در دگرسانی فیلک، به شدت دچار تهی‌شدگی شده است. فلز نیکل، در دگرسانی پروپلیتیک غنی‌شدگی نشان می‌دهد. نیکل در شرایط اسیدی‌تری نسبت به کروم از محیط خارج می‌شود و بنابراین بیشترین تهی‌شدگی را در زون دگرسانی آرژیلیک کانسار ایجو نشان می‌دهد. نیکل از لحاظ بار و شعاع یونی، شبیه منیزیم و آهن بوده و در سنگ میزبان در ساختار کانی‌های مافیک حضور دارد. با توجه به تهی‌شدگی نیکل در طی فرایند دگرسانی آرژیلیک، می‌توان شستشوی اسیدی و تخریب کانی‌های مافیک را عامل این تهی‌شدگی در نظر گرفت.

آرسنیک (As)

شبه فلز آرسنیک در دگرسانی آرژیلیک، بیشترین غنی‌شدگی را از خود نشان می‌دهد و بعد از آن در دگرسانی‌های پتاسیک و فیلک حضور دارد. آرسنیک به دلیل ماهیت کالکوفیلی خود، تمایل به حضور در کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت و کالکوپیریت داشته و این کانی‌ها می‌توانند مقادیر قابل توجهی

آرسنیک را در خود جای دهند. البته نقش کانی‌های رسی را در جذب یون‌های فلزی از جمله آرسنیک و تثبیت آنها، نباید نادیده گرفت. آرسنیک می‌تواند به صورت کمپلکس‌های یونی، جذب کانی‌های رسی شود که در نتیجه، باعث تمرکز این عنصر در سنگ‌های آرژیلیکی منطقه می‌گردد.

فصل پنجم

ارزیابی آلودگی خاک

۵-۱- مقدمه

خاک به عنوان یکی از اجزای مهم و اساسی اکوسیستم، نقش مهمی در چرخه عناصر (از جمله فلزات سنگین) ایفا می‌کند (Kabata-Pendias, 1993). فلزات سنگین، اغلب در محیط خاک پایدار بوده و از راه‌های مختلف به زنجیره غذایی موجودات زنده وارد می‌شوند. عوامل مختلفی بر جذب و تحرک فلزات در خاک اثرگذار هستند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به ویژگی‌های ذاتی خاک اشاره کرد. ارزیابی آلودگی خاک و تعیین منشأ آلاینده‌ها و فلزات سنگین از نظر زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت است و گامی مهم در جهت مدیریت خاک‌های آلوده محسوب می‌شود.

در این فصل، ابتدا به بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک (pH، درصد ماده آلی و بافت خاک) پرداخته می‌شود. سپس ویژگی‌های کانی‌شناختی برخی از نمونه‌های خاک منطقه مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت وضعیت آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین، با استفاده از شاخص‌هایی چون زمین‌انباشت و ضریب غنی‌شدگی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین برای تعیین میزان تحرک فلزات و ارزیابی خطر ناشی از آنها نیز، از ضریب تحرک و کد ارزیابی خطر استفاده گردید. به منظور ارزیابی منشأ عناصر در نمونه‌های خاک هم از روش‌های آماری چند متغیره (ضریب همبستگی، تحلیل مؤلفه اصلی و آنالیز خوشه‌ای) استفاده شد.

۵-۲- بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک

رفتار عناصر در خاک معمولاً توسط ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک کنترل می‌شود. برخی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک، در جدول ۵-۱ آورده شده است.

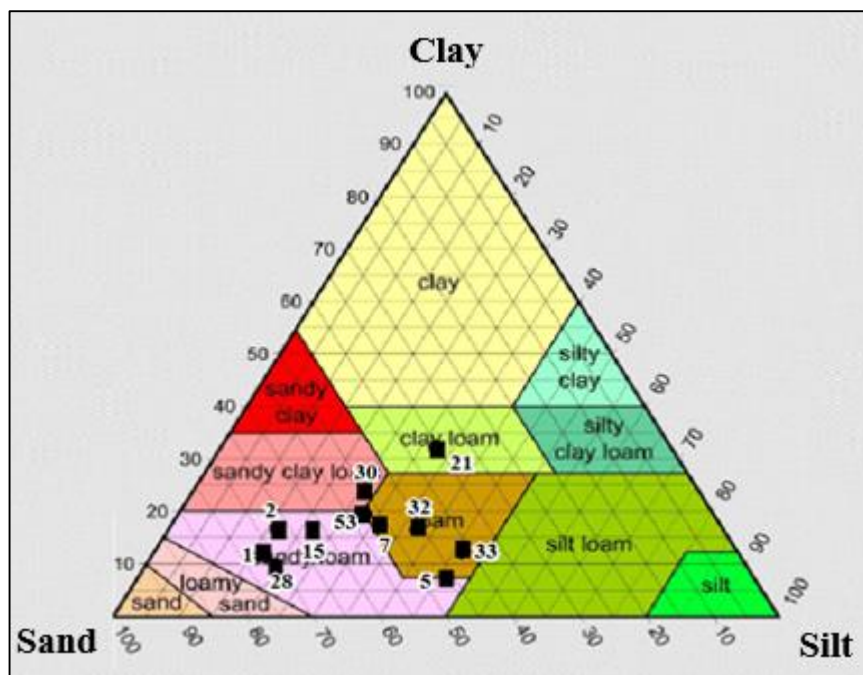
۵-۲-۱- بافت نمونه‌های خاک

بافت خاک یکی از پارامترهای مؤثر در جذب و انباشت فلزات سنگین بوده و نشان‌دهنده درصد ذرات اصلی خاک است. با توجه به شکل ۵-۱، در خاک‌های منطقه میزان رس، از ۷ تا ۳۳ درصد (میانگین ۱۶/۲۷ درصد)، میزان سیلت از ۱۶ تا ۴۶ درصد (میانگین ۲۹/۴۵ درصد) و میزان ماسه از ۳۵ تا ۷۱

درصد (میانگین ۵۴ درصد) تغییر می‌کند. به منظور طبقه‌بندی خاک از مثلث نام‌گذاری بافت خاک (USDA, 1987) استفاده شد. بر اساس این طبقه‌بندی، بافت نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه، عموماً در رده لومی - ماسه‌ای (Sand Loam) و لومی (Loam) قرار می‌گیرد. بنابراین ماسه و رس به ترتیب بیشترین و کمترین بخش خاک را تشکیل می‌دهند.

جدول ۵-۱- پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک

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 ۵-۱- مثلث طبقه‌بندی بافت خاک (USDA) و موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی آن

۵-۲-۲- pH نمونه‌های خاک

pH خاک و به عبارتی غلظت یون هیدروژن، از عوامل مؤثر بر گونه‌سازی فلزات، انحلال‌پذیری کانی‌ها و زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین در خاک است (Salomons, 1995). در شرایط pH اسیدی، معمولاً تحرک‌پذیری فلزات در خاک، افزایش یافته و کمتر جذب اجزای خاک می‌شوند. بر اساس نتایج بدست آمده، pH نمونه‌های خاک مورد مطالعه از ۸/۰۶ تا ۸/۶۹ تغییر می‌کند. جدول ۵-۲ رده‌بندی خاک‌ها را بر اساس pH نشان می‌دهد. با توجه به این رده‌بندی، خاک‌های منطقه در رده خاک‌های نسبتاً قلیایی و قلیایی زیاد قرار می‌گیرند. قلیایی بودن خاک‌های منطقه، که احتمالاً به دلیل حضور کربنات کلسیم است، عاملی مهم در تمرکز و تثبیت فلزات سنگین محسوب می‌شود.

جدول ۵-۲- رده‌بندی خاک‌ها بر مبنای مقادیر pH (USDA, 1998)

pH	توصیف خاک‌ها	pH	توصیف خاک‌ها
۳/۵ – ۴/۴	به شدت اسیدی	۶/۶ – ۷/۳	خنثی
۴/۵ – ۵	بسیار اسیدی	۷/۴ – ۷/۸	کمی قلیایی
۵/۱ – ۵/۵	اسیدی	۷/۹ – ۸/۴	نسبتاً قلیایی
۵/۶ – ۶	نسبتاً اسیدی	۸/۵ – ۹	بسیار قلیایی
۶/۱ – ۶/۵	کمی اسیدی		

۵-۲-۳- درصد ماده آلی نمونه‌های خاک

ماده آلی خاک، از عوامل مهم در جذب فلزات سنگین در خاک بوده و باعث کاهش تحرک‌پذیری و زیست‌دسترس‌پذیری فلزات در خاک می‌شود (Sherene, 2010). با توجه به جدول ۵-۱ میزان ماده آلی نمونه‌های خاک از ۰/۲۶ تا ۳/۳۰ درصد (میانگین ۱/۵۵ درصد) متغیر است. به طور کلی با در نظر گرفتن اقلیم نیمه خشک تا خشک منطقه ایجو، خاک‌های منطقه مورد مطالعه، فقیر از ماده آلی هستند. بافت خاک نیز مقادیر کم رس را در ترکیب خاک نشان می‌دهد؛ بنابراین خاک‌های منطقه ایجو، از نظر این دو پارامتر در رده خاک‌های غیر واکنش‌پذیر قرار می‌گیرند.

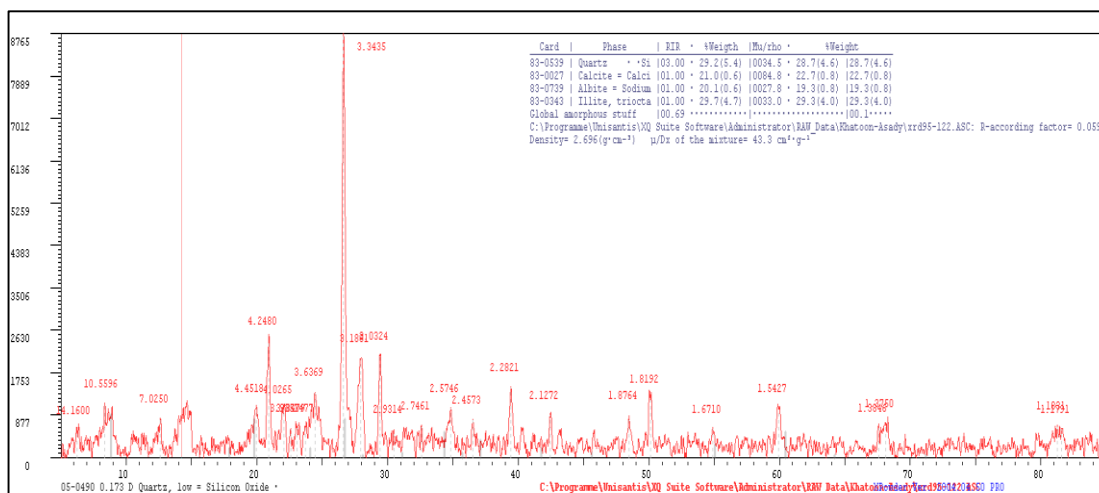
۵-۳- کانی‌شناسی نمونه‌های خاک

به منظور ارزیابی و بررسی کانی‌های موجود در خاک منطقه، از نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. در ادامه، الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به ۸ نمونه خاک (با توجه به زون‌های دگرسانی منطقه) ارائه می‌شود. در جدول ۵-۳ تا جدول ۵-۶ نیز کانی‌های موجود در تعدادی از نمونه‌های خاک برداشت شده از محدوده زون‌های دگرسانی منطقه، ارائه شده است.

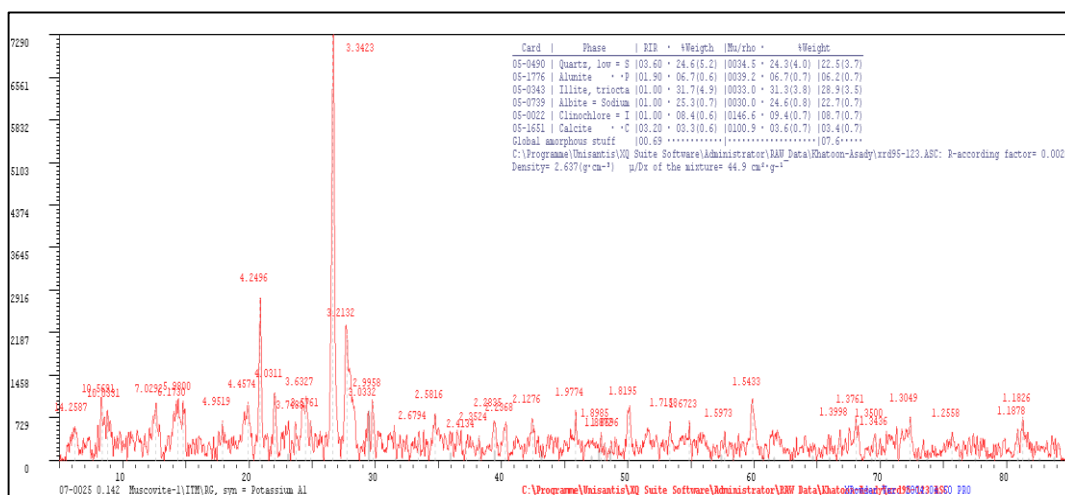
جدول ۵-۳- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی پتاسیک در منطقه مورد مطالعه

زون‌های دگرسانی	شماره نمونه	کانی‌های اصلی
پتاسیک	۳۱	کوارتز (۲۸/۷٪)، کلسیت (۲۲/۷٪)، آلبیت (۱۹/۳٪)، ایلیت (۲۹/۳٪).
	۳۲	کوارتز (۲۲/۵٪)، آلونیت (۶/۲٪)، ایلیت (۲۸/۹٪)، کلینوکلر (۸/۷٪)، کلسیت (۳/۴٪)، آلبیت (۲۲/۷٪)، فازهای آمورف (۷/۶٪)
	۳۳	مسکویت (۲۳/۸٪)، کوارتز (۳۲/۳٪)، کلینوکلر (۱۶/۶٪)، آلبیت (۲۷/۱٪)

۵-۳-۱- نمونه‌های خاک برداشت‌شده از زون دگرسانی پتاسیک



شکل ۵-۲- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۱ (دگرسانی پتاسیک)

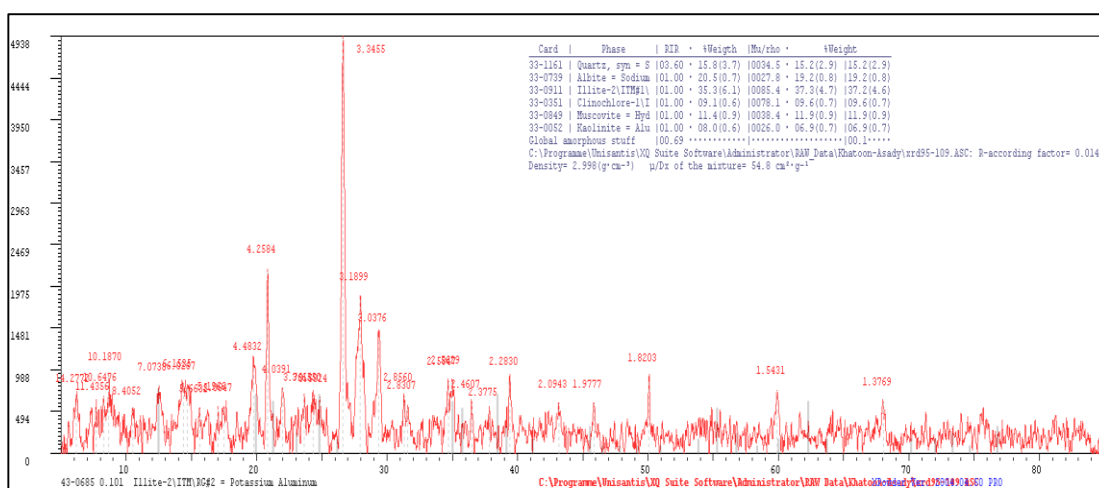


شکل ۵-۳- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۲ (دگرسانی پتاسیک)

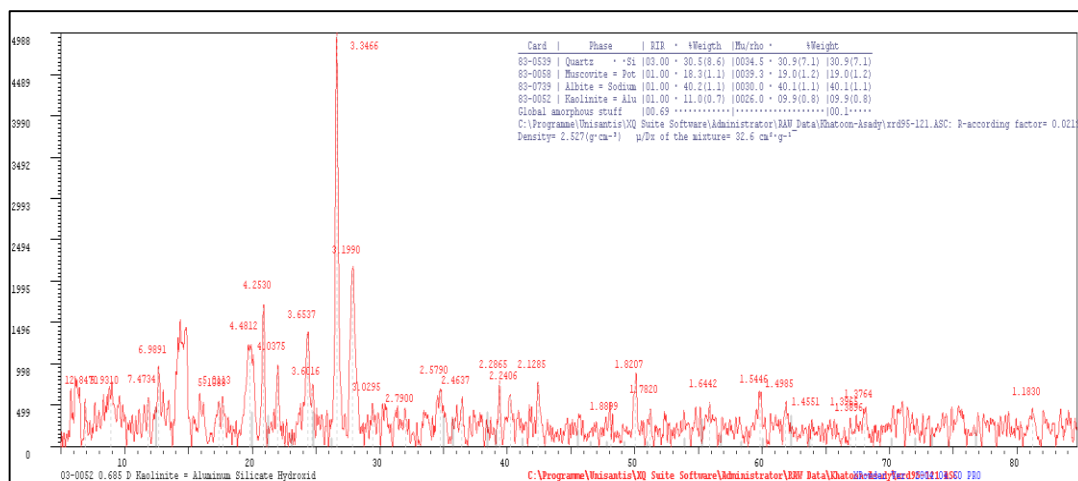
جدول ۵-۴- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی فلیک در منطقه مورد مطالعه

زون‌های دگرسانی	شماره نمونه	کانی‌های اصلی
فلیک	۳	کلسیت (۱۶/۲)، کوارتز (۱۵/۲)، مسکویت (۱۴)، آلپیت (۳۳/۸)، ایلیت (۲۰/۸)
	۵	مسکویت (۱۳)، کوارتز (۹/۸)، کلسیت (۴۴/۵)، ایلیت (۱۹/۷)، آلپیت (۱۲/۹)
	۷	کوارتز (۱۵/۲)، آلپیت (۱۹/۲)، ایلیت (۳۷/۲)، کلینوکلر (۹/۶)، مسکویت (۱۱/۹)، کائولینیت (۶/۹)
	۳۰	کوارتز (۳۰/۹)، مسکویت (۱۹)، آلپیت (۴۰/۱)، کائولینیت (۹/۹)

۵-۳-۲- نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی فلیک



شکل ۵-۴- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۷ (دگرسانی فلیک)

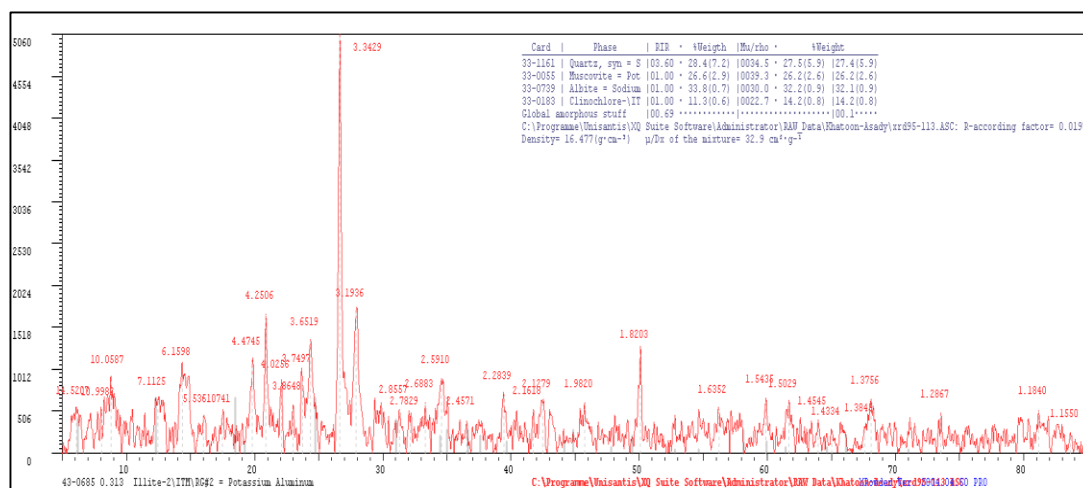


شکل ۵-۵- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۰ (دگرسانی فلیک)

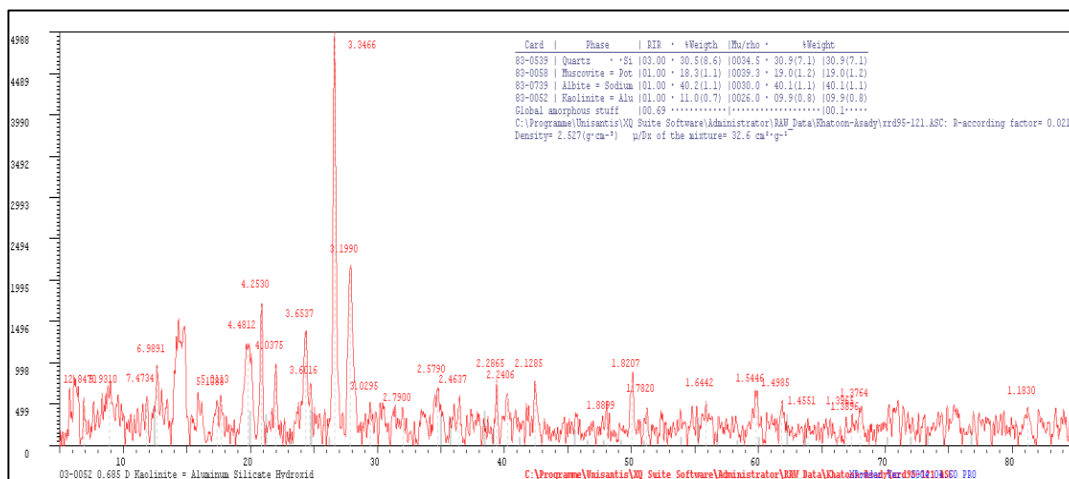
جدول ۵-۵- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی آرژلیک در منطقه مورد مطالعه

زون‌های دگرسانی	شماره نمونه	کانی‌های اصلی
آرژلیک	۱۵	کوارتز (۲۷/۴٪)، مسکویت (۲۶/۲٪)، آلبیت (۳۲/۱٪)، کلینوکلر (۱۴/۲٪)
	۲۱	ایلیت (۳۸/۴٪)، آلبیت (۳۰/۲٪)، کوارتز (۱۷/۸٪)، کلینوکلر (۱۳/۴٪)

۵-۳-۳- نمونه خاک برداشت شده از زون دگرسانی آرژلیک



شکل ۵-۶- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۱۵ (دگرسانی آرژلیک)

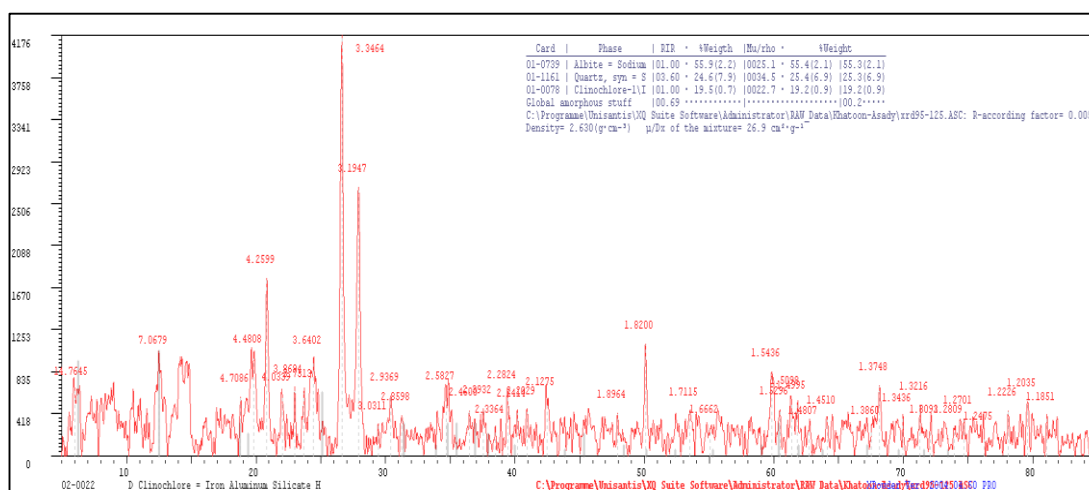


شکل ۵-۷- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۲۱ (دگرسانی آرژیلیک)

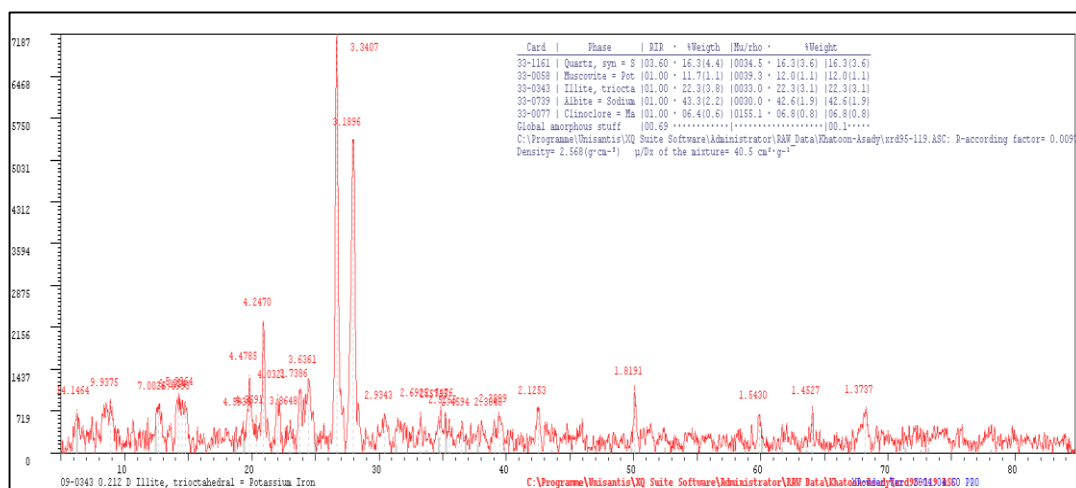
جدول ۵-۶- کانی‌های اصلی نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی پروپلیتیک در منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه	زون‌های دگرسانی	کانی‌های اصلی
۹	پروپلیتیک	کلسیت (۵۱۳/۵)، کوارتز (۱۱/۸)، مسکویت (۱۴/۷)، کائولینیت (۷/۲)، ایلیت (۲۲)، آلبیت (۱۹/۱)، کلینوکلر (۱۱/۶)
۲۶		آلبیت (۲۵/۳)، کوارتز (۱۸/۹)، ایلیت (۲۳/۹)، مسکویت (۱۶/۵)، کلینوکلر (۷/۸)، فازهای آمورف (۷/۶)
۲۸		کوارتز (۱۶/۳)، مسکویت (۱۲)، ایلیت (۲۲/۳)، آلبیت (۴۲/۶)، کلینوکلر (۶/۳)
۳۵		آلبیت (۵۵/۳)، کوارتز (۲۵/۳)، کلینوکلر (۱۹/۲)

۵-۳-۴- نمونه‌های خاک برداشت شده از زون دگرسانی پروپلیتیک



شکل ۵-۸- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۳۵ (دگرسانی پروپلیتیک)



شکل ۵-۹- نتایج XRD نمونه خاک شماره ۲۸ (دگرسانی پروپلیتیک)

با توجه به نمودارها و نتایج به دست آمده، کانی‌های موجود در نمونه‌های خاک منطقه، در تمامی زون‌های دگرسانی، کم و بیش مشابه بوده و شامل کانی‌های کوارتز، ایلیت، مسکویت، کلینوکلر، آلبیت، کلسیت و کائولینیت هستند. همانطور که مشخص است، کانی‌های رسی در تمامی نمونه‌ها مورد مطالعه، حضور عمده دارند، و به همین دلیل انتظار می‌رود خاک‌های منطقه توانایی بالایی در جذب فلزات داشته باشند.

۵-۴- بررسی غلظت و توزیع فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

به منظور بررسی غلظت کل فلزات سنگین و ارزیابی آلودگی خاک منطقه، با تفکیک زون‌های دگرسانی، از نمودارهای ستونی، نقشه‌های توزیع و شاخص‌های ژئوشیمیایی استفاده شد. آمار توصیفی غلظت کل فلزات سنگین، در هر یک از زون‌های دگرسانی، در جدول ۵-۷ آورده شده است.

۵-۴-۱- مس

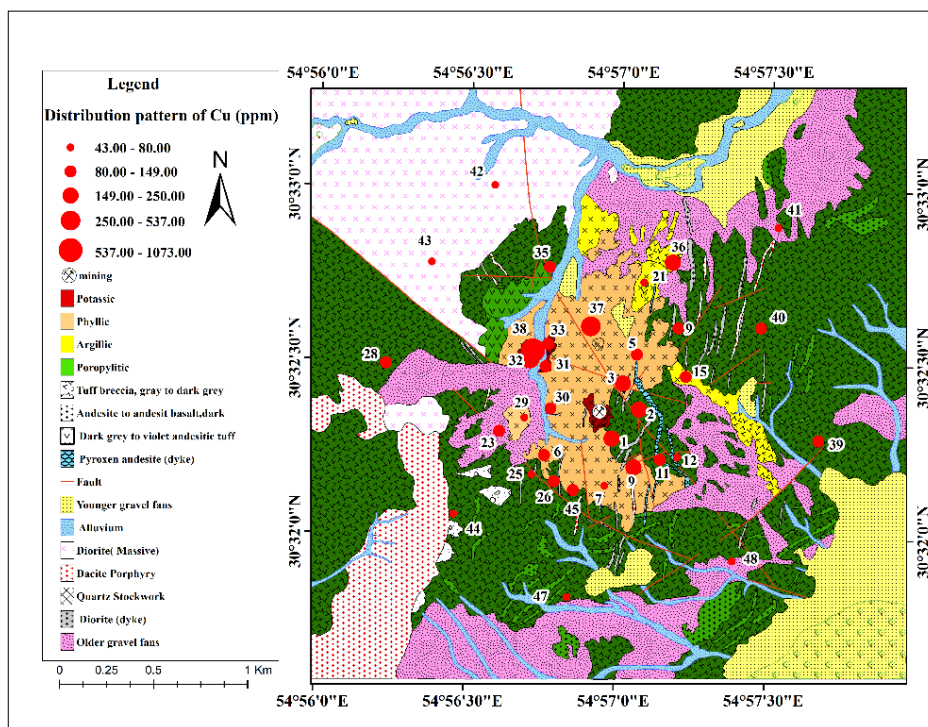
میانگین غلظت مس در خاک‌های جهانی ۳۸/۹ mg/kg است (Kabata-Pendias, 2011). شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱، به ترتیب نقشه توزیع فلز مس را در خاک‌های منطقه مورد مطالعه و غلظت این فلز را در زون‌های دگرسانی نشان می‌دهند. حداکثر غلظت مس در خاک‌های منطقه ۱۰۷۳ mg/kg و حداقل

آن ۴۴ mg/kg است. همانطور که مشاهده می‌شود غلظت مس در خاک‌های منطقه ایجو، بالاتر از غلظت میانگین آن در خاک‌های جهانی است. همچنین غلظت این فلز در زون پتاسیک بیشترین مقدار را داراست.

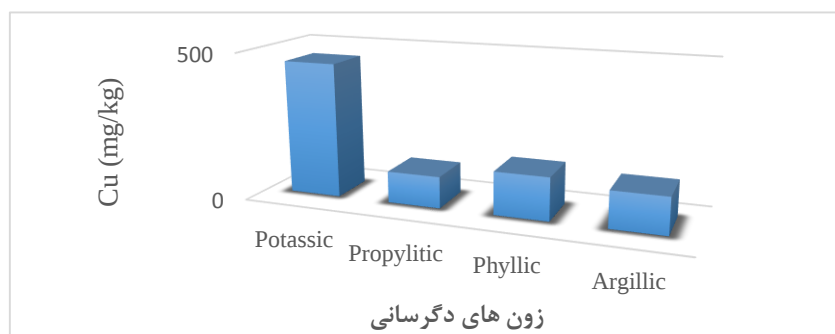
جدول ۵-۷- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک برداشت شده از زون‌های دگرسانی مختلف (مقادیر بر حسب mg/kg)

دگرسانی	As	Pb	Ni	Cu	Zn	Cr
بیشینه	۱۶/۸۰	۲۳	۷۹	۱۰۷۳	۱۳۵	۱۶۶
کمینه	۹	۱۰	۷۲	۱۰۸	۷۸	۱۳۲
میانگین	۱۳/۶۰	۱۷/۲۵	۷۶/۲۵	۴۵۷/۲۵	۱۰۵	۱۵۰
بیشینه	۳۷/۲۰	۲۵۲	۷۸	۳۷۵	۳۴۳	۱۳۹
کمینه	۱۲/۱۰	۱۹	۳۵	۴۴	۱۲۱	۵۸
میانگین	۱۹/۰۸	۹۲/۴۴	۵۹/۷۷	۱۴۵/۸۸	۲۰۳/۸۸	۱۰۰/۸۸
بیشینه	۲۴/۳۰	۳۱۵	۸۶	۲۵۰	۳۳۷	۱۴۶
کمینه	۸/۱۰	۸	۳۳	۴۷	۸۰	۵۱
میانگین	۱۴/۷۵	۹۰/۰۷	۵۶/۱۵	۱۰۷/۳۰	۱۸۰/۲۳	۱۰۶/۲۳
بیشینه	۶۶/۱۰	۱۸۸	۷۱	۱۹۲	۸۳۳	۱۲۷
کمینه	۳۰/۱۰	۶۳	۶۰	۷۴	۳۷۲	۱۱۰
میانگین	۴۷/۰۶	۱۳۷	۶۶	۱۲۵	۵۸۰/۶۶	۱۱۶

بالا بودن غلظت مس در نمونه‌های شماره ۳۸ و ۳۲ به دلیل قرارگیری این دو نمونه، در زون دگرسانی پتاسیک است. در دگرسانی پتاسیک، به دلیل وفور کانی‌های سولفیدی، غلظت بالایی از گوگرد وجود دارد که غنی‌شدگی مس را به دنبال دارد. علاوه بر این، حضور سایر کانی‌های مس‌دار، از جمله مالاکیت و آزوریت در دگرسانی پتاسیک را می‌توان دلیلی بر غلظت بالای مس در خاک‌های این زون دانست. لازم به ذکر است، کانی‌های ذکر شده، در نمونه‌های سنگ مربوط به این دگرسانی حضور داشته که بعد از متلاشی شدن و هوازدگی، فلزات خود را به درون خاک رها می‌سازند.



شکل ۵-۱۰- نقشه توزیع مس در خاک‌های منطقه ایجو

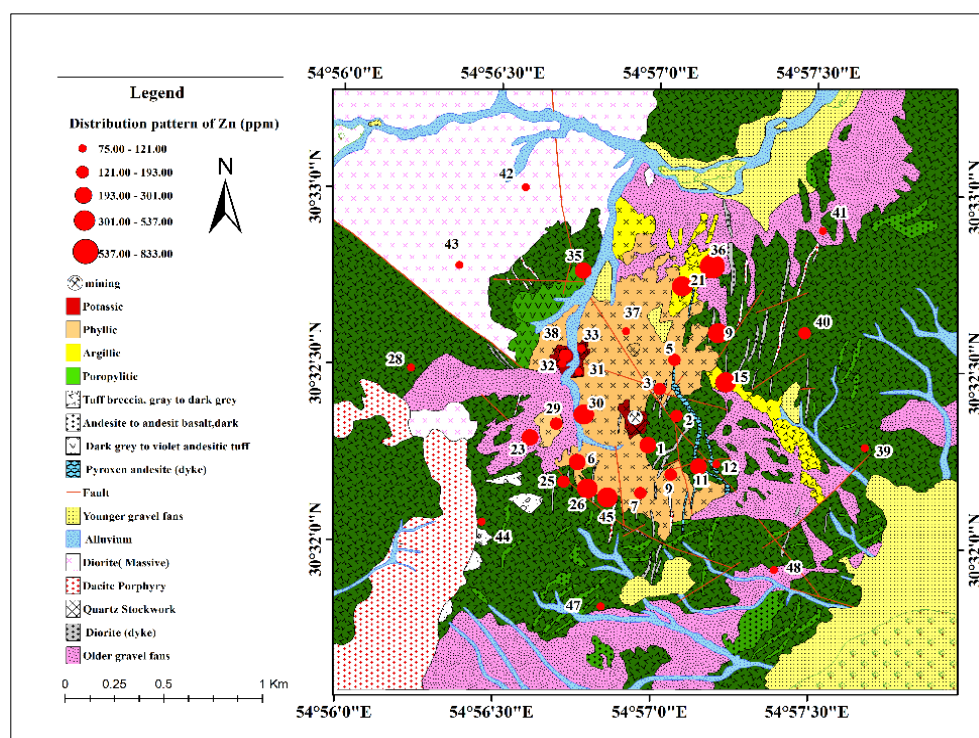


شکل ۵-۱۱- میانگین غلظت مس در زون‌های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه

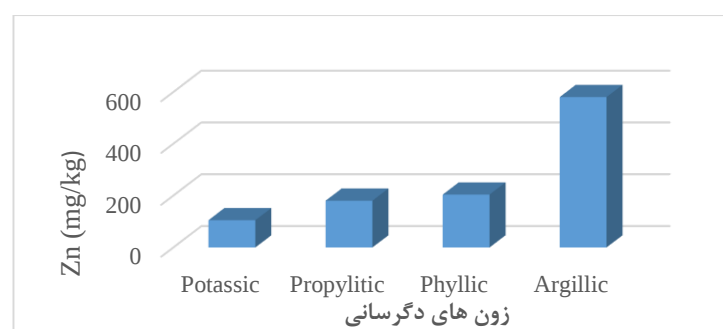
۵-۴-۲- روی

غلظت میانگین روی در خاک‌های جهانی 64 mg/kg است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). در شکل ۵-۱۲، نقشه توزیع فلز روی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. بیشترین غلظت روی در خاک‌های مورد مطالعه، 833 mg/kg (در ایستگاه شماره ۳۶) و کمترین غلظت آن 75 mg/kg (در ایستگاه شماره ۴۳) مشاهده می‌شود؛ بنابراین غلظت این فلز در خاک‌های منطقه ایجو، بیشتر از مقدار میانگین جهانی آن است. روی به طور یکنواخت در سنگ‌های آذرین حضور دارد

و طی فرایند هوازدگی بسیار متحرک است و به راحتی توسط کربنات‌ها، رسوب می‌کند و یا توسط کانی‌ها یا ترکیبات آلی، به‌ویژه در حضور ترکیبات گوگردی جذب می‌شود. فازهای رسی نیز ظرفیت بالایی برای جذب و نگهداشت روی دارند (Kabata-Pendias, 2011). بیشترین غلظت این فلز در نمونه شماره ۳۶ واقع در زون دگرسانی آرژیلیک دیده می‌شود و می‌توان چنین استنباط کرد که کانی‌های رسی باعث تمرکز این فلز در خاک این زون شده‌اند. شکل ۵-۱۳ نیز نشان‌دهنده توزیع فلز روی، در بین زون‌های مختلف دگرسانی منطقه است و همانطور که مشاهده می‌شود بالاترین غلظت این فلز در زون دگرسانی آرژیلیک وجود دارد.



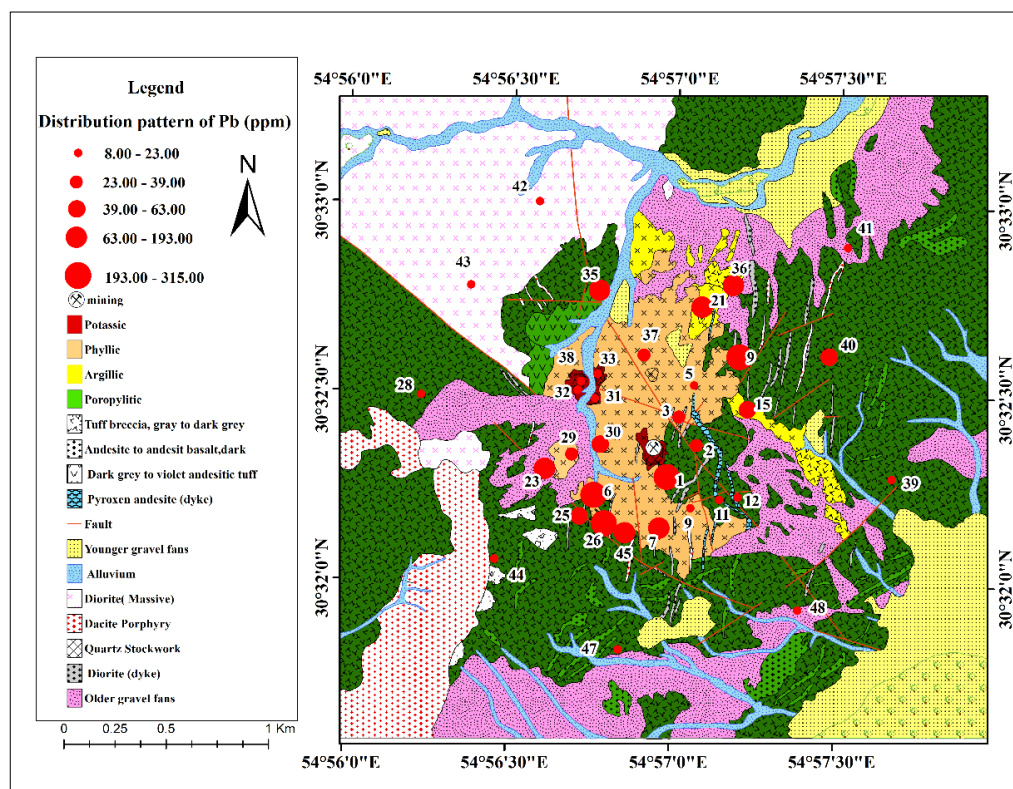
شکل ۵-۱۲- نقشه توزیع روی در خاک‌های معدنی منطقه ایجو



شکل ۵-۱۳- میانگین غلظت روی در زون‌های دگرسانی منطقه مورد مطالعه

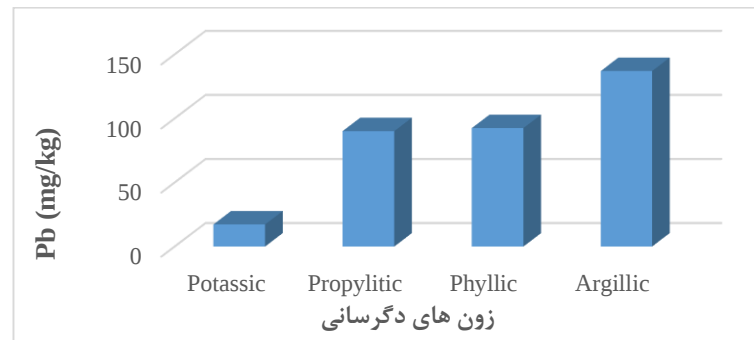
۵-۴-۳- سرب

بر اساس نتایج به دست آمده (شکل ۵-۱۴) بیشترین غلظت سرب در خاک‌های منطقه مورد مطالعه، 315 mg/kg و کمترین غلظت آن حدود 8 mg/kg می‌باشد. همانطور که مشخص است غلظت سرب در برخی نقاط، بالاتر از غلظت میانگین آن در خاک‌های جهانی (27 mg/kg) است (Kabata-Pendias, 2011).



شکل ۵-۱۴- نقشه توزیع سرب در خاک‌های معدنی منطقه ایجو

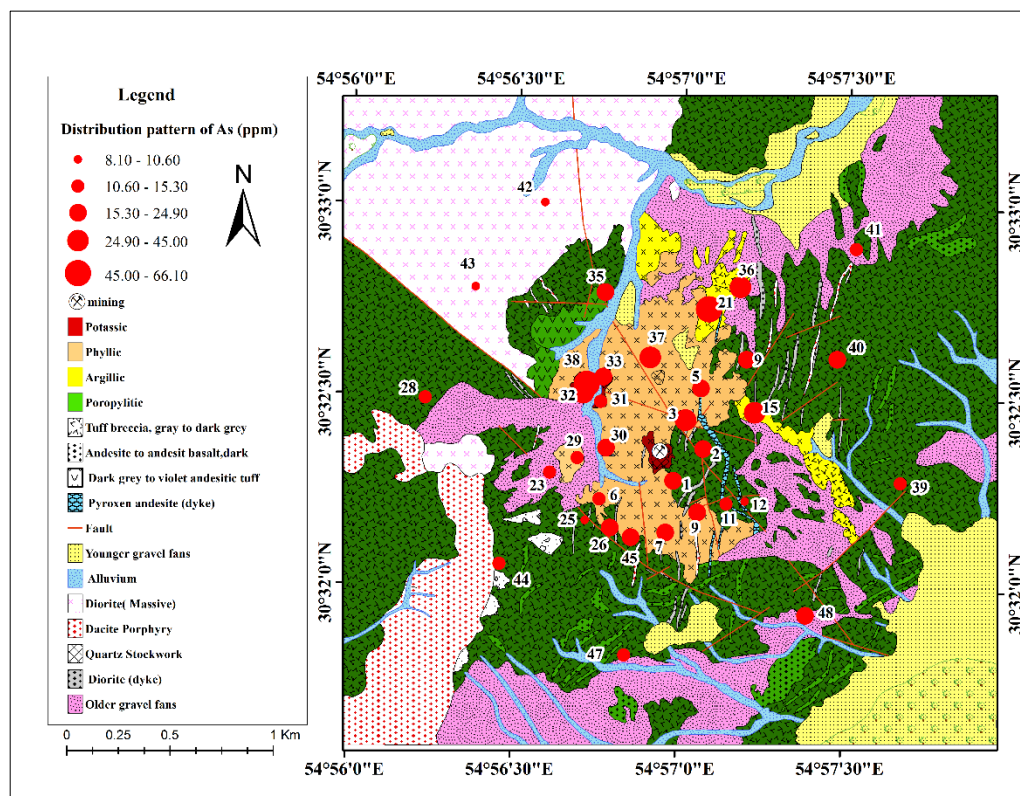
سرب در خاک، عموماً از سنگ مادر منشأ می‌گیرد و فراوانی آن در خاک مربوط به جزء رسی است و بنابراین رسوبات آرژیلیکی، غالباً سرب بیشتری دارند (Kabata-Pendias, 2011). با این حال، بالاترین غلظت سرب در نمونه شماره ۲۶ (واقع در زون دگرسانی پروپلیتیک) دیده می‌شود ولی به طور میانگین در میان زون‌های دگرسانی (شکل ۵-۱۵) بیشترین سهم را در تمرکز سرب، دگرسانی آرژیلیک نشان می‌دهد.



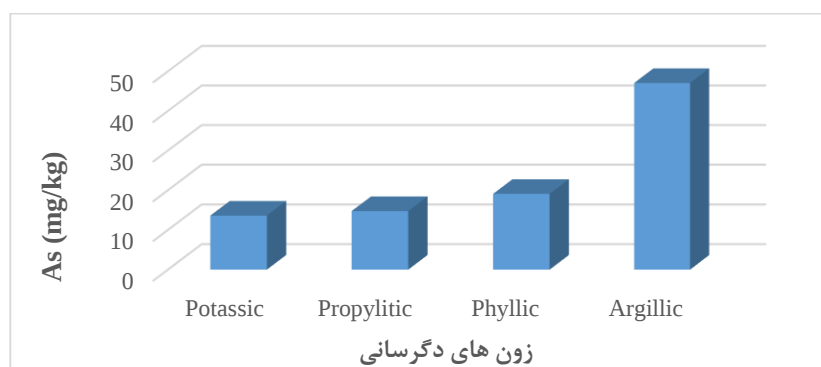
شکل ۵-۱۵- میانگین غلظت سرب در زون های دگرسانی منطقه مورد مطالعه

۵-۴-۴- آرسنیک

بیشترین غلظت آرسنیک در خاک های منطقه مورد مطالعه، $66/10 \text{ mg/kg}$ و کمترین غلظت آن حدود $8/10 \text{ mg/kg}$ است (شکل ۵-۱۶). با توجه به نتایج به دست آمده، غلظت آرسنیک هم، در تمامی ایستگاه های نمونه برداری از خاک، بالاتر از میانگین غلظت آن در خاک های جهانی (5 mg/kg) است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). این عنصر به فراوانی در رسوبات آرژیلیکی (حدود ۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم) یافت می شود. از آنجا که این عنصر با فلزات و شبه فلزات متعددی در کانسارها مرتبط است؛ بنابراین شاخص مناسبی برای اکتشافات ژئوشیمیایی محسوب می شود. اگرچه کانی ها و ترکیبات حاوی آرسنیک به راحتی حل می شوند؛ ولی با توجه به جذب قوی آن توسط رس ها، هیدروکسیدها و مواد آلی، تحرک آرسنیک بسیار محدود است. نسبت بالایی از غلظت کل آرسنیک (۲۷ تا ۹۰ درصد) در خاک ها، توسط ذرات رس تثبیت می شوند (Kabata-Pendias, 2011). در خاک های منطقه مورد مطالعه، بیشترین غلظت فلز آرسنیک در نمونه های شماره ۲۱ و ۳۶ دیده می شود که هر دو در زون دگرسانی آرژیلیک حضور دارند. همانطور که از شکل ۵-۹ نیز آشکار است، دگرسانی آرژیلیک (به دلیل وفور کانی های رسی) غلظت بالاتری از این عنصر را نسبت به سایر زون های دگرسانی نشان می دهد.



شکل ۵-۱۶- نقشه توزیع آرسنیک در خاک‌های معدنی منطقه ایجو

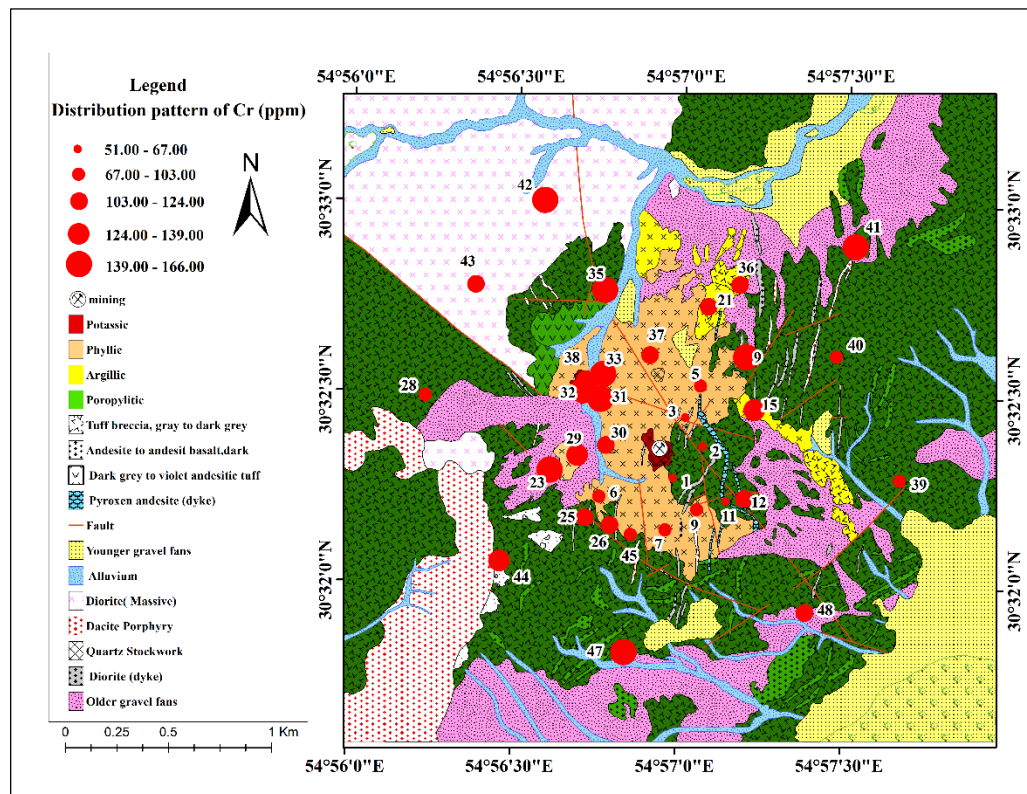


شکل ۵-۱۷- میانگین غلظت آرسنیک در زون‌های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه

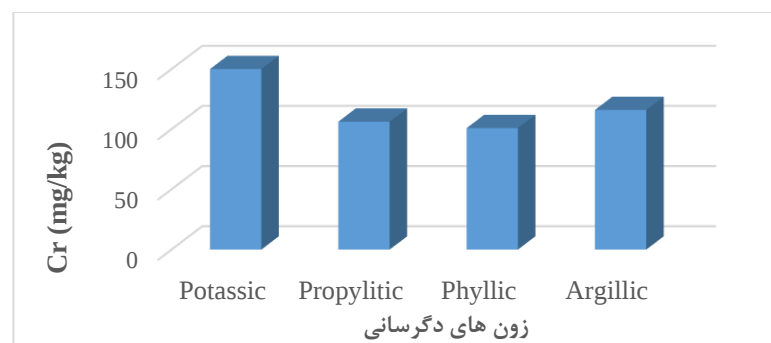
۵-۴-۵- کروم

غلظت میانگین کروم در خاک‌های جهانی 54 mg/kg است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). شکل ۵-۱۸ نقشه توزیع این فلز، در خاک‌های منطقه را نشان می‌دهد. بیشترین غلظت کروم در خاک‌های منطقه، 166 mg/kg و کمترین غلظت آن 51 mg/kg است. همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، در اکثر نقاط نمونه‌برداری، غلظت کروم بالاتر از غلظت میانگین آن در خاک‌های جهانی

است. الگوی توزیع کروم در سنگ‌ها نشان می‌دهند که بیشتر تمایل این فلز، به حضور در سنگ‌های آذرین مافیک و رسوبات آرژیلیکی است. کروم در مراحل اولیه از ماگما ته‌نشست می‌شود. همچنین تمامی کانی‌های کروم‌دار نسبت به هوازدگی شیمیایی مقاوم‌اند (Kabata-Pendias, 2011). با توجه به شکل ۵-۱۹، دگرسانی پتاسیک و بعد از آن دگرسانی آرژیلیک بیشترین مقدار کروم را دارا هستند.



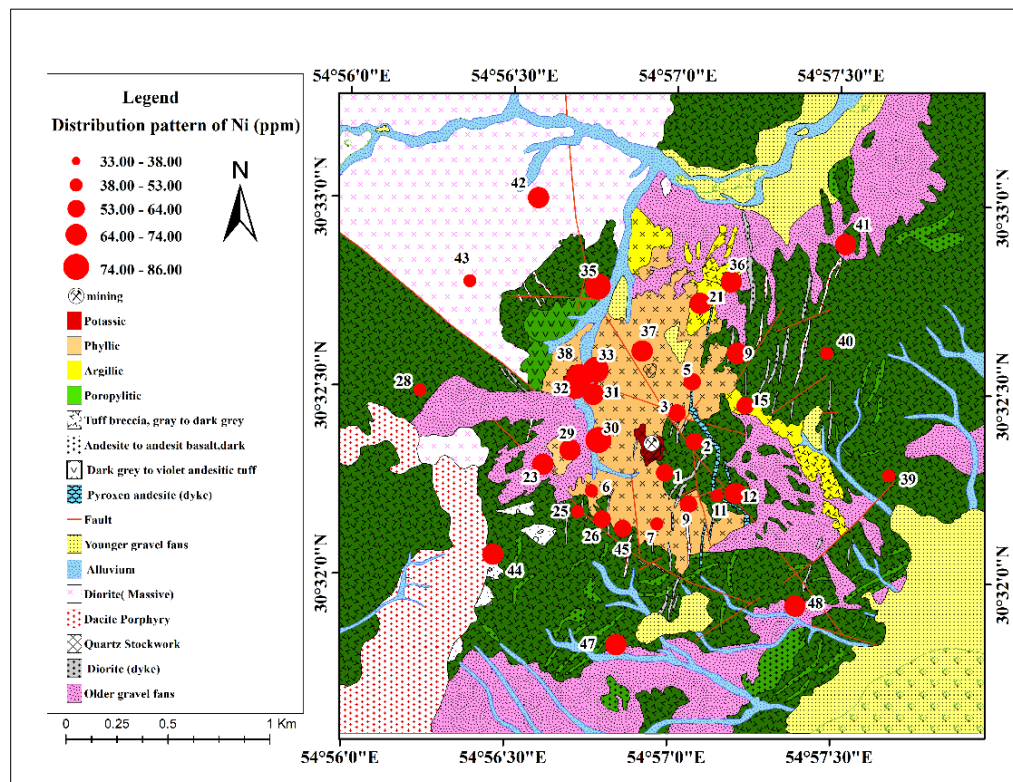
شکل ۵-۱۸- نقشه توزیع کروم در خاک‌های معدنی منطقه ایجو



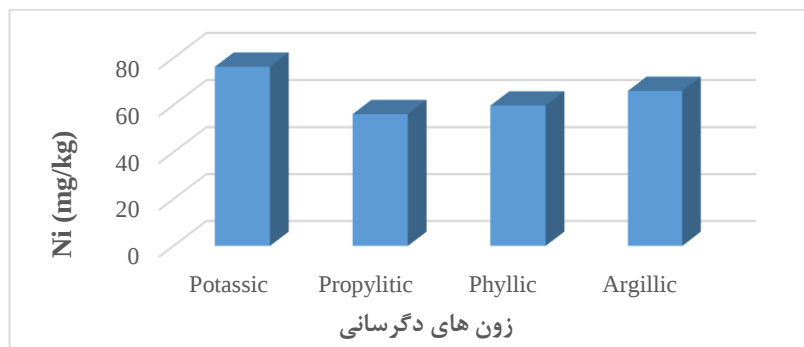
شکل ۵-۱۹- میانگین غلظت کروم در زون‌های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه

۵-۴-۶- نیکل

بازه تغییرات غلظت نیکل در نمونه‌های خاک مورد مطالعه، ۸۶ - ۳۳ mg/kg است (شکل ۵-۲۰). در تمامی نقاط نمونه‌برداری غلظت این فلز بالاتر از غلظت میانگین آن در خاک‌های جهانی (۲۲ mg/kg) است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). پس از هوازدگی، نیکل به همراه اکسیدهای آهن و منگنز رسوب می‌کند و در کانی‌های گوتیت، لیمونیت، سرپانتینیت و سایر کانی‌های آهن‌دار، وارد می‌شود. مقدار نیکل در خاک با ماده آلی خاک، اکسیدهای آهن و منگنز و کانی‌های رسی رابطه مستقیمی دارد. کانی‌های رسی به ویژه مونتوریلونیت، توانایی بالایی در جذب نیکل دارند (Kabata-Pendias, 2011). غلظت این فلز در زون‌های دگرسانی (شکل ۵-۲۱)، الگویی مشابه کروم نشان می‌دهد و در دگرسانی پتاسیک و بعد از آن در دگرسانی آرژلیک بیشترین مقدار را داراست.



شکل ۵-۲۰- نقشه توزیع نیکل در خاک‌های معدنی منطقه ایجو



شکل ۵-۲۱- میانگین غلظت نیکل در زون های دگرسانی مختلف در منطقه مورد مطالعه

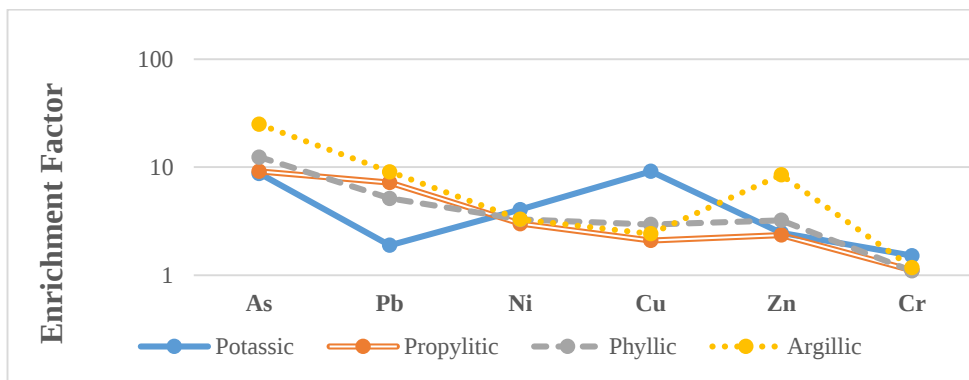
۵-۵- ارزیابی کیفیت و شدت آلودگی خاک منطقه مورد مطالعه، با استفاده از شاخص های

ژئوشیمیایی

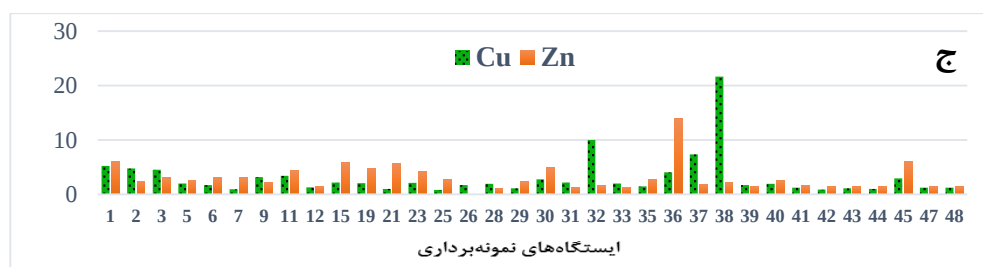
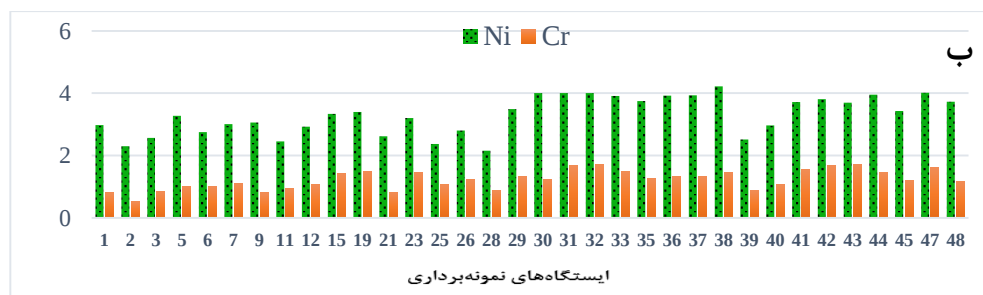
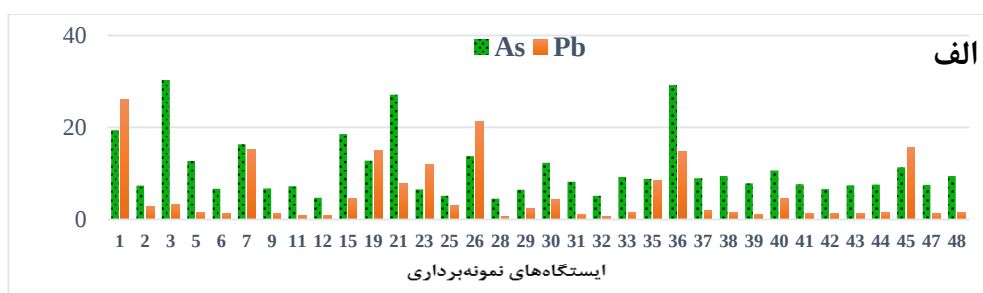
۵-۵-۱- ضریب غنی شدگی

محاسبه ضریب غنی شدگی، روشی مناسب برای ارزیابی غلظت عنصر مورد نظر در محیط، در مقایسه با غلظت همان عنصر، در شرایط طبیعی است (Chabukdhara and Nema, 2012). میانگین ضریب غنی شدگی عناصر به تفکیک زون های دگرسانی، در شکل ۵-۲۲ و تغییرات این ضریب در ایستگاه های مورد مطالعه، به تفکیک هر عنصر، در شکل ۵-۲۳ (الف، ب و ج) آورده شده است.

بررسی میانگین ضریب غنی شدگی فلزات سنگین در زون های دگرسانی نشان می دهد که بیشترین غنی شدگی عناصر آرسنیک، سرب و روی، مربوط به دگرسانی آرژیلیک است. حضور کانی های رسی در دگرسانی آرژیلیک، از مشخصه های اصلی این نوع دگرسانی است. این کانی ها به واسطه ساختار صفحه ای و بار الکتریکی سطحی منفی خود، توانایی زیادی در جذب کاتیون های فلزی دارند و بدین علت این فلزات، بیشترین غلظت را در این زون نشان می دهند. غنی شدگی اصلی عنصر مس مربوط به زون دگرسانی پتاسیک می باشد.



شکل ۵-۲۲- ضریب غنی‌شدگی عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک منطقه، با در نظر گرفتن زون‌های دگرسانی مختلف



شکل ۵-۲۳- نتایج ضریب غنی‌شدگی فلزات مختلف در ایستگاه‌های نمونه‌برداری. (الف) آرسنیک و سرب (ب) نیکل و کروم، (ج) مس و روی

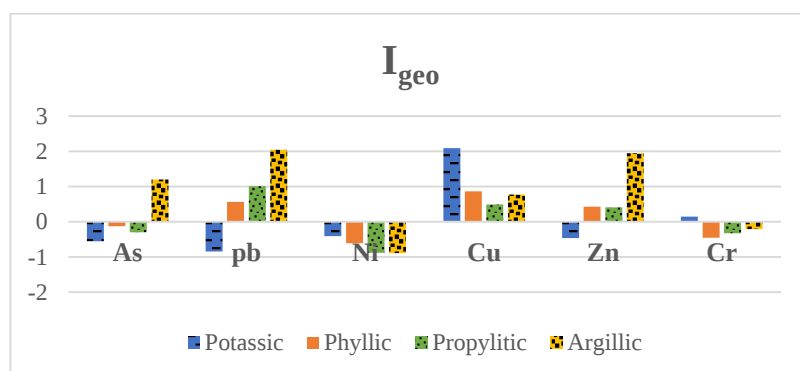
به طور کلی، مقادیر میانگین ضرایب غنی‌شدگی برای عناصر مورد بررسی به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

$$\text{As (10.98)} > \text{Pb (5.39)} > \text{Ni (3.3)} > \text{Zn (3.04)} > \text{Cu (3.08)} > \text{Cr (1.22)}$$

بر اساس طبقه‌بندی (Chen et al., 2007) (جدول ۳-۵) در خاک‌های منطقه، کروم غنی‌شدگی اندک، نیکل، مس و روی، غنی‌شدگی متوسط، سرب، غنی‌شدگی نسبتاً شدید و آرسنیک غنی‌شدگی شدید نشان می‌دهند.

۵-۲-۵- شاخص زمین‌انباشت

شاخص زمین‌انباشت، یکی دیگر از شاخص‌های کمی، به منظور تعیین شدت آلودگی خاک‌های یک منطقه است. بررسی میانگین شاخص زمین‌انباشت نمونه‌های خاک با توجه به زون‌های دگرسانی (شکل ۵-۲۴)، 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، آلودگی متوسط را دارا است. فلز مس نیز در دگرسانی پتاسیک، دارای بیشترین میزان زمین‌انباشت بوده و در رده آلودگی متوسط قرار می‌گیرد. این تغییرات با تغییرات غلظت کل فلزات در خاک‌های منطقه همخوانی دارد.



شکل ۵-۲۴- میانگین ضرایب زمین‌انباشت فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی کانسار ایجو

نتایج بررسی مقادیر شاخص زمین‌انباشت برای عناصر مورد بررسی در زون‌های دگرسانی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

As: در دگرسانی آرژیلیک بیشترین میزان زمین‌انباشت (آلودگی متوسط) و در دگرسانی فلیک کمترین

میزان زمین‌انباشت (بدون آلودگی) را داراست. در سایر دگرسانی‌ها نیز از نظر شاخص زمین‌انباشت، فاقد آلودگی است.

Pb: در دگرسانی آرژلیک دارای بیشترین میزان زمین‌انباشت (آلودگی متوسط تا شدید) و در دگرسانی پروپلیتیک آلودگی متوسط داشته و در دگرسانی فلیک در رده بدون آلودگی تا آلودگی متوسط قرار می‌گیرد. سرب در دگرسانی پتاسیک، دارای $I_{geo} < 0$ و بدون آلودگی است.

Ni: در تمام دگرسانی‌ها از نظر شاخص زمین‌انباشت، فاقد آلودگی است.

Cu: تنها عنصری است که در تمام زون‌های دگرسانی دارای $I_{geo} > 0$ است. این فلز در دگرسانی پتاسیک دارای آلودگی متوسط تا شدید و در سایر دگرسانی‌ها در رده بدون آلودگی تا آلودگی متوسط قرار می‌گیرد.

Zn: در دگرسانی آرژلیک دارای بیشترین شاخص زمین‌انباشت است و آلودگی متوسط نشان می‌دهد. این فلز در دگرسانی‌های فلیک و پروپلیتیک، رده بدون آلودگی تا آلودگی متوسط را دارا است. در دگرسانی پتاسیک هم دارای $I_{geo} < 0$ است که نشان می‌دهد خاک منطقه ایجو در زون پتاسیک، نسبت به عنصر روی فاقد آلودگی است.

Cr: در دگرسانی‌های آرژلیک، فلیک و پروپلیتیک دارای $I_{geo} < 0$ است و از این نظر بدون آلودگی است. این فلز در دگرسانی پتاسیک دارای $I_{geo} > 0$ بوده و در رده بدون آلودگی تا آلودگی متوسط قرار می‌گیرد.

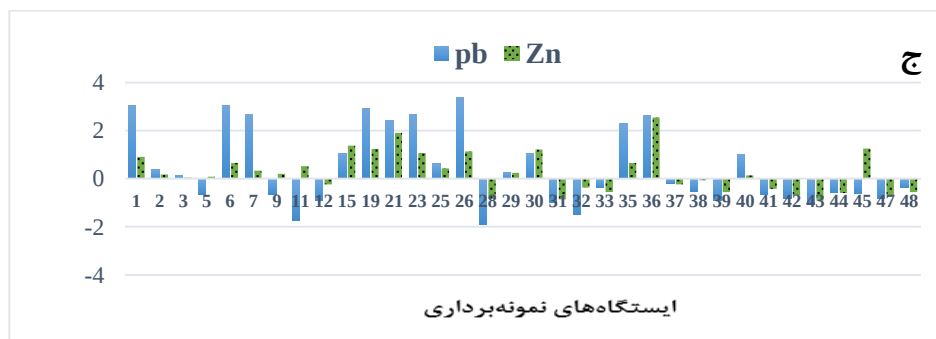
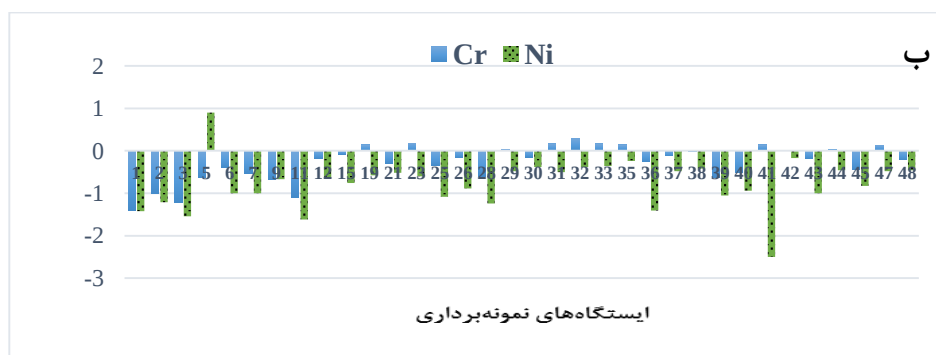
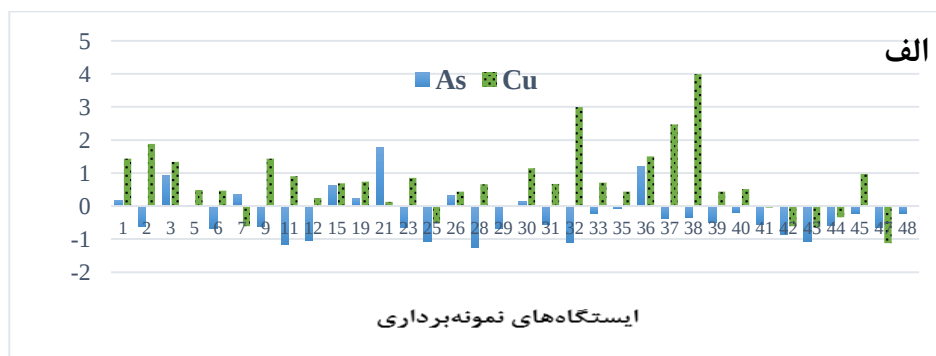
به طور کلی، مقادیر میانگین شاخص زمین‌انباشت در خاک‌های منطقه (شکل ۵-۲۵) به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

$$Cu > Pb > Zn > As > Cr > Ni$$

شکل ۵-۲۶ نشان‌دهنده میزان شاخص زمین‌انباشت فلزات سنگین مورد مطالعه در تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری است.



شکل ۵-۲۵- میانگین شاخص زمین انباشت فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک منطقه ایجو



شکل ۵-۲۶- ضرایب زمین انباشت فلزات مورد مطالعه در نقاط نمونه‌برداری از خاک الف) مس و آرسنیک
ب) نیکل و کروم و ج) روی و سرب

۵-۶- تحلیل آماری داده‌ها

۵-۶-۱- همبستگی بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک و غلظت فلزات سنگین

نتایج آزمون شاپیرو - ویلک، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، توزیع غیر نرمال را برای عناصر آرسنیک و مس نشان داد. در این حالت با تبدیل داده‌ها تحت تابع لگاریتمی، توزیع داده‌ها نرمال شد. نتایج حاصل از همبستگی بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی و فلزات سنگین در جدول ۵-۸ آورده شده است. نتایج این همبستگی می‌تواند درک ما را در مورد نحوه توزیع فلزات در خاک و عوامل مؤثر بر آن افزایش دهد. به طور کلی نتایج حاصل از همبستگی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- پارامترهای pH و ماده آلی خاک، هیچ‌گونه همبستگی آشکاری با فلزات مورد بررسی نشان نمی‌دهند. این مسئله می‌تواند ناشی از بازه کم تغییرات این دو پارامتر، در نمونه‌های خاک مورد مطالعه باشد (Qishlaqi et al., 2009).

۲- عنصر سرب با آرسنیک ($r = 0.484$ و $p < 0.01$) و عنصر روی، با آرسنیک ($r = 0.705$ و $p < 0.01$) و سرب ($r = 0.607$ و $p < 0.01$)، 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 افینیتته ژئوشیمیایی جزء عناصر کالکوفیل بوده که در سولفیدها متمرکز می‌شوند (Mason and Moore, 1982).

۳- همبستگی مثبت و معنی‌داری که بین محتوای رس خاک با روی ($r = 0.772$ و $p < 0.05$) و آرسنیک ($r = 0.772$ و $p < 0.01$)، مشاهده می‌شود، بیانگر این مطلب است که، رس موجود در خاک، در جذب این دو عنصر مؤثر بوده است (Kabata-Pendias, 2011).

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 غلظت بالاتر مس در مقایسه با سایر فلزات است. این غلظت بالا می‌تواند ناشی از فرایندهای کانی‌سازی فلز مس، در منطقه باشد.

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

جدول ۵-۸- ضرایب همبستگی پیرسون بین عناصر و پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک

	pH										
pH	1	OM									
OM	-0.135	1	Clay								
Clay	-0.150	-0.046	1	Silt							
Silt	0.053	0.316	-0.046	1	Sand						
Sand	0.041	-0.274	-0.508	-0.816**	1	Pb					
Pb	-0.203	0.070	0.291	-0.304	0.094	1	Zn				
Zn	-0.005	0.009	0.772**	-0.232	-0.248	0.607**	1	Cr			
Cr	0.005	-0.012	0.264	0.512	-0.596	-0.091	-0.079	1	Ni		
Ni	0.113	0.084	0.480	0.524	-0.732*	-0.128	0.035	0.843**	1	As	
As	-0.034	-0.051	0.634**	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

*Correlation is significant at the 0.05 level ($p = 0.05$) (2-tailed)

**Correlation is significant at the 0.01 level ($p = 0.01$) (2-tailed)

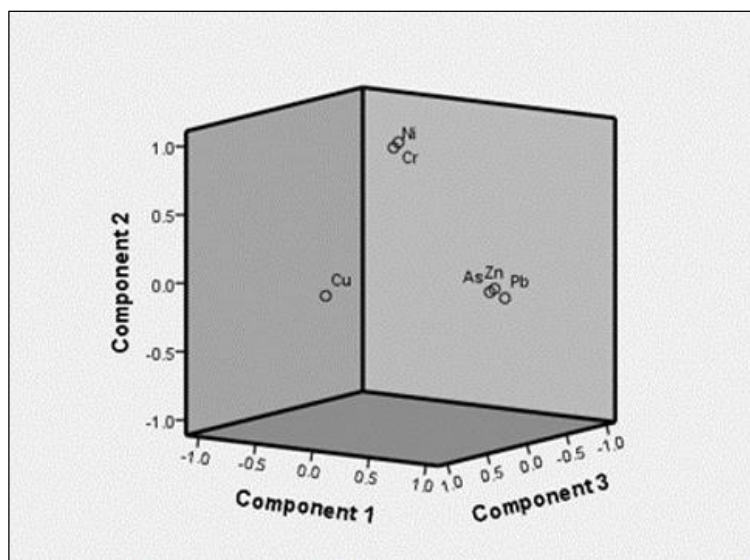
۵-۶-۲- تحلیل مؤلفه اصلی

تحلیل مؤلفه اصلی یا تحلیل عاملی، یکی از روش‌های آماری برای تجزیه اطلاعات موجود در مجموعه داده‌ها است. انجام تحلیل مؤلفه اصلی، یک مدل سه مؤلفه‌ای را برای داده‌های این مطالعه پیشنهاد می‌کند. در جدول ۵-۹ نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی فلزات سنگین مورد مطالعه، ارائه شده است. شکل ۵-۲۷ نیز نمودار سه بعدی نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های استخراج شده را نشان می‌دهد. در مؤلفه نخست، 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 و زمین‌زاد

آنهاست. قرارگیری فلز مس در یک مؤلفه جداگانه را به دلیل غلظت بالاتر آن نسبت به سایر فلزات نسبت داد.

جدول ۵-۹- نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی

	Component		
	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

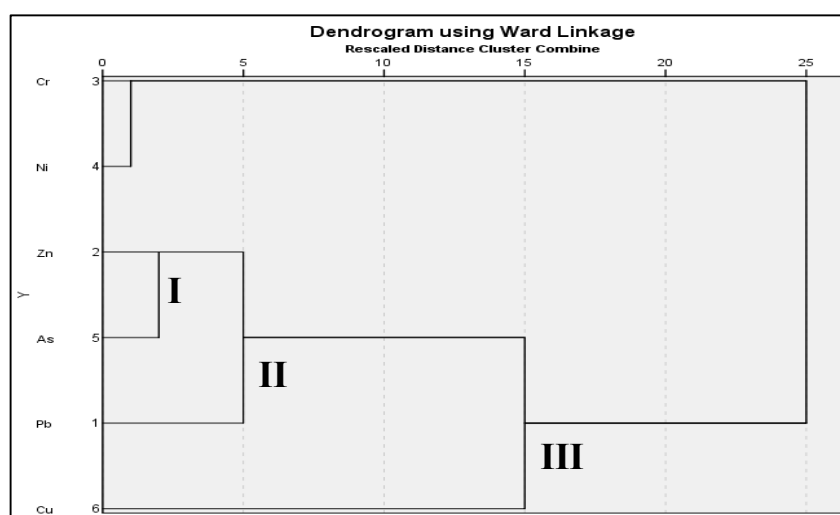


شکل ۵-۲۷- نمودار سه بعدی تحلیل مؤلفه‌های استخراج شده

۵-۶-۳- تحلیل خوشه‌ای

تحلیل خوشه‌ای، یکی دیگر از روش‌های آماری چند متغیره است که در آن با اندازه‌گیری مشابهت متغیرها، آنها را در یکسری گروه‌ها یا خوشه‌های مستقل قرار می‌دهد. با توجه به دندوگرام حاصل (شکل ۵-۲۸)، می‌توان سه خوشه اصلی را در نمونه‌ها تشخیص داد. خوشه نخست شامل کروم و نیکل بوده که

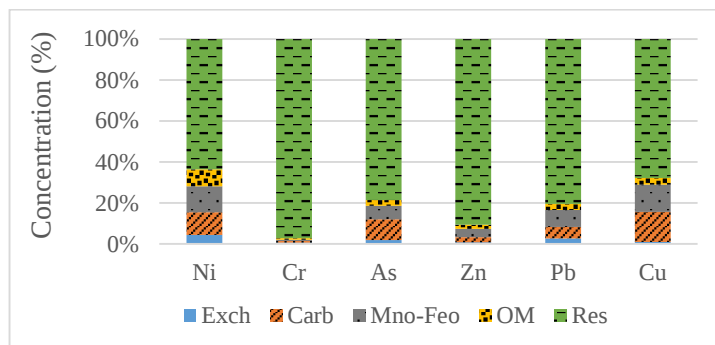
به علت تشابه بالای آنها از لحاظ ژئوشیمیایی و منشأ یکسان این دو فلز در نمونه‌های خاک مورد مطالعه است. خوشه دوم متشکل از آرسنیک، روی و سرب است. در خوشه یا گروه دوم بر حسب اختلاف درجه وابستگی فلزات می‌توان ۲ زیر شاخه تعیین نمود: در زیر شاخه (I) Zn – As و در زیر شاخه (II) سرب جای می‌گیرند. در این خوشه Zn 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 است.



شکل ۵-۲۸- دندوگرام طبقه‌بندی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک منطقه ایجو

۵-۷- گونه‌پذیری فلزات سنگین در خاک ایجو

در تحقیقات زیست‌محیطی، ارزیابی گونه‌سازی فلزات در فازهای مختلف خاک، برای پیش‌بینی رفتار آنها و تعیین میزان تحرک، سمناکی و خطر این فلزات در خاک، نسبت به غلظت کل از اهمیت بیشتری برخوردار است. روش استخراج ترتیبی فلزات، منجر به شناسایی فلزات موجود در فازهای گوناگون خاک و تعیین میزان زیست‌دسترس‌پذیری آنها می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش استخراج ترتیبی به روش تسیر و همکاران (۱۹۷۹)، گونه‌پذیری عناصر در نمونه‌های خاک مورد مطالعه مشخص گردید (شکل ۵-۲۹)، که شرح آن در ادامه ارائه می‌شود.

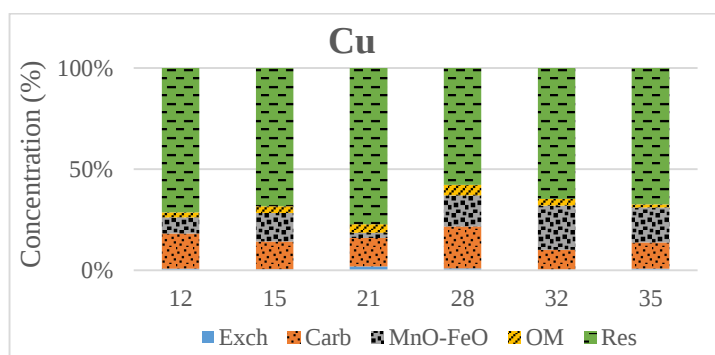


شکل ۵-۲۹- میانگین نتایج آزمایش استخراج ترتیبی به روش تسیر

۵-۷-۱- مس

شکل ۵-۳۰ گونه‌سازی فلز مس را در نمونه‌های خاک مورد مطالعه، نشان می‌دهد. بالاترین درصد مس (۶۷/۷۴٪)، از فاز پنجم (فاز باقی‌مانده) استخراج شد. حضور غلظت بالاتر مس در فاز باقی‌مانده، نشان‌دهنده منشأ طبیعی و زمین‌زاد این فلز است. پس از آن فازهای متصل به کربنات‌ها و فاز پیوندی با اکسیدهای آهن و منگنز (به ترتیب ۱۴/۸۰٪ و ۱۳/۱۸٪) بیشترین غلظت مس را نشان می‌دهند. همراهی این فلز با فاز کربناته، به دلیل حضور این عنصر، در کانی‌های کربناتی مانند مالاکیت و آزوریت است. کمترین مقدار مس در دو فاز تبادل‌پذیر و پیوند با مواد آلی قرار دارد. روند گونه‌پذیری مس در خاک‌های منطقه ایجو به صورت زیر است:

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



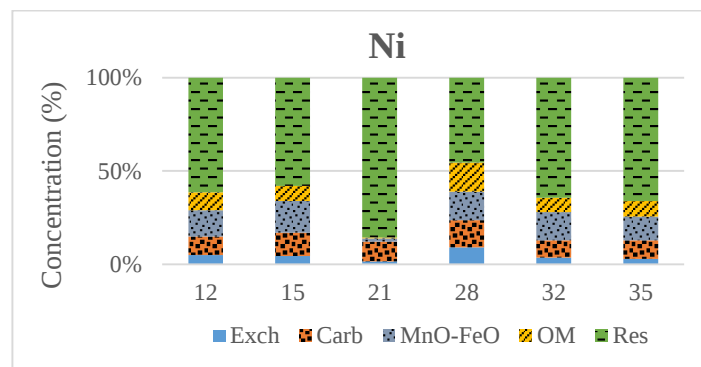
شکل ۵-۳۰- درصد مس استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی

۵-۷-۲- نیکل

شکل ۵-۳۱ درصد همراهی عنصر نیکل را با فازهای مختلف استخراج شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

نشان می‌دهد. بالاترین غلظت نیکل (۶۳/۵۶٪) در فاز باقی‌مانده حضور دارد. حضور نیکل در فاز باقی‌مانده، ممکن است به صورت جانشینی ایزومورفی با Fe و Al در کانی‌های سیلیکاته به ویژه کانی‌های رسی (اسمکتیت و ایلیت) باشد (Forghani et al., 2015). حضور نیکل در این فاز می‌تواند دلیلی بر منشأ زمین‌زاد این عنصر در نمونه‌های خاک باشد. فازهای اکسیدهای آهن و منگنز و فاز پیوند با کربنات‌ها، به ترتیب ۱۲/۶۷٪ و ۱۱/۱۳٪ از عنصر نیکل را در بر می‌گیرند. ۸/۳۰٪ از نیکل نیز از فاز متصل به مواد آلی، استخراج شده است. بر اساس این نتایج، روند گونه‌پذیری نیکل در خاک‌های منطقه ایجو به صورت زیر است:

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



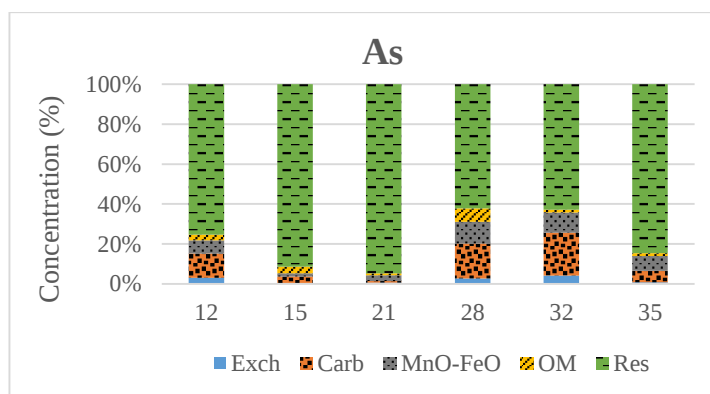
شکل ۵-۳۱- درصد نیکل استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی

۵-۷-۳- آرسنیک

شکل ۵-۳۲ درصد همراهی آرسنیک با فازهای استخراج شده در نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد. بالاترین درصد آرسنیک، از فاز باقی‌مانده استخراج شد (۷۸/۵۱٪). در واقع آرسنیک به صورت As^{+3} در کانی‌های سولفیدی ظاهر می‌شود، بنابراین حضور آرسنیک در فاز باقی‌مانده ممکن است به دلیل جانشینی ایزومورفی As^{+3} در پیریت، مارکازیت (به دنبال اکسایش این سولفیدها، Fe^{+2} به Fe^{+3} تبدیل شده و As^{+3} جایگزین Fe^{+3} می‌شود) و گالن باشد (Forghani et al., 2015). پس از آن بالاترین درصد آرسنیک در دو فاز متصل به کربنات‌ها و فاز متصل به اکسیدهای آهن و منگنز دیده می‌شود (به ترتیب ۱۰/۱۷٪ و ۶/۵۶٪). همراهی آرسنیک با فاز اکسیدهای آهن و منگنز، ناشی از افینیت ژئوشیمیایی آن به اکسیدهای آهن و منگنز، به ویژه در خاک‌های با pH بیشتر از ۷ است (Kabata-Pendias, 2011).

فازهای متصل به مواد آلی و فاز تبادل پذیر، کمترین درصد آرسنیک را در خود جای داده‌اند (به ترتیب ۲/۸۳٪ و ۱/۹۰٪). کمترین مقدار آرسنیک از فاز تبادل پذیر استخراج گردید که احتمالاً به دلیل شرایط قلیایی نمونه‌های خاک مورد مطالعه است. به طور کلی بیشینه جذب As^{+5} در شرایط اسیدی است و با افزایش pH به تدریج کاهش می‌یابد (Forghani et al., 2015). به طور کلی روند گونه‌پذیری آرسنیک در خاک منطقه ایجو به صورت زیر است:

$$Res > Carb > MnO-FeO > OM > Exch$$



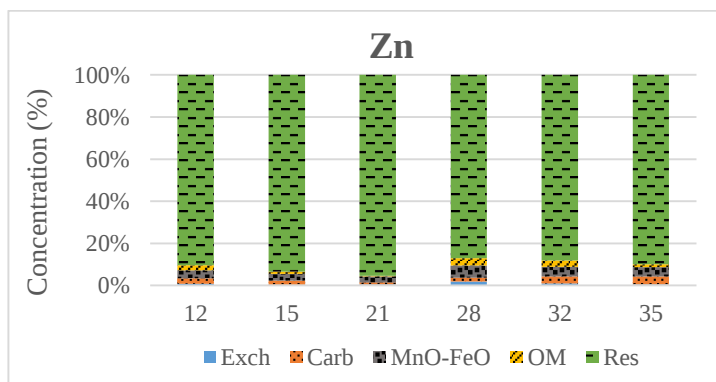
شکل ۵-۳۲- درصد آرسنیک استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی

۵-۴-۷- روی

شکل ۵-۳۳ گونه‌سازی عنصر روی را در نمونه‌های خاک نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، ۹۰/۶۷٪ از عنصر روی، در مرحله پنجم (فاز باقی‌مانده) قرار دارد. حضور درصد بالای روی در فاز باقی‌مانده خاک، ممکن است به دلیل حضور این فلز در کانی مونتموریلونیت و کانی‌های سولفیدی مقاومی باشد که در مراحل قبلی استخراج ترتیبی، استخراج نشده‌اند (Forghani et al., 2015). ۴/۰۹٪ از فلز روی در مرحله سوم و از فاز اکسیدهای آهن و منگنز استخراج شد. تمایل روی به فازهای کاهش پذیر، به دلیل تمایل آن به اکسی هیدروکسیدها، به ویژه در شرایط قلیایی نمونه‌های خاک است (Forghani et al., 2015). فاز متصل به کربنات‌ها نیز ۲/۳۸٪ روی را شامل شده است. در این میان، فازهای متصل به مواد آلی و تبادل پذیر، سهم ناچیزی از غلظت کل روی را در بر می‌گیرند (به ترتیب ۱/۹۷٪ و ۰/۸۶٪). درصد پایین روی در فاز تبادل پذیر را می‌توان به شرایط قلیایی نمونه‌های خاک

نسبت داد؛ چرا که روی، در یک محیط اسیدی، تمایل به جذب سطحی بر روی کانی‌های رسی و مواد آلی خاک، توسط فرایند تبادل کاتیونی دارد (Forghani et al., 2015). به طور کلی روند گونه‌پذیری روی در خاک‌های منطقه ایجو به صورت تغییر می‌کند:

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

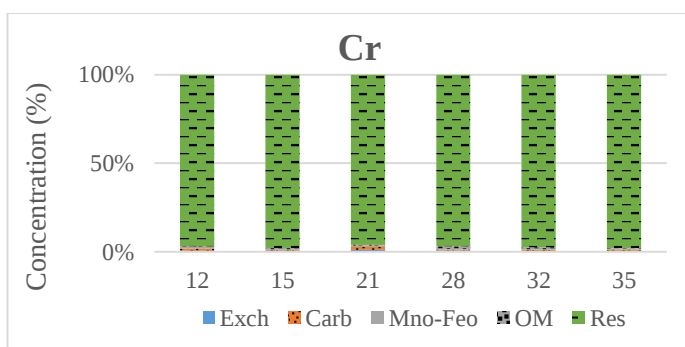


شکل ۵-۳۳- درصد روی استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی

۵-۷-۵- کروم

درصد همراهی عنصر مس با فازهای مختلف در نمونه‌های خاک مورد مطالعه در شکل ۵-۳۴ نشان داده شده است. بالاترین سهم کروم در فاز باقی‌مانده قرار دارد (۹۷/۲۱٪ و به طور میانگین ۱۲۲/۷۳ mg/kg). زیرا Cr^{+3} جایگزین Fe^{+3} و Al^{+3} در کانی‌های سیلیکاته می‌شود (Qze, 2003) و بدین علت درصد بالایی در فاز باقی‌مانده نشان می‌دهد. چهار فاز متصل به کربنات‌ها (۰/۸۷٪)، اکسیدهای آهن و منگنز (۰/۶۱٪)، مواد آلی (۰/۷۰٪) و فاز تبادل‌پذیر (۰/۵۹٪)، سهم تقریباً برابری در نگهداری کروم نشان می‌دهند. روند گونه‌پذیری کروم در خاک‌های منطقه ایجو به صورت زیر است:

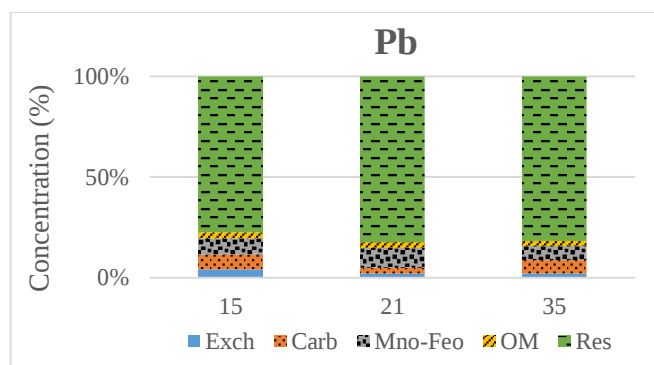
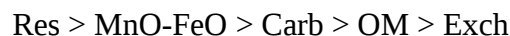
$$\text{Res} > \text{Carb} > \text{OM} > \text{MnO-FeO} > \text{Exch}$$



شکل ۵-۳۴- درصد کروم استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی

۵-۷-۶- سرب

براساس نتایج استخراج ترتیبی بیشترین غلظت سرب (۸۰/۴۹٪)، در مرحله آخر (فاز باقی مانده) حضور دارد (شکل ۳-۳۵). بعد از آن بیشترین غلظت سرب، از مرحله سوم و پیوند با اکسیدهای آهن و منگنز (۸/۳۰٪) استخراج شد. سرب با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز اشکال پایداری را تشکیل می‌دهد (Forghani et al., 2015). ۵/۶۳٪ سرب نیز در پیوند با کربنات‌ها حضور دارد. وجود سرب در فاز کربنات‌ها، به دلیل حضور آن در کانی‌های کربناتی مانند سروزیت (PbCO_3) و هیدروسروزیت [$\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$] است؛ بنابراین نقش مهمی را در تحرک و زیست‌دسترس‌پذیری این عنصر بازی می‌کنند (Forghani et al., 2015). کلسیت (CaCO_3) هم ممکن است به عنوان یک جاذب قوی برای سرب عمل کند (Forghani et al., 2015). فاز تبادله‌پذیر (۲/۷۰٪) و ماده آلی (۲/۸۶٪) از مقدار سرب را به خود اختصاص داده‌اند. روند گونه‌پذیری سرب در خاک‌های ایجو به صورت زیر است:



شکل ۵-۳۵- درصد سرب استخراج شده از فازهای مختلف ژئوشیمیایی

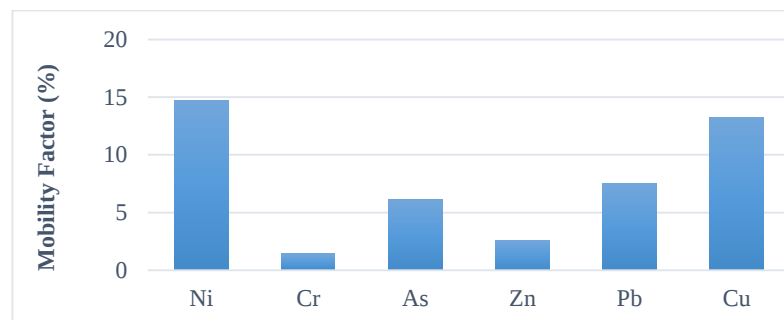
۵-۸- ضریب تحرک‌پذیری فلزات سنگین و کد ارزیابی خطر

تحرک‌پذیری فلزات سنگین در خاک و جذب آنها توسط گیاهان، به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، به منظور ارزیابی میزان تحرک فلزات سنگین، از ضریب تحرک‌پذیری (MF) استفاده شد. محاسبه این ضریب، یکی از رایج‌ترین روش‌های بررسی تحرک فلزات در محیط (خاک یا رسوب) است. درصد شاخص تحرک‌پذیری محاسبه شده برای فلزات سنگین مورد بررسی، در

جدول ۵-۱۰ و شکل ۵-۳۶ آورده شده است.

جدول ۵-۱۰- مقادیر میانگین ضریب تحرک پذیری برای فلزات سنگین در نمونه‌های خاک						
	Cu	Pb	Zn	As	Cr	Ni
MF	۰/۱۳۲	۰/۰۷۵	۰/۰۲۶	۰/۰۶۱	۰/۰۱۴	۰/۱۴۷
MF (%)	۱۳/۲۵	۷/۵۰	۲/۶۲	۶/۱۰	۱/۴۲	۱۴/۷۵

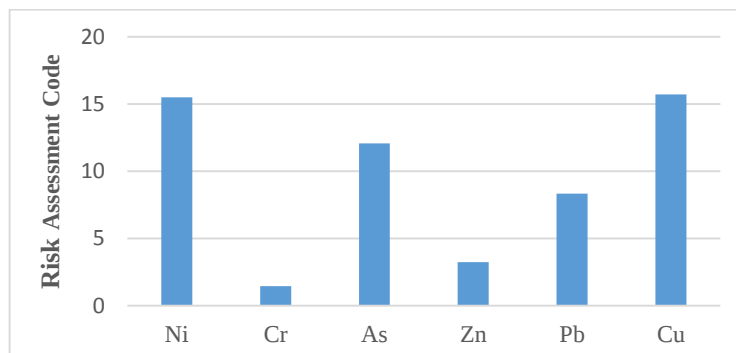
همانطور که مشاهده می‌شود تنها عنصر Ni و Cu دارای بالاترین ضریب تحرک (به ترتیب ۱۴/۷۵٪ و ۱۳/۲۵٪) می‌باشند و پس از آنها Pb و As بالاترین ضریب تحرک (به ترتیب ۷/۵۰٪ و ۶/۱۰٪) را دارا هستند. دو عنصر Cr و Zn به ترتیب دارای شاخص تحرک پذیری ۱/۴۲٪ و ۲/۶۲٪ هستند.



شکل ۵-۳۶- میانگین مقادیر ضرایب تحرک پذیری فلزات سنگین در خاک‌های منطقه مورد مطالعه

به منظور ارزیابی خطر زیست‌محیطی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک، از کد ارزیابی خطر نیز استفاده گردید. جدول ۵-۱۱ و شکل ۵-۳۷ نشان‌دهنده مقادیر میانگین کد ارزیابی خطر فلزات سنگین مورد مطالعه است. با توجه به رده‌بندی کیفی خاک بر اساس کد ارزیابی خطر (جدول ۳-۷)، مشاهده می‌شود که فلزات Cr و Zn در خاک‌های منطقه، دارای خطر کم و سایر عناصر دارای خطر متوسط هستند.

جدول ۵-۱۱- میانگین مقادیر کد ارزیابی خطر فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک ایچو						
	Cu	Pb	Zn	As	Cr	Ni
RAS %	۱۵/۷۱	۸/۳۳	۳/۲۴	۱۲/۰۷	۱/۴۶	۱۵/۵۰



شکل ۵-۳۷- میانگین مقادیر کد ارزیابی خطر برای فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک منطقه ایجو

۵-۹- ارزیابی غلظت فلزات در گیاه

۵-۹-۱- مقدمه

گیاهان از اجزاء اصلی اکوسیستم‌های طبیعی و اولین بخش از زنجیره غذایی موجودات محسوب می‌شوند. نقش قابل توجه گیاهان در چرخه عناصر کمیاب و آلوده شدن زنجیره غذایی در اکوسیستم‌های مختلف، به خوبی مشخص شده است (Kabata-Pendias, 2011). در بیشتر موارد غلظت عناصر کمیاب در گیاهان، بازتاب فراوانی آنها در محیط رشد گیاه (خاک، مواد مغذی، آب) و هوای محیط است. نقش و وضعیت سوخت و ساز هر عنصر در گیاهان را می‌توان در قالب برخی از فرایندهای اساسی مانند جذب (جذب عمقی)، انتقال عنصر در درون گیاه، غلظت کل و گونه‌سازی عنصر، کمبود و یا افزونی عنصر، رقابت یونی و همچنین واکنش بین عناصر تشخیص داد. برخی از عناصر کمیاب، به ویژه عناصری مانند مس، آهن، منگنز، مولیبدن و روی نقش کلیدی در سوخت و ساز گیاه ایفا می‌کنند و تشکیل‌دهنده چندین نوع آنزیم در گیاه هستند (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). عناصر با تجمع در خاک و جذب توسط گیاهان وارد زنجیره غذایی شده و در مقادیر بالا منجر به مسمومیت در گیاه و موجودات تغذیه کننده از آن می‌گردند.

در این بخش ابتدا به بررسی و مطالعه غلظت فلزات (Cr, Cu, Zn) در اندام‌های روزمینی و زیرزمینی گیاه درمنه (*Artemisia*) (گونه گیاهی غالب در منطقه مورد مطالعه) پرداخته می‌شود و به منظور ارزیابی رابطه بین غلظت فلزات در خاک و گیاه، شاخص‌های بیوژئوشیمیایی، مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت

تحرك پذیری فلزات در نمونه های خاک و میزان زیست دسترس پذیری ۳ فلز Cu, Cr و Zn در اندام های گیاهی ارزیابی می گردد. لازم به ذکر است كه غلظت ۳ فلز Ni, Pb و As در اندام های گیاه، زیر حد آشكارسازی دستگاه تشخیص داده شد.

۵-۹-۲- غلظت فلزات در نمونه های گیاه درمنه

غلظت ۳ فلز Cu, Cr و Zn در اندام های زیرزمینی و روزمینی نمونه های گیاه برداشت شده، در جدول ۵-۱۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱۲- غلظت فلزات سنگین مختلف در اندام های زیرزمینی (Root) و اندام های روزمینی (Shoot) در گیاه درمنه (mg/kg)

Shoot			Root			شماره نمونه
Cr	Cu	Zn	Cr	Cu	Zn	
۵	۱۸	۲۳	۶	۱۶	۲۳	P1
۴	۲۱	۵	۴	۱۹	۱	P2
۵	۳۰	۶	۴	۴۴	۱	P3
۴	۱۳	۸	۵	۱۶	۴	P4
۳	۱۲	۶	۵	۱۰	۱	P5
۵	۲۰	۳۹	۶	۱۲	۰/۵	P6
۴	۱۶	۲۲	۵	۲۲	۱۳	P7
۵	۱۳	۴	۴	۱۶	۳	P8
۴/۳۷	۱۷/۸۷	۱۴/۱۲	۴/۸۷	۱۹/۳۷	۵/۸۱	میانگین

۵-۹-۲-۱- کروم

كروم نقش اساسی در متابولیسم گیاه ندارد. این عنصر دسترس پذیری کمی برای گیاهان دارد و نمی تواند به راحتی به اندام های روزمینی گیاه انتقال پیدا کند؛ در نتیجه این عنصر كروم عمدتاً در ریشه گیاه متمرکز می شود. Cr^{+6} شكل زیست دسترس پذیر برای گیاه بوده و در شرایط طبیعی خاک، بسیار ناپایدار است. دسترس پذیری این فلز بستگی به خواص فیزیكوشیمیایی خاک، به خصوص بافت خاک و pH دارد (Kabata-Pendias, 2011). مقدار نرمال غلظت كروم در برگ گیاهان ۰/۵-۰/۱ mg/kg و محدوده

سمناکی آن ۵-۳۰ mg/kg است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). میانگین غلظت این عنصر در اندام‌های روزمینی، در نمونه‌های گیاهی برداشت شده از منطقه مورد مطالعه، ۴/۳۷۵۰ mg/kg است که در محدوده بی‌خطر قرار دارد. میانگین غلظت کروم در ریشه نمونه‌های گیاه ۴/۸۷۵۰ mg/kg است.

۵-۹-۲-۲-مس

مس عنصری ضروری برای گیاهان محسوب می‌شود (Kabata-Pendias, 2011). غلظت مس در بافت های گیاهی تابعی از سطح آن در محلول خاک است، با این حال تحرک پذیری مس نسبت به سایر فلزات در گیاهان کم است و مقدار زیادی از این فلز در ریشه و برگ باقی می‌ماند و ممکن است مقدار کمی از این فلز به سمت اندام‌های جوان گیاه حرکت کند؛ بنابراین بخش‌های جوان گیاه، مقدار مس کمتری دارند (Kabata-Pendias, 2011). محدوده غلظت نرمال و سمناکی فلز مس در برگ گیاهان، به ترتیب ۵-۳۰ mg/kg و ۲۰-۱۰۰ mg/kg است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). در نمونه‌های گیاه برداشت شده از منطقه مورد مطالعه نیز غلظت میانگین این فلز در اندام‌های روزمینی ۱۷/۸۷۵۰ mg/kg و در ریشه آن حدود ۱۹/۳۷۵۰ mg/kg است. ماکزیمم غلظت این فلز در ریشه گیاه نمونه شماره ۳ دیده می‌شود که حدود ۴۴ mg/kg است. با توجه به این نتایج، این عنصر هم خطری برای گیاه محسوب نمی‌شود.

۵-۹-۲-۳-روی

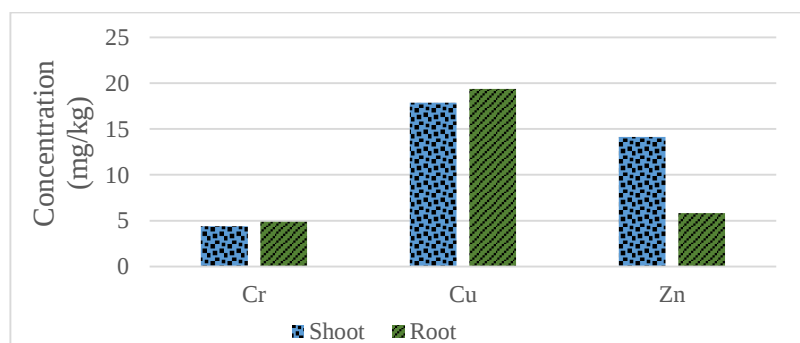
روی نیز یکی از ریزمغذی‌های مهم برای گیاهان است، با این حال غلظت بالایی از این فلز سنگین در خاک، می‌تواند برای گیاه سمی باشد. شکل‌های حل شده روی، به آسانی در دسترس گیاه قرار می‌گیرد (Kabata-Pendias, 2011). غلظت نرمال روی، در بافت برگ گیاه ۱۵۰-۲۵۰ mg/kg و محدوده سمناکی آن ۱۰۰-۴۰۰ mg/kg است (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). در نمونه‌های گیاه درمنه نیز غلظت میانگین این فلز در اندام‌های هوایی ۱۴/۱۲۵ mg/kg بوده و غلظت میانگین آن در ریشه گیاهان

منطقه ۵/۸۱۲ mg/kg است؛ بنابراین این فلز نیز خطری برای گیاه ندارد.

۵-۱۰- مقایسه غلظت عناصر در اندام‌های زیرزمینی و روزمینی گیاه

انتقال یون‌ها توسط بافت‌های گیاهی و اندام‌ها، شامل فرایندهای بسیاری است که لیگاندهای کلیت-کننده، بیشترین اهمیت را در این انتقال ایفا می‌کنند. با این حال عوامل به‌شمار دیگری مانند pH، شرایط رداکس و رقابت کاتیون‌ها، تحرک فلزات را در بافت‌های گیاه کنترل می‌کند (Kabata-Pendias, 2011). تحرک عناصر جزئی در اندام‌های گیاه، به خصوصیات شیمیایی عناصر نیز وابسته است. به طور کلی می‌توان گفت Ag, B, Li, Mo و Se، عناصری هستند که به راحتی از ریشه به اندام‌های هوایی گیاه منتقل می‌شود. Zn و Mn, Ni, Cd، تحرک متوسط دارند و Co, Cu, Cr, Hg, P و Fe عناصری هستند که به شدت به سلول‌های ریشه متصل می‌شوند (Kabata-Pendias, 2011).

مقایسه غلظت عناصر مورد مطالعه در اندام‌های زیرزمینی (ریشه) و اندام‌های هوایی (ساقه و برگ) گیاه درمنه، نشان می‌دهد که عناصر Cr, Cu تجمع بالاتری در اندام‌های زمینی در مقایسه با اندام‌های هوایی دارند. همچنین غلظت فلز Zn، در اندام‌های هوایی بیشتر از ریشه گیاه است (شکل ۵-۳۸).



شکل ۵-۳۸- نمودار ستونی غلظت فلزات Cr, Cu, Zn (اندام‌های هوایی (Shoot) و اندام‌های زمینی (Root))

۵-۱۱- ارزیابی رابطه غلظت فلزات در خاک و گیاه با استفاده از شاخص‌های بیوژئوشیمیایی

۵-۱۱-۱- ضریب تجمع زیستی

شاخص تجمع زیستی نشان‌دهنده توانایی انتقال عناصر از خاک به گیاه است (Mani et al., 2007). در

شکل ۵-۳۹، میانگین ضریب تجمع زیستی فلزات مورد مطالعه، آورده شده است. به طور کلی نتایج

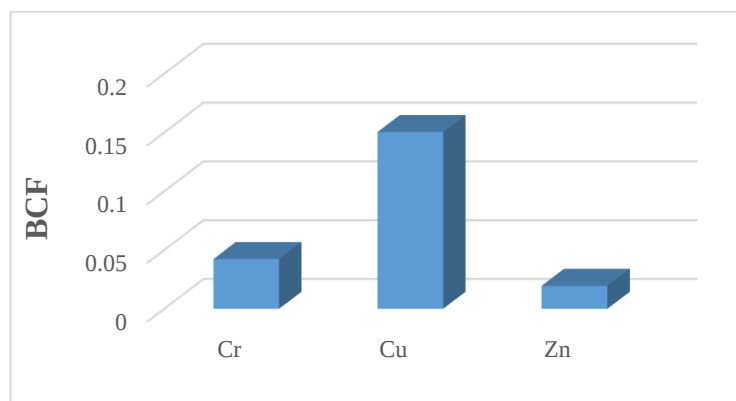
حاصل از محاسبه ضریب تجمع زیستی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- بالاترین BCF متعلق به عنصر Cu است و کمترین BCF مربوط به فلز Zn است.

۲- با توجه به ضریب تجمع زیستی عناصر از خاک به گیاه، تمامی عناصر دارای ضریب تجمع زیستی

کمتر از ۱ هستند؛ بنابراین گیاه درمنه نمی‌تواند به عنوان گونه تثبیت‌کننده هیچ یک از این عناصر عمل

کند.



شکل ۵-۳۹- میانگین ضریب تجمع زیستی عناصر

۵-۱۱-۲- ضریب انتقال

توانایی گیاه برای انتقال فلزات از ریشه به اندام‌های روزمینی با استفاده از ضریب انتقال ارزیابی می‌شود

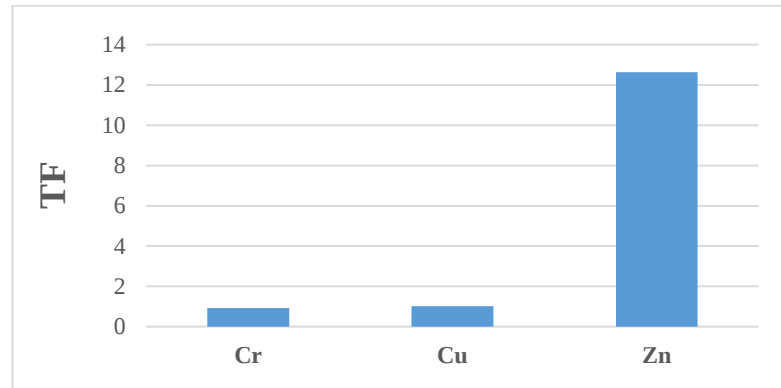
(Yoon et al., 2006). با توجه به شکل ۵-۴۰ مشاهده می‌شود که بالاترین ضریب انتقال مربوط به فلز

روی با ضریب انتقال ۱۲/۶۲۸ و کمترین آن متعلق به فلزات کروم با ضرایب انتقال ۰/۹۲۰ است. نتایج

به دست آمده نشان می‌دهد گیاه درمنه توانایی انتقال عناصر به جز کروم را از ریشه به اندام‌های هوایی

دارا است. این امر تحرک‌پذیری کم کروم را در پیکره گیاه و تمایل آن را به تجمع در اندام‌های زیرزمینی

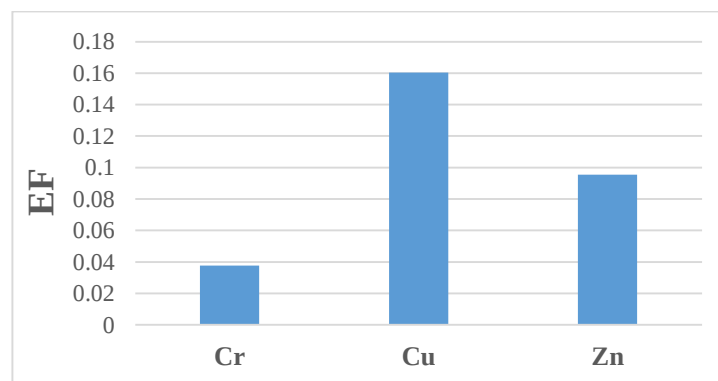
گیاه، نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴۰- میانگین ضریب انتقال عناصر در گیاه درمنه

۵-۱۱-۳- ضریب غنی‌شدگی

بر اساس ضریب غنی‌شدگی می‌توان توانایی انتقال عناصر از خاک به اندام‌های هوایی گیاه را سنجید. با محاسبه ضریب غنی‌شدگی برای عناصر مورد مطالعه (شکل ۵-۴۱)، مشخص شد که بیشترین ضریب غنی‌شدگی متعلق به عنصر Cu است و کمترین مقدار این ضریب نیز، متعلق به فلز Cr است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تمامی عناصر مورد مطالعه، دارای ضریب غنی‌شدگی کمتر از ۱ بوده و نشان از تمایل گیاه درمنه به تجمع این عناصر در ریشه، نسبت به اندام‌های هوایی و در واقع تحرک کم عناصر در اندام‌های گیاه درمنه است.



شکل ۵-۴۱- میانگین ضریب غنی‌شدگی عناصر در گیاه درمنه

۵-۱۲- تحرک و زیست‌دسترس‌پذیری فلزات در نمونه‌های خاک

همانطور که قبلاً هم گفته شد، زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین در خاک‌ها شدیداً وابسته به گونه-سازی شیمیایی آنها است. گیاهان تنها به فازی که در دسترس آنها است پاسخ می‌دهند. فازی که به راحتی حل می‌شود، به عنوان فاز دسترس‌پذیر گیاه، در نظر گرفته می‌شود (Chang et al, 2014). بررسی جزء تبادل‌پذیر می‌تواند به پیش‌بینی دسترس‌پذیری عناصر برای گیاه، کمک قابل‌توجهی کند. جزء تبادل‌پذیر، در حقیقت، نشان‌دهنده مقدار عنصر در دسترس گیاه است (Li et al., 1995). در این مطالعه به منظور ارزیابی جزء تبادل‌پذیر نمونه‌های خاک برداشت شده از مجاورت ریشه گیاهان و تعیین میزان زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین (Cu, Cr, Zn) برای گونه گیاهی درمنه، از محلول کلرید منیزیم ۱ مولار استفاده شد.

میزان زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین مس، روی و کروم در نمونه‌های خاک در جدول ۵-۱۳ آورده شده است. شکل ۵-۴۲ نیز میانگین مقادیر زیست‌دسترس‌پذیری سه فلز سنگین مذکور را، در نمونه‌های خاک نشان می‌دهد.

به طور کلی، به دلیل قلیایی بودن خاک منطقه، درصد زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین مس، روی و کروم پایین است. نتایج زیست‌دسترس‌پذیری مشخص می‌سازد که بالاترین تحرک‌پذیری در میان فلزات مورد بررسی، مربوط به فلز مس است. از طرف دیگر، مقادیر میانگین غلظت مس در اندام‌های گیاه درمنه نیز، نشان می‌دهد فلز مس، در مقایسه با روی و کروم، به میزان بیشتری توسط گیاهان منطقه جذب شده است (شکل ۵-۴۳). این مطلب نشان‌دهنده رابطه مثبت بین غلظت فلزات در بخش تبادل‌پذیر و غلظت آنها در اندام‌های گیاهی است. به طور کلی، میزان زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین مورد مطالعه به صورت زیر تغییر می‌کند:

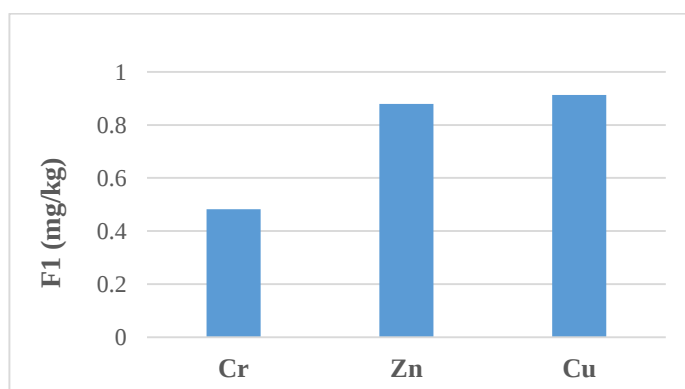
$$\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr}$$

و میزان تجمع فلزات در اندام‌های گیاهی نیز به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

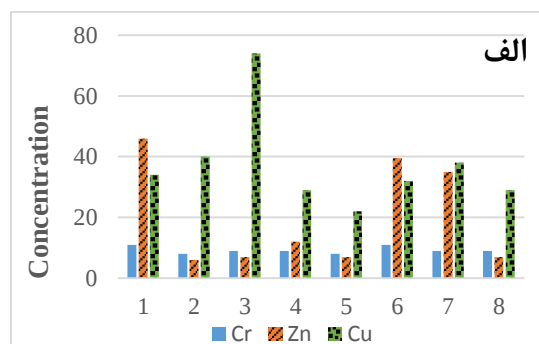
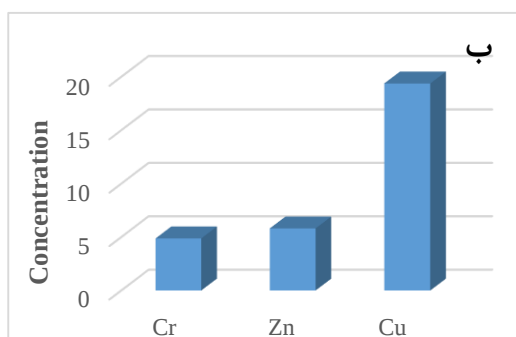
$$\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr}$$

جدول ۵-۱۳۳- درصد زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

شماره نمونه	Cr	Zn	Cu
۳۶	۰/۲۶۵	۰/۱۹۳	۰/۷۱۸
۳۷	۰/۲۹۰	۰/۸۹۲	۰/۴۲۱
۳۸	۱/۰۶۰	۱/۱۴۰	۰/۳۲۶
۴۰	۱/۰۷۳	۰/۷۹۷	۱/۲۱۶
۴۳	۰/۳۵۲	۱/۶	۱/۶۲۷
۴۴	۰/۱۵۲	۰/۹۳۱	۱/۲۲۶
۴۵	۰/۲۳۶	۰/۳۸۱	۰/۶۰۱
۴۸	۰/۲۹۹	۱/۰۹۲	۱/۱۶۴
میانگین	۰/۴۸۲	۰/۹۰۲	۰/۹۱۲



شکل ۵-۴۲- میانگین مقادیر زیست‌دسترس‌پذیری فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک



شکل ۵-۴۳- الف) غلظت فلزات در نمونه‌های گیاهی (مجموع غلظت در اندام‌های زیرزمینی و روزمینی) و ب) میانگین غلظت فلزات در نمونه‌های گیاه

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

معدن مس ایجو، در استان کرمان و در ۷۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان شهر بابک واقع شده است. در این منطقه، با توجه به وجود کانی سازی و دگرسانی های مختلف، احتمال آلودگی خاک منطقه به فلزات سنگین وجود دارد. هدف از این پژوهش، بررسی غلظت کل فلزات سنگین در خاک و گیاهان بومی محدوده ایجو و همچنین تعیین میزان زیست دسترس پذیری این فلزات است. در زیر به خلاصه ای از نتایج بدست آمده از این مطالعه اشاره می شود:

۶-۲- ژئوشیمی سنگ های آذرین منطقه ایجو

در این پژوهش غلظت فلزات سنگین در ۸ نمونه سنگ، به روش ICP-OES تعیین شد. به منظور بررسی کانی های موجود در سنگ های منطقه (۱۸ نمونه) نیز مقاطع نازک و نازک - صیقلی و آنالیز XRD انجام گرفت. همچنین برای تعیین اکسیدهای اصلی نمونه های سنگی از روش XRF استفاده شد. بر طبق نتایج به دست آمده، سنگ های آتشفشانی معدن، ترکیب سنگ شناختی تراکیت، تراکیت داسیت و تراکیت آندزیت را دارا هستند و نمونه های برداشت شده از توده نفوذی ایجو، در محدوده سینودیوریت، دیوریت و کوارتز دیوریت قرار می گیرند. نتایج حاصل از بررسی کانی شناسی زون های دگرسانی با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس نیز نشان داد که کانی های رایج در دگرسانی پتاسیک معدن ایجو، کوارتز، پیریت، آلبیت، کالکوپیریت و کالکوسیت هستند. حضور کانی های رسی از جمله ایلیت در این دگرسانی، قابل توجه است و نشان دهنده شدت فرایندهای هوازدگی فلدسپات ها است. نتایج پراش پرتو ایکس نمونه های برداشت شده از دگرسانی فیلیک، حضور عمده کانی های کوارتز، مسکویت، پیریت و کانی های رسی (ایلیت) را نشان می دهد. کانی های موجود در دگرسانی آرژیلیک در معدن ایجو، نیز شامل کانی های رسی (ایلیت)، آلبیت، کوارتز، مسکویت و پیریت (سولفید رایج همراه با این دگرسانی) است. وجود کانی آلونیت در این دگرسانی، نشان دهنده شرایط بسیار اسیدی و شستشوی شدید در این زون است و تبدیل دگرسانی آرژیلیک را به آرژیلیک پیشرفته تأیید می کند. در نهایت نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس

نمونه‌های برداشت‌شده از دگرسانی پروپلیتیک نیز، حضور آلبیت، کوارتز، کلریت و کلسیت را نشان می‌دهد. بررسی الگوی پراکنش فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی این معدن، نشان می‌دهد که غنی‌شدگی فلز مس در دگرسانی پتاسیک، نسبت به سایر دگرسانی‌ها بیشتر است. فلزات کروم و نیکل در دگرسانی پروپلیتیک بیشترین غلظت را دارند. در دگرسانی آرژیلیک هم غنی‌شدگی اصلی فلزات، مربوط به سه فلز سرب، روی و آرسنیک است.

۳-۶- پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک

در این مطالعه، از میان پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک، ۳ پارامتر pH، درصد ماده آلی و بافت نمونه‌های خاک، اندازه‌گیری شد. تعداد ۳۴ نمونه خاک از عمق ۰-۴۰ سانتی‌متر برای تعیین pH و ماده آلی (به روش دی‌کرومات پتاسیم) و از میان آنها، ۱۱ نمونه به منظور تعیین بافت نمونه‌های خاک (به روش هیدرومتری) انتخاب گردید. به طور کلی نتایج نشان داد که pH نمونه‌های خاک، در محدوده ۸/۰۶ تا ۸/۶۹ قرار می‌گیرد و از این نظر خاک‌های منطقه در رده خاک‌های نسبتاً قلیایی و قلیایی زیاد قرار می‌گیرد. مقدار ماده آلی خاک نیز در بین ۰/۲۶ تا ۳/۳۰ درصد (میانگین ۱/۵۵ درصد) تغییر می‌کند. بافت خاک‌های منطقه نیز عموماً در رده لومی - ماسه‌ای (Sand Loam) و لومی (Loam) قرار می‌گیرد. بنابراین ماسه بیشترین بخش بافت خاک و رس کمترین قسمت را تشکیل می‌دهد.

۴-۶- کانی‌شناسی نمونه‌های خاک

به منظور ارزیابی و بررسی کانی‌های موجود در خاک منطقه، تعداد ۲۲ نمونه خاک به روش XRD مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهند که در نمونه‌های خاک، کانی‌های کوارتز، ایلیت، مسکویت، کلینوکلر، آلبیت، کلسیت و کائولینیت حضور دارند.

۵-۶- غلظت کل فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

غلظت فلزات سنگین در ۳۴ نمونه خاک، به روش ICP-OES تعیین شد. از میان فلزات مورد بررسی سه فلز روی، مس و کروم بالاترین غلظت را در خاک منطقه ایجو نشان می‌دهند. بالاترین غلظت فلزات

در نمونه‌های خاک به صورت زیر است: مس (1073 mg/kg)، سرب (315 mg/kg)، آرسنیک (mg/kg) $66/10$ ، روی (833 mg/kg)، کروم (166 mg/kg) و نیکل (86 mg/kg). غلظت همگی این فلزات بالاتر از غلظت میانگین آنها در خاک‌های جهانی است. در نمونه خاک‌های برداشت شده از زون‌های دگرسانی، غلظت مس در زون پتاسیک و غلظت روی، آرسنیک و سرب در دگرسانی آرژیلیک بیشترین مقادیر را نشان می‌دهند. می‌توان نتیجه گرفت که کانی‌های رسی باعث تمرکز این فلزات در خاک‌های منطقه شده‌اند. غلظت دو فلز کروم و نیکل نیز در زون‌های دگرسانی الگویی مشابه هم داشته و در دگرسانی پتاسیک و بعد از آن در دگرسانی آرژیلیک بیشترین مقدار را داراست. نقشه‌های توزیع فلزات نیز مؤید این نوع پراکندگی است.

۶-۶- ارزیابی کیفیت و شدت آلودگی خاک

به منظور ارزیابی کیفیت خاک از نظر آلودگی، از محاسبه ضریب غنی‌شدگی و شاخص زمین انباشت استفاده شد. بررسی میانگین ضریب غنی‌شدگی فلزات سنگین در زون‌های دگرسانی نشان می‌دهد که بیشترین غنی‌شدگی فلزات As, Pb و Zn مربوط به زون دگرسانی آرژیلیک است. حضور کانی‌های رسی در دگرسانی آرژیلیک از مشخصه‌های اصلی این نوع دگرسانی است. به طوری کلی میانگین ضرایب غنی‌شدگی برای فلزات مورد مطالعه به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

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

بر اساس طبقه‌بندی ضریب غنی‌شدگی، کروم غنی‌شدگی اندک، نیکل، مس و روی غنی‌شدگی متوسط، سرب غنی‌شدگی نسبتاً شدید و آرسنیک غنی‌شدگی شدید نشان می‌دهند. بررسی میانگین شاخص زمین انباشت نمونه‌های خاک با توجه به زون‌های دگرسانی نشان می‌دهد که فلزات روی، سرب و آرسنیک، در زون دگرسانی آرژیلیک، بیشترین میزان شاخص زمین‌انباشت را داشته و خاک منطقه نسبت به این فلزات از لحاظ شدت آلودگی، آلودگی متوسط را نشان می‌دهد. عنصر مس نیز در دگرسانی پتاسیک، دارای بیشترین میزان زمین‌انباشت بوده و در رده آلودگی متوسط قرار دارد.

۶-۷- تحلیل آماری داده‌ها

با توجه به ماتریس همبستگی (جدول ۵-۸)، pH و ماده آلی خاک، هیچ‌گونه همبستگی آشکاری با فلزات مورد بررسی نشان نمی‌دهند. این مسئله می‌تواند ناشی از تغییرات کم این پارامترها، در خاک‌های مورد مطالعه باشد. به طور کلی و با استفاده از نتایج ضریب همبستگی، تحلیل مؤلفه اصلی و آنالیز خوشه‌ای، می‌توان دریافت که احتمالاً عناصر آرسنیک، سرب و روی با یکدیگر هم منشأ هستند. همچنین عناصر کروم و نیکل نیز احتمالاً هم منشأ هستند. در این مطالعه، عنصر مس، با هیچ یک از پارامترهای خاک و فلزات مورد بررسی، رابطه معنی‌دار نشان نداد.

۶-۸- گونه‌پذیری فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

به منظور تعیین گونه‌پذیری فلزات سنگین، تعداد ۶ نمونه خاک برای انجام آنالیز استخراج ترتیبی تسیر انتخاب شدند. با توجه به روند استخراج‌پذیری فلزات سنگین آرسنیک، کروم، نیکل، سرب، مس و روی نتایج زیر به دست آمد:

فلزات مورد مطالعه در فاز تبادل‌پذیر (فاز استخراج شده در مرحله اول روش استخراج ترتیبی) کمترین غلظت را داشته و تمرکز بالایی در فاز باقی‌مانده (مس: ۶۷/۷۴٪، نیکل: ۶۳/۵۶٪، آرسنیک: ۷۸/۵۱٪، روی: ۹۰/۶۷٪، کروم: ۹۷/۲۱٪، سرب: ۸۰/۴۹٪) نشان می‌دهند. حضور عناصر در فاز باقی‌مانده، بیانگر منشأ طبیعی و زمین‌زاد آنها است. بعد از فاز باقی‌مانده تمایل فلزاتی از جمله نیکل و روی به حضور در فاز اکسیدهای آهن و منگنز است. بیش از ۸۵٪ فلز سرب، در نمونه‌های مورد مطالعه، با فاز سوم (پیوند با اکسیدهای آهن و منگنز) و آخر (فاز باقی‌مانده) همراه است. بر اساس نتایج به دست آمده، بیش از ۱۳/۱۸٪ فلز مس، در سومین فاز (متصل به اکسیدهای آهن و منگنز) و ۱۴/۸۰٪ در فاز دوم (پیوند با کربنات‌ها) حضور دارند.

به منظور ارزیابی تحرک فلزات سنگین در خاک، از ضریب تحرک‌پذیری (MF) استفاده شد. بر اساس نتایج، ضریب تحرک‌پذیری، عناصر مورد مطالعه از ۱/۴۲ درصد (برای کروم) تا ۱۴/۷۵ درصد (برای نیکل) متغیر است و به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:

$$\text{Ni } (\% \text{ } 14/75) > \text{Cu } (\% \text{ } 13/25) > \text{Pb } (\% \text{ } 7/50) > \text{As } (\% \text{ } 6/10) > \text{Zn } (\% \text{ } 2/62) > \text{Cr } (\% \text{ } 1/42)$$

بنابراین نیکل و مس در خاک‌های اطراف کانسار مس ایجو بیشترین تحرک را دارا هستند؛ در حالی که کروم و روی عمدتاً در فاز باقی‌مانده حضور داشته و تحت شرایط طبیعی پایدار بوده و تحرکی نخواهند داشت.

۶-۹- غلظت عناصر در نمونه‌های گیاه درمنه

غلظت فلزات سنگین در ۸ نمونه گیاه (درمنه)، به روش ICP-MS تعیین شد. مقایسه غلظت عناصر در اندام‌های زیرزمینی (ریشه) و اندام‌های روزمینی (ساقه و برگ) گیاه درمنه، نشان می‌دهد که فلزات Cr و Cu تجمع بالاتری در اندام‌های زیرزمینی در مقایسه با اندام‌های روزمینی دارند. همچنین غلظت عنصر Zn در اندام‌های هوایی بیشتر از ریشه گیاه است. محاسبه شاخص ضریب تجمع زیستی نشان می‌دهد که بالاترین BCF، متعلق به عنصر Cu است و کمترین آن مربوط به فلز، Zn است. بالاترین ضریب انتقال مربوط به فلز روی با ضریب انتقال ۱۲/۶۲۸ و کمترین مقدار این ضریب متعلق به فلزات کروم با ضریب انتقال ۰/۹۲۰ است. بیشترین ضریب غنی‌شدگی نیز متعلق به فلز Cu است و کمترین مقدار این ضریب، مربوط به فلز Cr است. بر اساس نتایج به دست آمده، تمامی عناصر مورد مطالعه، دارای ضریب غنی‌شدگی کمتر از ۱ بوده که نشان‌دهنده تمایل گیاه درمنه به تجمع این عناصر در ریشه، نسبت به اندام‌های هوایی و در واقع تحرک کم این عناصر در اندام‌های گیاه درمنه است.

۶-۹-۱- زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین

ارزیابی مقدار زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین (Cu, Cr و Zn) در نمونه‌های خاک برداشت شده از مجاورت ریشه گیاهان، نشان داد که درصد زیست‌دسترس‌پذیری این فلزات پایین است که این مسئله با توجه به قلیایی بودن خاک‌های منطقه، توجیه‌پذیر است. بیشترین قابلیت تحرک در میان فلزات، مربوط به فلز مس است. همچنین این فلز در مقایسه با روی و کروم، به میزان بیشتری توسط گیاهان منطقه جذب شده است. به طور کلی میزان زیست‌دسترس‌پذیری و همچنین میزان تجمع فلزات، در

اندام‌های گیاهی به ترتیب زیر کاهش می‌یابد:



۶-۱۰- پیشنهادات

- ۱- ارزیابی نقش عوامل انسانزاد با پیشرفت فعالیت‌های معدنکاری و استخراج کانسنگ، بر پراکندگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف منطقه
- ۲- ارزیابی غلظت فلزات سنگین در سایر گیاهان بومی منطقه و شناسایی گیاهان انباشتگر
- ۳- مطالعه کانی‌شناسی زیست‌محیطی باطله‌های معدن و بررسی پتانسیل تولید زهاب اسیدی معدن
- ۴- بررسی آلودگی منابع آب زیرزمینی منطقه به فلزات سنگین، با در نظر گرفتن عوامل زمین‌شناسی و کانه‌زایی مس در منطقه
- ۵- انجام مطالعات ارزیابی ریسک (سلامتی و اکولوژیکی) ناشی از فعالیت‌های معدنکاری در منطقه.

منابع

- حیدری ف، (۱۳۸۷)، پایانامه ارشد: "بررسی دگرسانی، کانه سازی مس و شرایط تشکیل کانسنگ مس در محدوده اکتشافی ایجو، شهربابک، کرمان"، دانشکده علوم، دانشگاه تهران.
- ذبیحی ر. ابراهیمی خ و زرین کوب م، (۱۳۹۰)، "بررسی کانی شناسی و ژئوشیمی نهشته‌ی کانی خاک رس کائولینیته شده‌ی شیخ آباد (جنوب غربی بیرجند) با نگرشی بر کاربردهای صنعتی آن. مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران" شماره ۱. ۱۰۳-۱۱۲.
- سلطانی ن، (۱۳۹۱)، پایانامه ارشد: "بررسی ارتباط بین کانی زایی و میزان عناصر سنگین در کانسار مس پورفیری دره زار"، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.
- شرکت ملی صنایع مس ایران، (۱۳۸۹)، گزارش زمین شناسی و آلتراسیون محدوده ایجو، گزارش داخلی.
- شهاب پور ج، (۱۳۸۴)، "زمین شناسی اقتصادی"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
- صالحی ر، (۱۳۸۳)، پایانامه ارشد: "بررسی ژئوشیمیایی زون‌های آلتره در معدن مس سرچشمه و تأثیر معدنکاری در پراکنش و انحلال پذیری فلزات سنگین"، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.
- طالبی م، (۱۳۸۴)، پایانامه ارشد: "مطالعه لیتوژئوشیمی، دگرسانی و سیالات درگیر کانسار مس پورفیری ایجو، شمال غرب شهربابک"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تربیت مدرس.
- فرقانی تهرانی گ. و مر ف، (۱۳۹۱)، "کاربرد تکنیکهای گونه سازی عناصر جزئی در رسوبات و خاک"، اولین همایش تخصصی کاربرد شیمی در علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریم پور م و سعادت س، (۱۳۸۴)، "زمین شناسی اقتصادی کاربردی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- کریم پور م، (۱۳۸۸)، "ژئوشیمی، پترولوژی سنگ های آذرین و کانسارهای ماگمایی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- مر ف. دهقانی ش و کشاورزی ب، (۱۳۹۱)، "تعیین غلظت عناصر کمیاب در خاک و گیاهان اطراف معدن مس میدوک"، مجله زمین اقتصادی. ۳۰۵-۳۱۴.
- مر ف؛ سلطانی ن؛ کشاورزی ب؛ کریمی م و اسماعیل زاده ع، (۱۳۹۱)، "زمین شیمی زیست محیطی آب، خاک و رسوبات کانسار مس دره زار (کرمان)" مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته. جلد ۱. شماره ۳.
- واروی پور م، (۱۳۸۹)، "خاکشناسی عمومی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه پیام نور، تهران.

References

- 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, pp 315-338.
- Arenas-Lago D. Andrade M. L. Lago-Vila M. Rodriguez-Seijo A. and Vega, F.A. (2014) "Sequential extraction of heavy metals in soils from a copper mine: Distribution in geochemical fractions" Geoderma., 230-231. pp 108-118.
- Baker A. J. (1981) "Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals" plant nutrition. 3(1-4), pp 643-654.

- Baker A. J. M. and Brooks R. (1989) "Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements-a review of their distribution" *Ecology and phytochemistry. Biorecovery*, 1, pp 81-26.
- Baker, A. J. M. McGrath, S. P. Sidoli, C. M. D. and Reeves, R. D. (1994) "The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants" *Resources, Conservation and Recycling*, 11(1-4), 41-49.
- Banerjee A. D. (2003) "Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India" *Environmental Pollution*, 123(1), pp 95-105.
- Beane R.E. and Titley S.R. (1981) "Porphyry copper deposits, part II, Hydrothermal alteration and mineralization. In: B. Skinner (Ed), *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume" *Thw Economic Geology Publishing Company*, New Heaven., pp 235-269.
- Bradl H. B. (2005) "**Heavy metal in the Environment**" *University of Applied Sciences Trier Neubrucke. Germany*. 6.
- Branquinho C., Serrano, H. C., Pinto, M. J. and Martins-Loução, M. A. (2007) "Revisiting the plant hyperaccumulation criteria to rare plants and earth abundant elements" *Environmental Pollution*, 146(2), 437-443.
- Brith G. (2003) "A scheme for assessing human impacts on coastal aquatic environments using sediment" In: Wood Coffe, C. D., Furness, R.A., (Eds), *coastal GIS*.
- Bu-Olayan A. and Thomas B.V. (2009) "Translocation and Bioaccumulation of Trace Metals in Desert Plants of Kuwait Governorates" *Environmental Sciences*, 5, pp 581-587.
- Calagar A.A. (2003) "Concentration variations of major and minor elements across various alteration zones in porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran" *Sciences, Islamic Republic of Iran*, 14, pp. 27-36.
- Chabukdhara M. and Nema, A. K. (2013) "Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach" *Ecotoxicology and environmental safety*. 87, pp 57-64.
- Chang Y-T., Hseu Z-Y. and Zehetner F. (2014) "Evaluation of phytoavailability of heavy metals to Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) in Rural soils" *The Scientific world*.
- Chesworth W. (2008) "Encyclopedia of Soil sciences" *Springer-Verlog, Dordrecht*, pp 860.
- Cox K.G. Bell J.D and Pakhurst R.J. (1979) "The Interpretation of Igneous Rocks, London" *Allen and Unwin*, 450.
- Dinelli E., and Lombini A. (1996). Metal distributions in plants growing on copper mine spoils in Northern Apennines, Italy: the evaluation of seasonal variations. *Applied Geochemistry*, 11(1), 375-385.
- Donald L.S. (1995) "Environmental soil chemistry" *Academic Press*, 267pp.
- Evans, A. M. (2009). *Ore geology and industrial minerals: an introduction*. John Wiley and Sons.
- Favas P. J. Pratas J. Gomes M. E. P. and Cala V. (2011) "Selective chemical extraction

- of heavy metals in tailings and soils contaminated by mining activity: Environmental implications” *Geochemical Exploration.*, 111(3), pp 160-171.
- Forghani G., Mokhtari A. R., Kazemi G. A. and Fard M. D. (2015) “Total concentration, speciation and mobility of potentially toxic elements in soils around a mining area in central Iran” *Chemie der Erde-Geochemistry*, 75(3),pp 323-334.
- Ghaderian S. M. and Ravandi, A. A. G. (2012) “Accumulation of copper and other heavy metals by plants growing on Sarcheshmeh copper mining area, Iran” *Geochemical Exploration*, 123,pp 25-32
- Gleyzes Ch. Tellier S. Astruc M. (2002)” Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction procedures” *trends in analytical chemistry.*, 21, pp 451-467.
- Håkanson, L. (1980) “An Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach” *Water Res.*, 14, pp 975-1001.
- <http://search.usa.gov/search?utf8=%E2%9C%93&affiliate=usgs&query=BIOAVAILABILITY+OF+METALS+&query-quote=&query-or=&query-not=&filetype=&filter=1&commit=Advanced+Search>. (1995).
- https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwiboPbzrqiRAhVFORoKHa49DqwQFggsMAI&url=https%3A%2F%2Fwww.nrcs.usda.gov%2FInternet%2FFSE_DOCUMENTS%2Fnr142p2_052208.pdf&usq=AFQjCNGz1bG3nFzqX_VqWBmjAWNO0sr05w&bvm=bv.142059868,d.d2s. (1998).
- Kabala C and Singh B. R. (2001) “Fractionation and Mobility of Copper, Lead, and Zinc in Soil Profiles in the Vicinity of a Copper Smelter” *Environmental Quality.*, 30, pp 485 -492.
- Kabata A and Pendias H. (2001) “**Trace elements in soils and plants**” CRC, Washington.
- Kabata – Pendias, Alina. (2011) “**Trace Elements in Soils and Plants**” CRC press.
- Kabata-Pendias A. (1993) “Behavioural properties of trace metals in soils. *Appl.Geochem*” *Applied Geochemistry.* 2, pp 3-9
- Kabata-Pendias A. and Mukherjee, A. B. (2007) “**Trace elements from soil to human**” Springer Science and Business Media.
- Koz B. Cevik U. and Akbulut S. (2012) “Heavy metal analysis around Murgul (Artvin) copper mining area of Turkey using moss and soil” *Ecological Indicators*, 20,pp 17-23.
- Kuno, H. (1968) “Differentiation of basalt magmas. Basalts” 2(3), 623-688.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) “A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram” *Petrology.* 27, pp 745-750.
- Li X. Coles B. J. Ramsey, M. H. and Thornton I. (1995) “Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES” *Chemical Geology.*, 124(1).pp 109-123.
- Liang X. Zhong Y. Tan W. Zhu J. Yuan P. He, H. and Jiang, Z. (2013) “The influence of substituting metals (Ti, V, Cr, Mn, Co and Ni) on the thermal stability of magnetite” *thermal analysis and calorimetry*, 111(2), 1317-1324.

- Lindsay, W. L. (1979) "*Chemical equilibria in soils*" John Wiley and Sons Ltd.
- Loska K. Chebual J. Pleczar J. Wiechla D. and Kwapulinski J. (1995) "Use of environment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu and Ni in the Rybink water reservoir in Poland" *Water, Air and Soil pollution*. Vol. 93, pp. 347-365.
- Lowell J. D. and Guilbert J. M. (1970) "Lateral and vertical alteration zoning in porphyry ore deposits" *Econ. Geol.* 65, pp. 373-408.
- Luo W. Wang T. Lu Y. Giesy J. Shi Y. Zheng Y. Xing, Y. and Zheng, Y. (2007) "Landscape Ecology of the Guanting reservoir, Beijing China: Multivariate and geostatistics analysis of metals in soils". *Environmental Pollution*., Vol. 146, pp. 567- 576.
- Mani D., Sharma B., Kumar C. (2007) "Natural speciation of Ni, Zn, Ba, and As in ferromanganese coating from *Helianthus annuus* L. (Sunflower)" *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 7, pp 71-79.
- Mason B. and Moore C. B. (1982) "Principles of geochemistry" John Wiley and Sons, 344 pp.
- Middlemost E. A. (1994) "Naming materials in the magma/igneous rock system" *Earth-Science Reviews*., 37(3), 215-224.
- Moore F. Dehghani Sh. Keshavarzi B. Eslami A. and Ramazani, M. R. (2010) "Trace element concentration and bioavailability in soils and plants in the vicinity of Miduk Copper mine, Kerman, Iran" *International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University Mashad Branch, Iran*., 26- 28, pp 223-228.
- Müller G. (1969) "Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River" *Geojournal*.2, pp 108–118.
- Oze C. J. P. (2003) "Chromium geochemistry of serpentinites and serpentine soils" (Doctoral dissertation, Stanford University).
- Peccrillo A. and Taylor S. A. (1976) "Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey" *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 58, pp 63-81.
- Phillips W. R. (1964) "A numerical system of classification for chlorites and septechnorites" *Mineral. Mag*, 33, pp 1114-1124.
- Qishlaqi A. Moore F. and Forghani G. (2009) "Characterization of metal pollution in soils under two land use patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis" *hazardous materials*, 172(1), pp 374-384.
- Ramirez M. Massolo S. Frache, R. and Correa, J. A. (2005) "Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile" *Marine Pollution Bulletin*., 50(1), pp 62-72.
- Rao C. R. M. Sahuquillo A. and Lopez Sanchez J. F. (2008) "A Review of the Different Methods Applied in Environmental Geochemistry For Single and Sequential Extraction of Trace Elements in Soils and Related Materials" *Water Air Soil Pollut.*, 189, pp 291-333.
- Rodriguez L. Ruiz E. Alosa-Azcarate J. (2009) "Heavy metal distribution and chemical

- speciation in tailings and sils around a Pb-Zn mine in Spain” *Environmental Management*. 90, pp 1106-1116.
- Salomons W. (1995) “Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention” *Geochemica Exploration*, 52, pp 5-23.
- Selinus OL. Alloway Br. Centeno Ro. Fuge R. Lindh U. and Smedley Pa. (2005) “*Medical Geology*” Elsevier Academic Press.
- Sherene T. (2010) “Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment” *Biological Forum*, 2, pp 112-121.
- Sielaff K. and Einax J.W. (2007) “The application of multivariate statistical methods for the evaluation of soil profiles” *Soil Sediments*, 7, pp 45-52.
- Sillitoe, R. H. (2010) “Porphyry copper systems” *Economic geology*, 105(1), pp 3-41.
- Takac P. Szabova T. Kozakova L. and Benkova, M. (2009) “Heavy Metals and their Bioavailability from soils in the long-term polluted central Spis region of SR” *Plant soil environ*, 55, pp 167-172.
- Tessier A. Campbell P. G. C. and Bisson, M. (1997) “Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals” *Analytical chemistry*, 51, pp 844-851.
- USDA. (1987) “Soils mechanics level 1, Module 3; USDA textural soil classification study guide. National Employee Development Staff, Soil Conservation Service” United States Department of Agriculture. Washington, D.C.
- USEPA. (2004) “Test methods for evaluating solid waste. In: Method 9045D, Washington, D.C”.
- Wedepohl K.H. (1972) “**Handbook of Geochemistry**” Springer.
- Winant A. R. (2010) “Sericitic and advanced argillic mineral assemblages and their relationship to copper mineralization, Resolution Porphyry Cu-(Mo) Deposit, Superior District, Pinal County” Arizona (Doctoral dissertation, University of Arizona).
- Yacilin M.G., Narin I., Soylak M. (2008) “Multivariate analysis of heavy metal contents of sediments from Gumusler creek, Nigde, Turkey” *Environ. Geol.* 54, pp 1155-1163.
- 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, p. 456-664.
- Zimmerman A. and Weindorf, D.C. (2010) “Heavy Metal and Trace Metal Analysis in Soil by Sequential Extraction: A Review of Procedure” *Analytical Chemistry*. 387803, pp 1-7.

Abstract

One of most important source of heavy metals in environment, particularly in soils, is mineralization and its related alteration zones. The present study generally aims to investigate the heavy metal concentration and distribution, with emphasizing the role of alteration zones, in soils of Ijo porphyry copper mine area. In addition to total metal concentrations, bioavailability contents and chemical forms of heavy metals in soils are also determined by single and sequential extraction methods. Results of whole rock analysis indicated that Cu in potassic alteration zone (on average 1674 mg/kg) and Pb (283 mg/kg), As (45 mg/kg) and Zn (419 mg/kg) in argillic zone, Cr (15 mg/kg) and Ni (19 mg/kg) in propylitic zone are greatly enriched. The patterns of heavy metals distribution in soil also showed that As, Pb and Zn in the argillic alteration zone (with mean values of 47.06, 137 and 580.06 mg/kg, respectively) and Cu (457.25 mg/kg) in the potassic zone, have the highest concentrations. The results of sequential extraction method also indicated that, all the studied elements, were mainly retained in residual fraction. Exchangeable fraction was the least abundant fraction for metals studied. Mobility factor of studied element indicated that Ni and Cu in the soils have relatively higher mobility whereas Cr and Zn are typically characterized by low mobility factors (% 1.42 and % 2.62). Elemental concentration in *Artemisia* samples indicated that, high enrichment factors belongs to Cu which have highest Bio-concentration factor (0.16 and 0.15, respectively). This is also confirmed by the results of single extraction method indicating again that Cu have the most mobility factor among the the heavy metals studied. Finally, this study concludes that even though source of heavy metals in soils of the study area is mainly geogenic, further exploitation and mining would lead to extensive soil contamination which can be considered in future environmental assessments in the study area.

Keywords: Heavy metals, Alteration zones, Bioavailability, Soil, Ijo porphyry copper mine.



Faculty of Earth Sciences
M.Sc.Thesis in Environmental Geology

**Bioavailability and total concentrations of heavy metals in the soils
around Ijo Copper mine, with emphasis on alteration zones, Shahr-e-
Babak area (Kerman province)**

by:

Azra Asadi korom

Supervisor:

Dr. Afshin Qishlaqi

February 2017