



استفاده از روش‌های آمار انفصال و تحلیل‌های عاملی و خوشه‌ای برای بررسی رفتار زمین-شیمیایی نقره در کانی‌زایی مس-مولیبدن پورفیری حراران، استان کرمان

سمیه عباس زاده، امیرحسین کوهساری*

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۹/۲۰، نسخه نهایی: ۹۷/۲/۴)

چکیده: یکی از منابع نقره، ذخایر مس-مولیبدن پورفیری است که در آن عنصر نقره به صورت جانبی تولید می‌شود. در این مطالعه رفتار زمین‌شیمیایی عنصر نقره در منطقه حراران برپایه نتایج تجزیه ۶۰۷ نمونه سنگ‌زمین‌شیمیایی برای عناصر W, Zn, Ag, As, Ba, Co Cu, Mo, Pb, Sb, Sn, Sr, Bi بررسی شد. این ذخیره که در جنوب شرق ایران واقع شده، دارای کانی‌زایی مس-مولیبدن پورفیری است. از روش‌های آمار انفصال و تحلیل چندمتغیره برای شناسایی نواحی دارای بی‌هنجاری نقره و عناصر همراه استفاده شد. بررسی نقشه‌های نواحی بی‌هنجار به دست آمده با استفاده از روش آمار انفصال نشان داد که نواحی بی‌هنجار عناصر نقره، مس، سرب و روی تقریباً همپوشی دارند. نمودار درختی به دست آمده از تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی نشان داد که عناصر نقره و مس همبستگی داشته و در یک گروه قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن، نتایج تحلیل عاملی نیز نشان داد که عامل سوم شامل عناصر نقره و مس با بالاترین مقدار ویژه است. سرانجام رفتار دوگانه نقره یعنی همراهی با مس به خاطر قرار گرفتن در شبکه کانی‌های مس‌دار مانند کالکوپریت و بورنیت از یک‌طرف و همراهی با عناصر سرب به خاطر قرار گرفتن در شبکه گالن از سوی دیگر با روش‌های آمار انفصال و تحلیل‌های چند متغیره ثابت شد.

واژه‌های کلیدی: رفتار عنصر نقره؛ آمار انفصال؛ تحلیل عاملی؛ تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی.

مقدمه

عنصر در کانی‌های گالن، تترائیدریت، کالکوپریت، پیریت و اسفالریت به صورت میانبار یا جانشینی در شبکه بلوری کانی میزبان دیده می‌شود [۱]. نقره به عنوان عنصر جانبی در کانی‌های سرب یا مس دیده می‌شود و کانی‌های گالن و کالکوپریت میزبان‌های اصلی این عنصر به شمار می‌روند [۳]. در ساختار کانی گالن، این عنصر به همراه عناصر آنتیموان، بیسموت و آرسنیک به صورت محلول جامد دیده شده‌اند که مقدار آن‌ها به طور مستقیم با دمای تشکیل تغییر می‌کند. پارامترهای شیمی-بلور نقره بسیار به سرب نزدیک است و به صورت میدان هشت وجهی در کانی گالن دیده می‌شود. شعاع

نقره از محدود عناصری است که در طبیعت به صورت آزاد یافت شده و یکی از نخستین گنج‌های بشر به شمار می‌رفته است [۱]. مقدار این عنصر در سنگ‌های آذرین متفاوت است و از ۰/۰۵ گرم بر تن در سنگ‌های اولترامافیک تا ۰/۰۷ گرم بر تن در سنگ‌های اسیدی تغییر می‌کند [۲]. تولید جهانی این عنصر در حدود ۲۰ درصد به عنوان فراورده اصلی از ذخایر نقره و در حدود ۸۰ درصد به صورت فراورده جانبی از کنسارهای مس، سرب، روی و طلاست [۱].

نقره اغلب همراه با سولفیدهای سرب، روی، و مس و گاهی در سولفیدهای بیسموت و آنتیموان دیده می‌شود. بنابراین، این

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۱۵۱۴۵۶۱، نامبر: ۰۳۵۳۵۲۴۴۳۵، پست الکترونیکی: kohsary@yahoo.com

یونی سرب بسیار نزدیک به شعاع یونی نقره است و بار اضافی در وضعیت هشت وجهی یون سرب باعث جانشینی بیسموت به همراه نقره در آن می‌شود [۴]. جانشینی نقره در گالن یک مثال خوب از محلول جامد است که در واکنش جانشینی $2Ag^+ \leftrightarrow Pb^{2+}$ تقریباً نامحلول است و در نتیجه یک یا هر دو اتم آن در شبکه گالن جای می‌گیرند. در صورت نبود بیسموت و آنتیموان، جانشینی نقره در گالن در محلول جامد از ۰/۱ مول درصد تجاوز نمی‌کند و نقره تشکیل شده به صورت میانبار، رابطه بلوری با گالن میزبان نشان نمی‌دهد [۵].

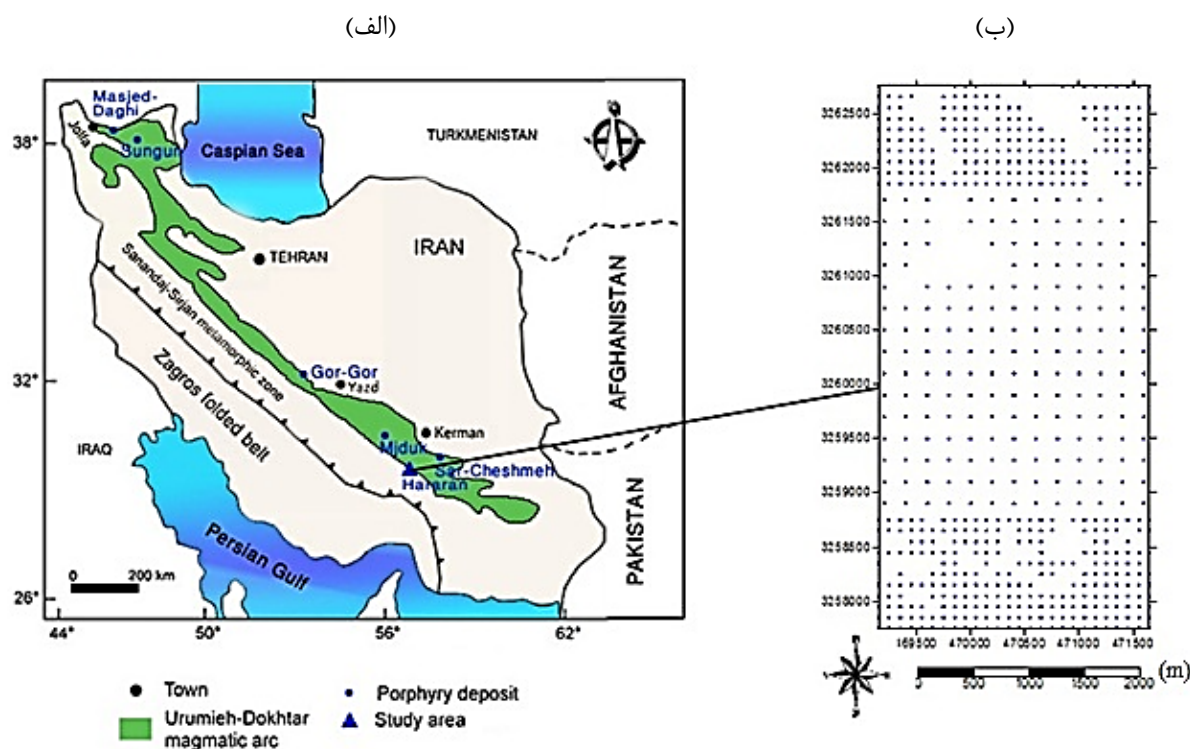
علت وجود نقره به صورت محلول جامد در کانی‌های سولفیدی مس، شباهت در بار و اندازه یون‌های مس و نقره است که مقدار آن به ترتیب در کانی‌های کوولیت، بورنیت، کالکوسیت، کالکوپیریت و پیریت افزایش می‌یابد [۶]. به‌طور کلی، توزیع نقره در کانی‌های مس نامنظم بوده و نتایج تجزیه شیمیایی کانی‌های مس نقره‌دار نشان داده است که بین مقدار مس و نقره آنها رابطه عکس وجود دارد و در این نوع کانی‌ها، مقدار نقره به صورت نقره طبیعی یا آلیاژ آن بیش از حالتی است که به‌صورت جانشینی هم‌ریخت و بدون اصلاح ساختار بلوری آنها در ساختار کانی تشکیل می‌شود [۷].

یکی از منابع اصلی نقره در جهان ذخایر مس پورفیری هستند که عنصر نقره به‌عنوان فراورده جانبی استخراج می‌شود [۸]. متوسط نقره ذخایر مس پورفیری بین ۰/۲ تا ۵ گرم بر تن متغیر است [۹]. گستفسون و هانت مقدار نقره ذخیره مس پورفیری ال سالوادور را ۰/۴۱ گرم بر تن برآورد کردند که در کانی‌های بورنیت-کالکوپیریت وجود دارد [۱۰]. کوریت ارتباط بین کانی‌زایی مس، مولیبدن، طلا و نقره در سیستم‌های مس-مولیبدن پورفیری را با چند پژوهش موردی بررسی کرد [۱۱].

هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار زمین‌شیمیایی نقره در معدن مس پورفیری حراران و ارتباط آن با سایر عناصر، با استفاده از روش‌های تحلیل تک‌متغیره (روش آمار انفصال) و تحلیل چندمتغیره (تحلیل خوشه‌ای و عاملی) است. آمار انفصال، یکی از روش‌های تک‌متغیره‌ای است که از طریق آن حد آستانه‌ای تعیین می‌شود. اساس این روش تابع توزیع است

و بیشتر برای مواردی که ناپیوستگی داده‌ها چندان آشکار نیست، به‌کار برده می‌شود [۱۲]. تحلیل عاملی یک روش آماری چندمتغیره است که روابط بین متغیرها را بر اساس ضرایب همبستگی خطی بین آن‌ها اندازه‌گیری می‌کند. هدف اصلی این روش شناسایی ساختار داده‌های چندمتغیره و کاهش تعداد آن‌ها به تعدادی عامل مشخص است [۱۳]. یکی دیگر از روش‌های چندمتغیره، روش تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی است که یکی از معمول‌ترین روش‌های خوشه‌بندی است و در بررسی‌های زمین‌شناسی و آب‌شناسی برپایه پیدا کردن خوشه‌هایی از نمونه‌ها با بیشترین شباهت، به کار می‌رود [۱۴]. پژوهشگران بسیاری از این روش‌ها برای اهداف مختلف زمین‌شیمی استفاده کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به پژوهش انجام‌شده توسط خراسانی پور و همکاران اشاره کرد که با استفاده از روش‌های تحلیل چندمتغیره نواحی آلوده را در اطراف سرچشمه شناسایی کردند [۱۵]. علاوه بر آن هانگ و همکاران و ایدریس و همکاران به ترتیب از این روش‌ها برای شناسایی عناصر سنگین در زمین‌های کشاورزی اطراف یک معدن سرب و روی واقع در چین و شناسایی عناصر سنگین در رسوبات واقع در سواحل دریای سرخ استفاده کرده‌اند [۱۶، ۱۷]. این روش‌ها توسط بسیاری از پژوهشگران برای شناسایی مناطق بی‌هنجاری در اکتشاف مواد معدنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۸، ۱۴، ۱۹-۲۳].

داده‌های مورد استفاده از نمونه‌های سنگ‌زمین‌شیمیایی از منطقه حراران برداشت‌شده‌اند که در ارتباط با کانی‌زایی مس-مولیدن پورفیری بوده و در شمال شرقی شهرستان بافت و در طول جغرافیایی $30^{\circ} 39' 56''$ تا $30^{\circ} 43' 56''$ شرقی و عرض جغرافیایی $30^{\circ} 26' 29''$ تا $30^{\circ} 29' 29''$ شمالی در نقشه مکان نگاری ۱:۱۰۰۰۰۰۰ بافت واقع است. این منطقه از نظر تقسیمات زمین‌شناسی در بخش جنوبی کمربند آتشفشانی ارومیه - دختر واقع است و بر اساس تقسیمات زمین‌ساختی دیمتریویچ (۱۹۷۳) در پهنه دهج - ساردوئیه در استان کرمان جای دارد [۲۴]. موقعیت جغرافیایی این منطقه در شکل ۱ الف نشان داده شده‌است.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه حراران و نقاط نمونه‌برداری آن: (الف) موقعیت جغرافیایی تعدادی از ذخایر مس-مولیبدن پورفیری و منطقه مورد مطالعه در کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (ب) نقاط نمونه‌برداری لیتوژئوشیمیایی در منطقه حراران.

زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

چنان که در شکل ۲ دیده می‌شود، بیشتر واحدهای سنگ‌های قدیمی مربوط به دوره آئوسن هستند و در بیشتر نواحی منطقه رخنمون دارند و شامل سنگ‌های آندزیت و آندزیت پورفیری هستند که در شمال منطقه واقع شده‌اند. سنگ‌های آندزیتی برشی شده نوع دیگری از این واحدهای سنگی هستند که در جنوبی‌ترین قسمت از ناحیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین توده‌های نفوذی دیوریت و گرانودیوریت قرار گرفته در جنوب منطقه به درون سن‌های آتشفشانی نفوذ کرده و در پی آن دگرسانی و کانی‌سازی صورت گرفته است. افزون بر آن، توده‌های نفوذی توانلایت و گرانودیوریت که در قسمت‌هایی از مرکز، غرب و شمال غرب منطقه واقع شده‌اند، مربوط به واحد-های سنگی آئوسن هستند. این توده‌ها به صورت استوک‌های مجزا به مجموعه سنگ‌آتشفشانی آندزیتی نفوذ کرده و توده پس از کانی‌سازی بوده و بر کل مجموعه دگرسانی و کانی‌سازی نیز اثر داشته‌اند. دیگر رخنمون‌ها شامل آلومین با سنگ آتشفشانی آندزیتی، آلومین با جوش آتشفشانی، کوارتزی می-

باشند. دایک‌های داسیتی با روند شمال شرق- جنوب غرب در بیشتر قسمت‌های منطقه پخش شده‌اند. در بررسی‌های میکروسکوپی مقطع صیقلی به دست آمده از نمونه‌های واقع در منطقه حراران، کانی‌های کالکوپیریت، کوولیت و بورنیت دیده شده‌اند که برای مثال تصویری از یک نمونه در شکل ۳ آورده شده است. کالکوپیریت، کانی اصلی سولفیدی و ملاکیت کانی کربناتی این کانسار هستند. کالکوپیریت در بعضی نقاط و در اثر برونزد به کانی‌های کوولیت و بورنیت تبدیل می‌شوند. بافت کانی کالکوپیریت پرکننده فضای خالی است [۲۵].

روش بررسی

نمونه‌برداری

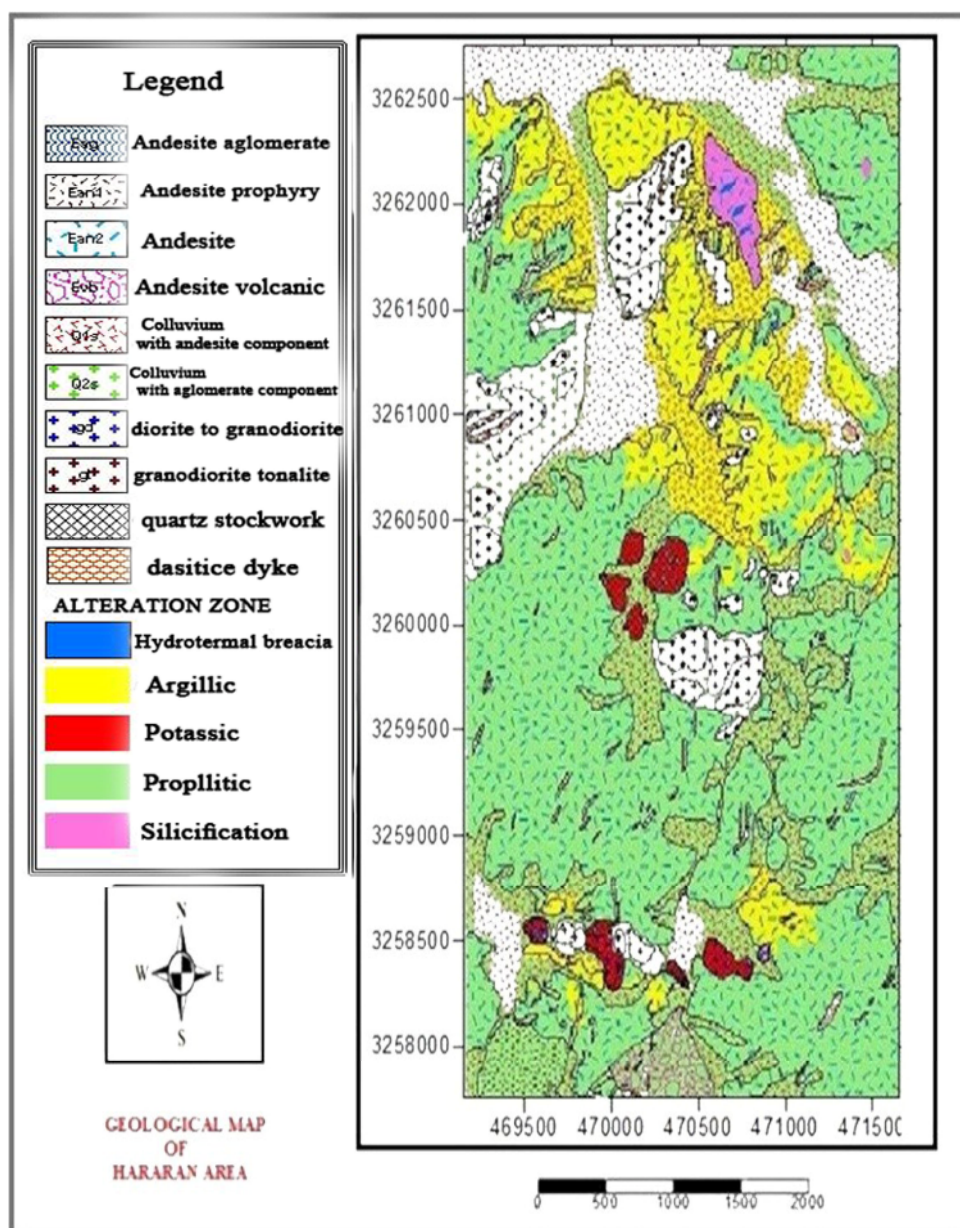
در منطقه مورد بررسی به مساحت تقریبی ۱۲/۵ کیلومتر مربع، ۶۰۷ نمونه سنگ‌زمین‌شیمیایی در یک شبکه نامنظم نواحی جنوبی و شمالی، شبکه مترمتر ۱۰۰ × ۱۰۰ متر مربع و در مرکز با فواصل ۲۰۰ × ۲۰۰ متر مربع برداشت شده است که جایگاه آنها در شکل ۱ ب دیده می‌شود. نمونه‌ها توسط شرکت

برای انجام بررسی‌های آماری این پژوهش از نرم‌افزار SPSS و برای رسم مناطق بی‌هنجاری عناصر از نرم‌افزار Golden Surfer استفاده شده است.

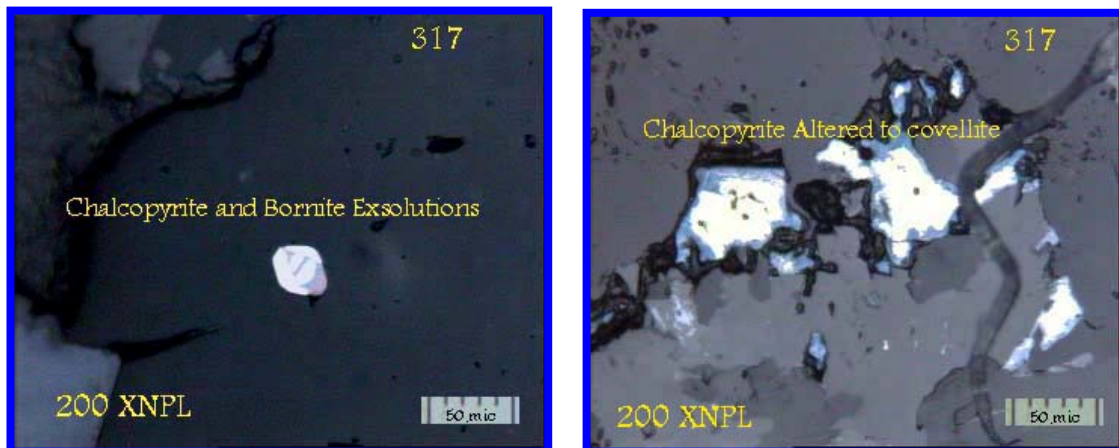
آمار انفصال

آمار انفصال یکی از روش‌های برپایه تابع توزیع است که به کمک آن می‌توان حد آستانه‌ای را برآورد کرد. آمار انفصال بیشتر برای مواردی که ناپیوستگی داده‌ها چندان آشکار نیست مفید است [۱۲].

مهندسین مشاور کاوشگران گستره کویر و به صورت سطحی برداشت شده‌اند [۲۵]. نمونه‌برداری تقریباً در سراسر منطقه مورد بررسی انجام شده است که ترکیب غالب سنگ‌شناسی آن‌ها، سنگ‌های آندزیتی تا داسیتی است. نمونه‌ها برای بررسی ۴۴ عنصر توسط آزمایشگاه Amdel استرالیا به روش طیف-سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) تجزیه شدند که در این پژوهش از نتایج تجزیه عناصر W, Zn, Ag, As, Ba, Co, Cu, Mo, Pb, Sb, Sn, Sr استفاده شد.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه حراران (۱:۵۰۰۰) رخنمون سنگ‌های قدیمی که در بیشتر منطقه دیده می‌شوند، مربوط به دوره اتوسن هستند.



شکل ۳ مقطع صیقلی نمونه به‌دست آمده از منطقه حراران که کانی‌های کالکوپیریت، بورنیت و کوولیت را نشان می‌دهد.

$$m = \frac{Z_i + 1 + Z_i}{2} \quad (۳)$$

در آخر m_i مربوط به بزرگ‌ترین مقدار آمار انفصال مشخص شده و توسط رابطه زیر مقدار حد آستانه‌ای مشخص می‌شود:

$$y = ZS + \bar{X} \quad (۴)$$

روش‌های تحلیل چندمتغیره

روش‌های چندمتغیره برای بررسی و شناسایی روابط بین عناصر در داده‌های زمین‌شیمیایی اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها شامل تحلیل مؤلفه اصلی، تحلیل خوشه‌ای، تحلیل عاملی، تحلیل رگرسیون، تحلیل تمایز و ... هستند. در این پژوهش از روش‌های تحلیل عاملی و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی برای شناسایی روابط بین عناصر استفاده شده است [۲۸].

تحلیل عاملی

تحلیل عاملی یک روش آماری چندمتغیره است که روابط بین متغیرها را بر اساس ضرایب همبستگی خطی بین آن‌ها اندازه‌گیری می‌کند. هدف اصلی این روش شناسایی ساختار داده‌های چند متغیره و کاهش تعداد آن‌ها به تعدادی عامل مشخص است [۱۳]. در این روش چند عامل با استفاده از توابع خطی عناصر شیمیایی اصلی محاسبه می‌شوند. هر عامل برای گروه خاصی از عناصر به‌کار برده شده و ارتباط بین آن‌ها را مشخص می‌کند که این امر در زمین‌شیمی اکتشافی اهمیت بیشتری دارد تا اینکه هر عنصر به‌تنهایی مورد بررسی قرار گیرد. در این روش، بار هر عامل درجه ارتباط بین آن و متغیر را مشخص می‌کند [۱۴].

اولین قدم در استفاده از این روش یافتن تبدیلی از داده‌هاست که توزیع داده‌ها را تا حد ممکن به توزیع نرمال نزدیک کند، زیرا اساس این روش بر فرض نرمال بودن توزیع داده استوار است. در مرحله بعد، داده‌های تبدیل یافته برحسب مقدارشان مرتب شده و برای حذف آثار مقیاس داده‌ها، باید استاندارد شوند، به‌طوری‌که میانگین هر عنصر صفر و انحراف معیار آن یک باشد. در اینجا، داده‌های استاندارد شده Z نامیده می‌شوند. در مراحل بعدی مقدار آمار انفصال برای هر زوج به صورت زیر محاسبه می‌شود: (۱) مرتب کردن مقادیر Z به ترتیب صعودی، (۲) محاسبه میانگین دو مقدار متوالی استاندارد شده (m_i)، (۳) به دست آوردن تفاوت دو مقدار متوالی استاندارد شده که فاصله‌های استاندارد نامیده می‌شوند، (۴) محاسبه مقدار آمار انفصال (G_i): بزرگ‌ترین مقادیر فواصل استاندارد شده متمایل به قرار گرفتن در انتهای توزیع هستند و تقریباً هرگز تمایل ندارند که در نزدیکی میانه قرار بگیرند؛ بنابراین، مقادیر حد آستانه زمین‌شیمیایی می‌توانند در هر مکانی و با مقادیر متفاوتی قرار بگیرند. در این حالت، این روند به وجود آمده باید حذف شود که با ضرب کردن مقادیر فواصل استاندارد شده در فراوانی فرض شده در مرکز فاصله موردنظر انجام می‌شود. (۵) انتخاب بزرگ‌ترین مقدار G_i ‌های محاسبه شده و سپس محاسبه m_i متناظر با آن به‌عنوان آمار انفصال و حد آستانه داده‌ها با استفاده از آن [۱۲، ۲۷].

روش محاسبه G_i به‌طور خلاصه در زیر آورده شده است.

$$G_i = F(m) \left[Z_i + 1 - Z_i \right] \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (۱)$$

$$F(m) = 0.3989e^{-\frac{1}{2}m^2} \quad (۲)$$

تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی

روش آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی یکی از معمول‌ترین روش‌های خوشه‌بندی است که در بررسی‌های زمین‌شناسی و آب-شناسی برپایه پیدا کردن خوشه‌هایی از نمونه‌ها با بیشترین شباهت، به کار می‌رود [۱۴]. در این روش، ابتدا فاصله (شباهت) جفت نمونه‌ها محاسبه شده و سپس گروه‌ها بر اساس شباهتشان امتیازدهی می‌شوند و سرانجام نمودار درختی که یک ساختار سلسله مراتبی است و چگونگی اتصال نمونه‌ها و یا متغیرها به هم را نشان می‌دهد، تولید می‌شود [۲۹]. در بالای این نمودار یک مقیاس خطی افقی قرار داده می‌شود. محل اتصال هر نمونه با یک خوشه یا یک خوشه به خوشه دیگر بر این مقیاس خطی متناظر با درجه شباهت آن است [۱۴]. روش‌های سلسله مراتبی و دیگر الگوریتم‌های خوشه‌بندی با به کار بردن یک روش کارا از نظر محاسباتی سعی می‌کنند تا خوشه‌های مناسب را ارائه نمایند. این روش خوشه‌بندی نخست هر نقطه را به عنوان یک خوشه مجزا در نظر گرفته و شباهت سایر نقاط را نسبت به آن می‌سنجد و نقاط مشابه را در یک خوشه قرار می‌دهد و این کار تکرار می‌شود تا همه نقاط خوشه‌بندی شوند [۱۴].

نتایج

پردازش‌های آماری اولیه

پیش از انجام تحلیل‌های آماری، لازم است که داده‌ها پیش‌پردازش شوند که شامل جایگزینی مقادیر سنسورد و خارج از ردیف و تبدیل داده‌ها از فضای بسته به فضای باز است.

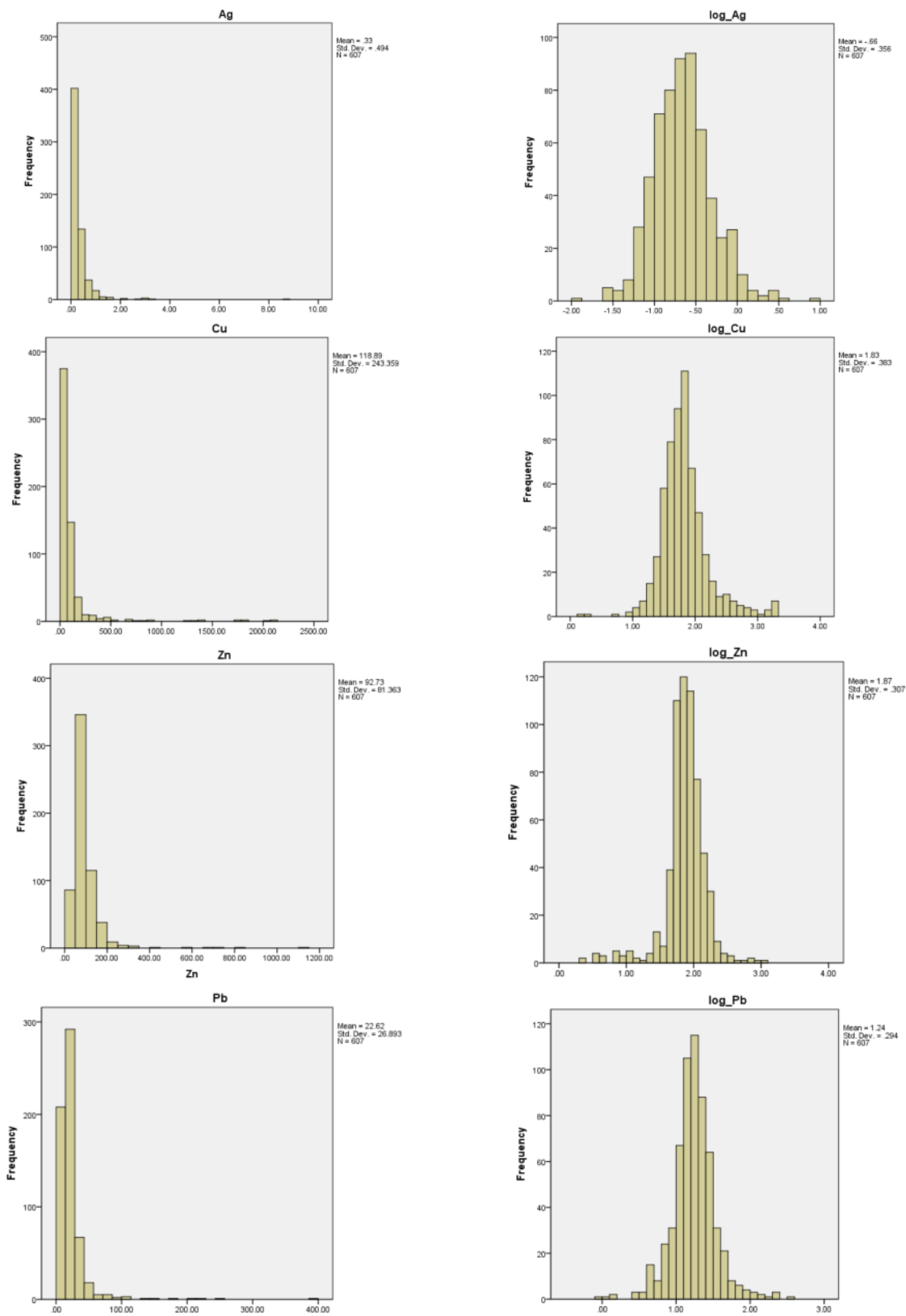
پس از آن مقادیر آماری اولیه داده‌های خام (۶۰۷ نمونه) برای عناصر مختلف محاسبه شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. چنان که دیده می‌شود، مقادیر میانگین، انحراف معیار، بیشینه و کمینه عنصر نقره به ترتیب برابر با ۰/۳۳، ۰/۴۹، ۸/۶۷ و ۰/۰۱ گرم بر تن است. با بررسی نمودار ستونی عناصر و پارامترهای آماری آن‌ها مشخص شد که آن‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. برای استفاده از روش‌های آماری توضیح داده‌شده، لازم است که داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند؛ بنابراین با استفاده از تابع تبدیل لاگ نرمال، داده‌ها تبدیل شدند تا از توزیع نرمال پیروی کنند. برای مثال نمودار ستونی داده‌های خام عنصر نقره و داده‌های تبدیل یافته در شکل ۴ آورده شده است.

نتایج روش آماره انفصال

بر اساس اصول روش آمار انفصال که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد و بر اساس روابط ارائه‌شده، یک کد در برنامه اکسل نوشته شد. مقادیر حد آستانه‌ای داده‌ها برای هر عنصر محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. دیده می‌شود که حد آستانه برای نقره برابر با ۰/۴۲ محاسبه شده است. بنابراین، مقادیر بزرگ‌تر از حد آستانه به عنوان مناطق دارای بی‌هنجاری شناخته می‌شوند که این مناطق برای عناصر نقره، مس، سرب و روی در منطقه حراران در شکل‌های ۵ الف تا د نشان داده شده است. چنان که دیده می‌شود، این مناطق بی‌هنجاری تقریباً هم‌پوشی دارند.

جدول ۱ پارامترهای آمار توصیفی اولیه بعضی از عناصر در منطقه حراران

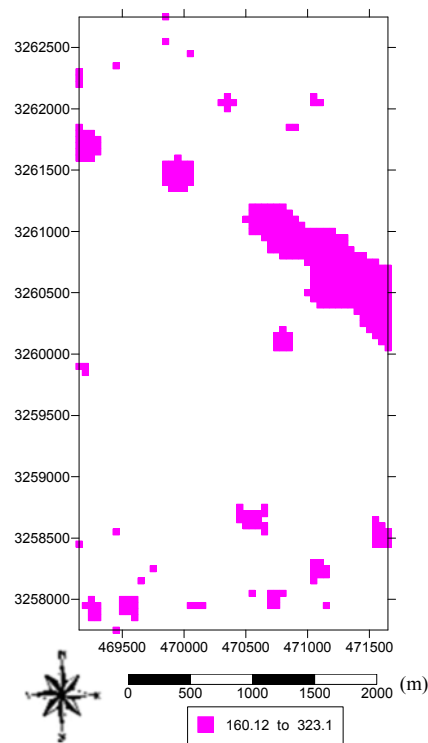
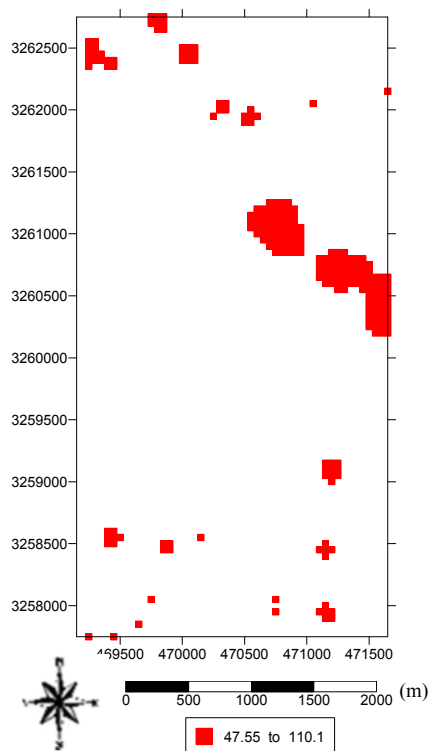
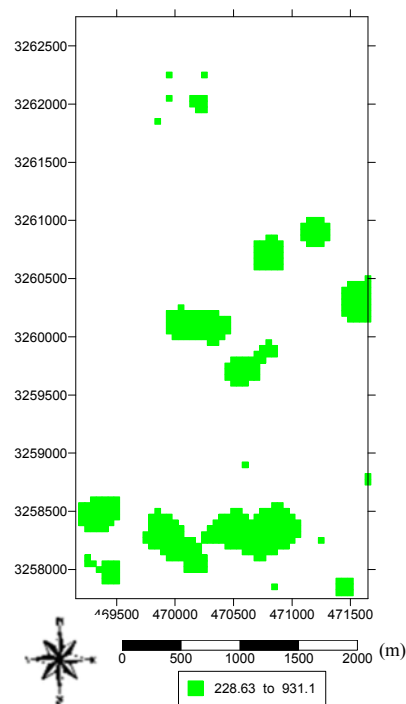
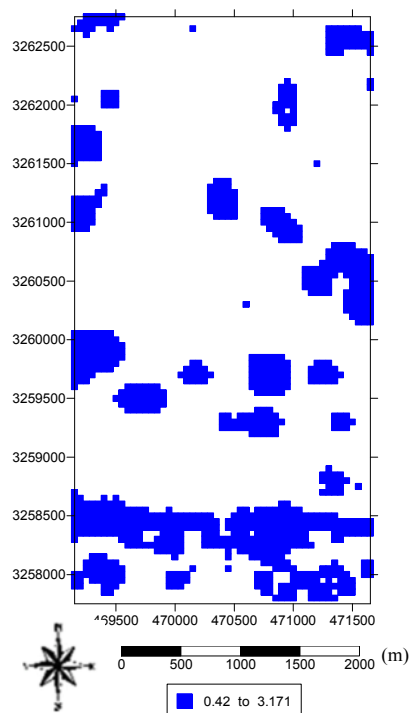
عنصر	میانگین (گرم بر تن)	انحراف معیار (گرم بر تن)	کمینه (گرم بر تن)	بیشینه (گرم بر تن)	کشیدگی (گرم بر تن)
نقره	۰/۳۳	۰/۴۹	۰/۰۱	۸/۶۷	۹/۶۰
مس	۱۱۸/۸۹	۲۴۳/۳۶	۱/۴۰	۲۱۲۰/۰۰	۵/۸۲
سرب	۲۲/۶۲	۲۶/۸۹	۰/۸۰	۳۹۵/۰۰	۷/۵۲
روی	۹۲/۷۳	۸۱/۳۶	۲/۱۰	۱۱۱۰/۰۰	۶/۵۰
استرانسیوم	۳۳۷/۸۲	۹۳/۲۵	۳۷/۵۰	۶۸۷/۰۰	-۰/۴۸
باریم	۳۰۷/۱۱	۱۹۶/۹۷	۱۰/۹۰	۱۵۷۰/۰۰	۲/۲۲
آرسنیک	۱۲/۷۰	۱۱/۵۰	۰/۵۰	۱۳۳/۰۰	۳/۶۲
کیالت	۱۵/۰۷	۵/۸۳	۰/۴۰	۳۴/۲۰	-۰/۳۵
مولیبدن	۱/۱۹	۲/۶۱	۰/۰۵	۳۴/۶۰	۷/۶۵
آنتیموان	۲/۶۰	۱/۸۱	۰/۱۰	۱۵/۷۰	۱/۷۸
قلع	۱/۱۱	۰/۵۵	۰/۰۷	۵/۳۰	۲/۷۸
تنگستن	۱/۱۵	۱/۹۳	۰/۰۷	۴۶/۳۰	۲۱/۲۹



شکل ۴ نمودارهای ستونی داده‌های خام سنگ زمین‌شیمیایی (سمت چپ) و داده‌های سنگ‌زمین‌لیتوزئوشیمیایی تبدیل یافته با تابع لاگ بهنجار عناصر نقره، مس، سرب و روی در منطقه حراران.

جدول ۲ مقادیر حد آستانه‌ای به‌دست‌آمده برای عناصر مختلف با استفاده از روش آمار انفصال در منطقه مورد بررسی.

تنگستن	قلع	روی	آنتیموان	مولیبدن	مس	کبالت	آرسنیک	نقره	باریم	استرانسیوم	سرب	حد آستانه
۱٫۲۵	۱٫۰۶	۱۶۰٫۱۲	۳٫۶۱	۰٫۷۱	۲۲۸٫۶۳	۳۲٫۱۴	۱۴٫۸۷	۰٫۴۲	۳۰۶٫۰۰	۴۵۰٫۱۴	۴۷٫۵۵	



شکل ۵ نقشه بی‌هنجاری عناصر نقره، مس، سرب و روی در منطقه حراران (مناطق رنگی نشان‌داده‌شده مقادیری بالاتر از حد آستانه برای هر عنصر هستند).

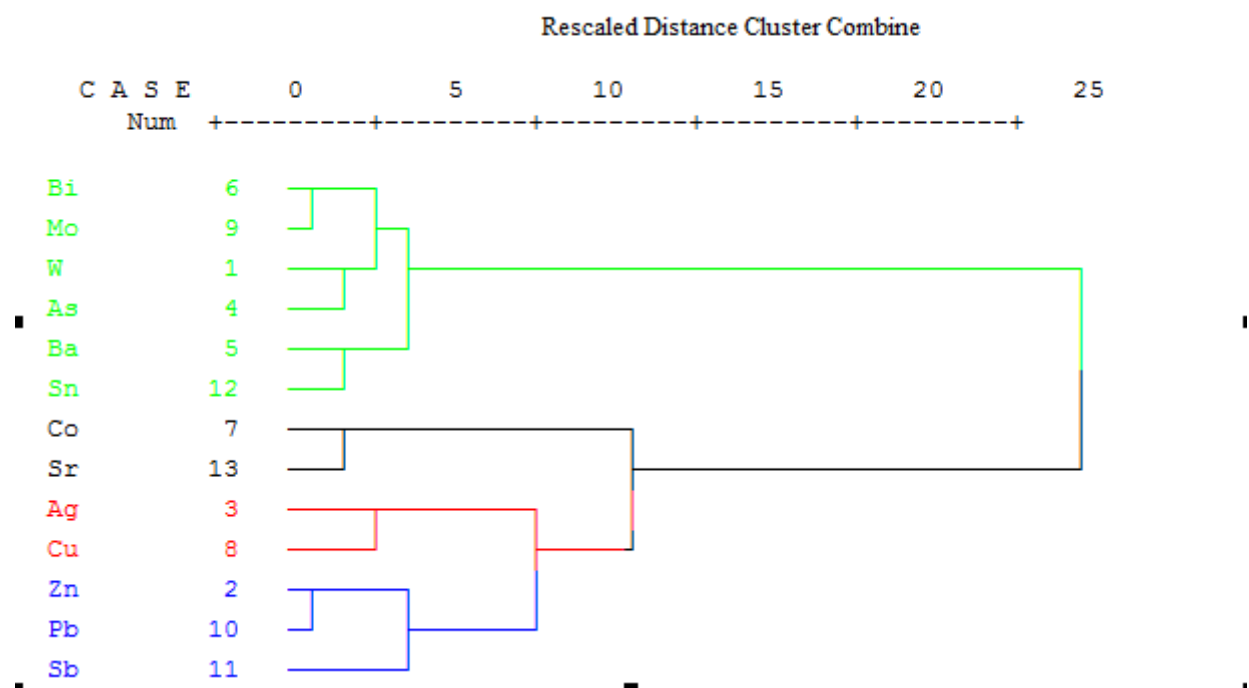
نتایج تحلیل خوشه‌ای

نتایج برآمده از تحلیل خوشه‌ای با استفاده از روش وارد و فاصله اقلیدسی به صورت نمودار درختی در شکل ۶ نشان داده شده است. عناصر با توجه به همبستگی آنها، در چهار گروه جداگانه تفکیک شده‌اند که در شکل این گروه‌ها با رنگ‌های مختلف نشان داده شده‌اند. گروه سوم که با رنگ قرمز نشان داده شده است شامل عناصر نقره و مس است و این نشان می‌دهد که این دو عنصر بالاترین همبستگی را با هم دارند. علاوه بر آن، عناصر سرب، روی و آنتیموان که به رنگ آبی در نمودار خوشه‌ای نشان داده شده‌اند نیز در یک گروه جداگانه قرار گرفته‌اند که بیانگر همبستگی این عناصر است و چنان که دیده می‌شود این دو گروه از عناصر در مرحله بعد یک گروه بزرگ‌تر تشکیل می‌دهند که نشان‌دهنده وجود همبستگی بین نقره و سرب و روی اما به میزان کمتر نسبت به مس و نقره است.

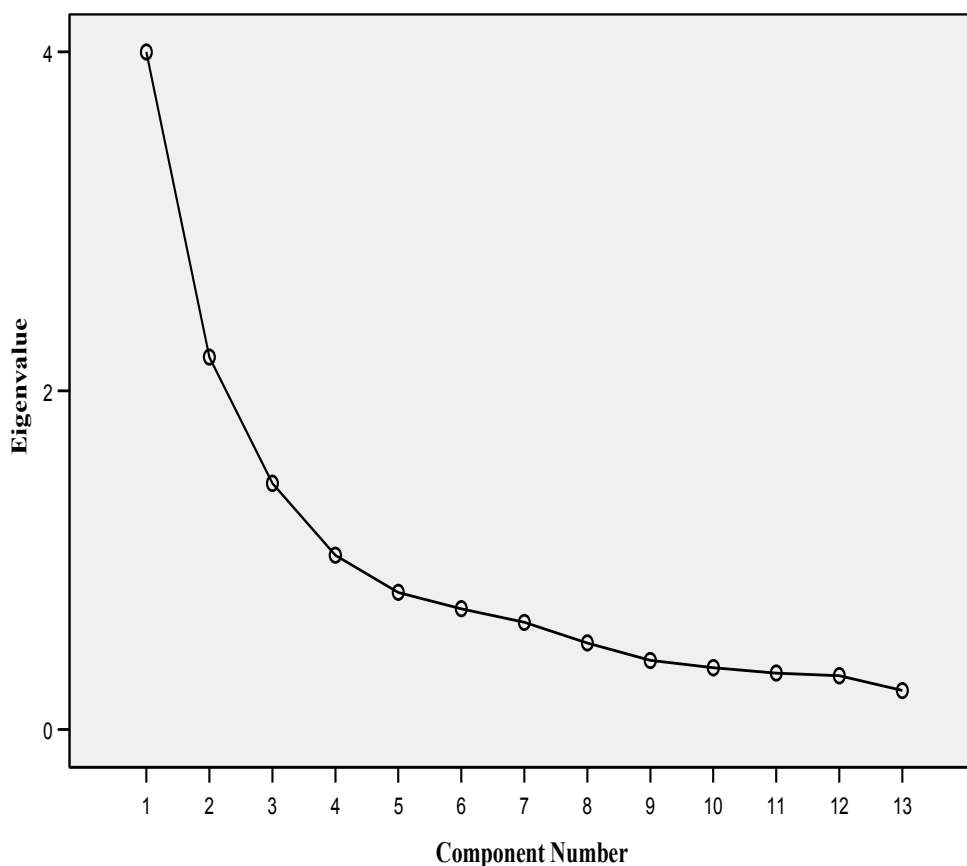
تحلیل عاملی

برای انجام این روش، داده‌های پس از پیش‌پردازش، استاندارد شدند تا اثر مقیاس از بین برود. یکی از مهم‌ترین روش‌های استانداردسازی، تبدیل داده‌ها به صورتی است که میانگین آن‌ها صفر و واریانس آن‌ها یک باشد [۱۲]. به این منظور، برای هر

عنصر، میانگین داده‌ها از هر داده کم شده و بر انحراف معیار آن‌ها تقسیم شد. در مرحله دوم، عوامل مهم با استفاده از نمودار صخره‌ای و جدول واریانس کلی که به ترتیب در شکل ۷ و جدول ۳ نشان داده شده‌اند، استخراج شدند. بر این اساس، ۴ عامل انتخاب شد که واریانس کل محاسبه شده برای آن‌ها بیش از ۶۶ درصد بود و علاوه بر آن، این چهار عامل مقدار ویژه بالاتر از یک را در نمودار صخره‌ای نشان دادند. در مرحله سوم، تابع چرخش واریمکس بر مؤلفه‌های اصلی اعمال و ماتریس بار عوامل (مقادیر ویژه هر عامل) مشخص شد و سرانجام امتیاز هر عامل با ضرب امتیاز استاندارد متغیر اصلی در بار عوامل محاسبه شد. گفتنی است که این محاسبات توسط نرم افزار SPSS انجام شد. با بررسی بار هر عامل مشخص شد که عناصر مس و نقره در عامل سوم دارای بالاترین مقدار ویژه هستند و با توجه به نقشه عامل، محل بی‌هنجاری این عناصر مرکز کانی-زایی را نشان داد. نقشه این عامل به همراه مقادیر ویژه عناصر موجود در آن در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این نقشه، نواحی با مقادیر ویژه بالا به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند که محل بی‌هنجاری‌های مس و نقره هستند؛ بنابراین، مرکز کانی‌زایی در جنوب ناحیه مورد بررسی قرار دارد.



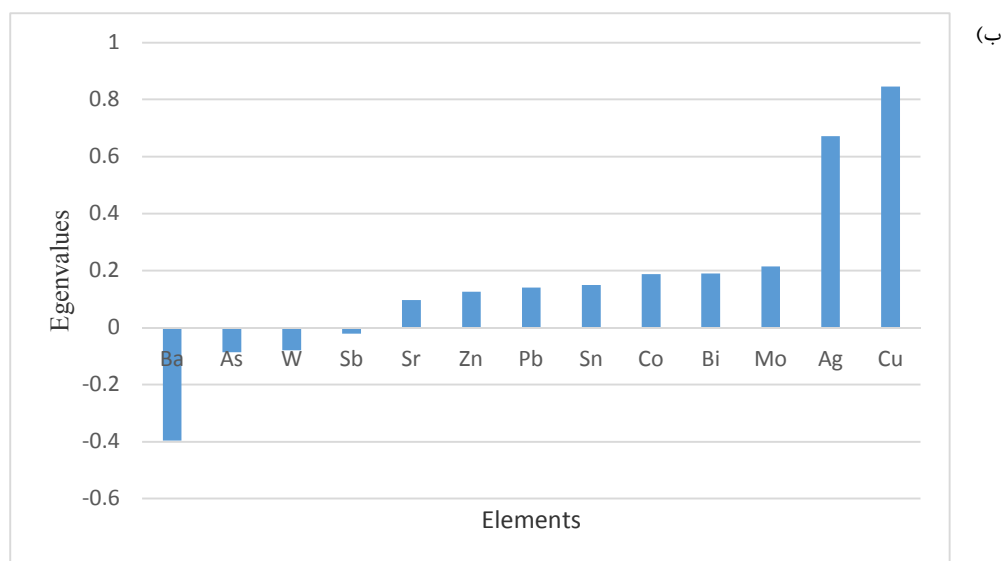
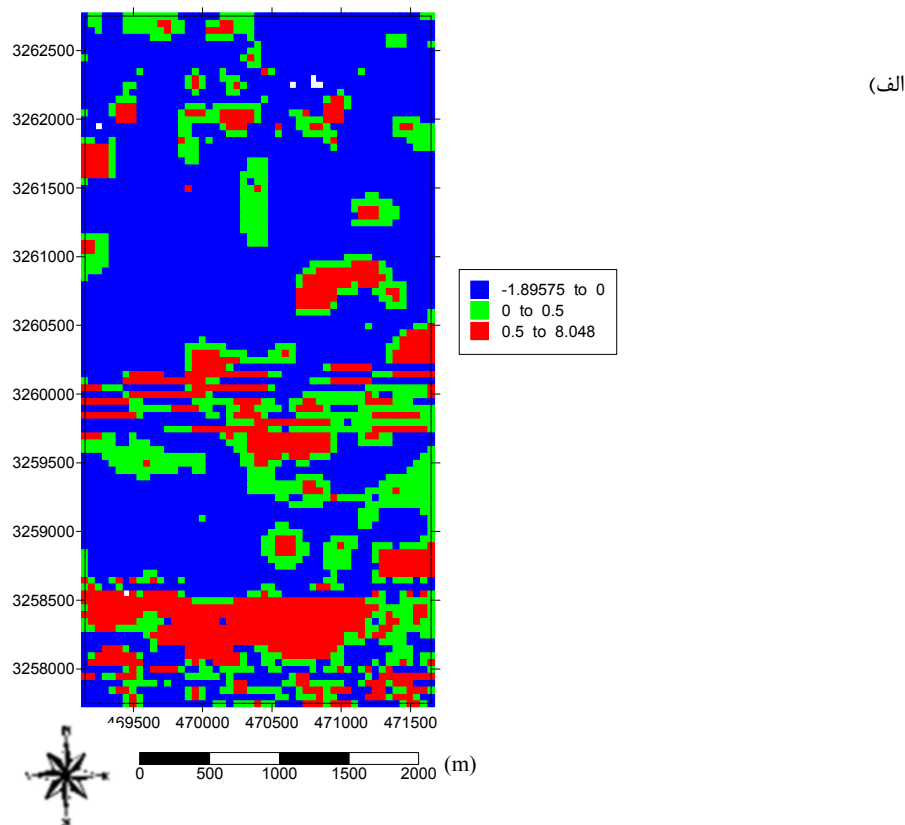
شکل ۶ نمودار خوشه‌ای به دست آمده از تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی داده‌های سنگ‌زمین‌شیمیایی در منطقه حراران.



شکل ۷ نمودار صخره‌ای به‌دست آمده از تحلیل عاملی برای تعیین تعداد عوامل مؤثر.

جدول ۳ واردایی تجمعی به‌دست آمده از تحلیل عاملی داده‌های سنگ‌زمین‌شیمیایی در منطقه حراران.

عامل	بردارهای ویژه اولیه			مجموع مولفه‌های استخراج شده			مجموع مولفه‌های دوران یافته		
	کل	واریانس (%)	واریانس تجمعی (%)	کل	واریانس (%)	واریانس تجمعی (%)	کل	واریانس (%)	واریانس تجمعی (%)
1	۴,۰۰	۳۰,۷۶	۳۰,۷۶	۴,۰۰	۳۰,۷۶	۳۰,۷۶	۳,۹۶	۳۰,۴۶	۳۰,۴۶
2	۲,۲۰	۱۶,۹۱	۴۷,۶۷	۲,۲۰	۱۶,۹۱	۴۷,۶۷	۱,۷۸	۱۳,۶۷	۴۴,۱۳
3	۱,۴۵	۱۱,۱۸	۵۸,۸۵	۱,۴۵	۱۱,۱۸	۵۸,۸۵	۱,۵۲	۱۱,۷۱	۵۵,۸۴
4	۱,۰۳	۷,۹۱	۶۶,۷۶	۱,۰۳	۷,۹۱	۶۶,۷۶	۱,۴۲	۱۰,۹۲	۶۶,۷۶
5	۰,۸۱	۶,۲۳	۷۲,۹۹						
6	۰,۷۱	۵,۴۹	۷۸,۴۸						
7	۰,۶۳	۴,۸۷	۸۳,۳۴						
8	۰,۵۱	۳,۹۳	۸۷,۲۷						
9	۰,۴۱	۳,۱۴	۹۰,۴۱						
10	۰,۳۶	۲,۸۱	۹۳,۲۲						
11	۰,۳۳	۲,۵۷	۹۵,۷۹						
12	۰,۳۲	۲,۴۴	۹۸,۲۳						
13	۰,۲۳	۱,۷۷	۱۰۰,۰۰						



شکل ۸ نقشه عامل سوم به همراه (ب) مقادیر ویژه عناصر مربوط به آن برآمده از تحلیل عاملی در منطقه مورد بررسی.

نتایج کانی‌شناسی

از آنجا که نتایج تجزیه نقره برای کانی‌های کالکوپیریت و یا گالن در منطقه مورد بررسی موجود نیست، نتایج تجزیه آن‌ها برای تعدادی کانسار مس پورفیری از سایر نقاط دنیا آورده شده است. با توجه به اینکه معمولاً مدل‌های کانسارهای مس پورفیری مشابه هستند، نتایج گزارش شده می‌تواند به این

کانسار مس پورفیری نیز تعمیم داده شود. این نتایج در جدول ۴ آورده شده است و بر اساس آن می‌توان نتیجه گرفت که نقره به صورت محلول جامد در کانی‌های گالن و کانی‌های مس‌دار مانند کالکوپیریت یا بورنیت وجود دارد که با نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های سنگ‌زمین‌شیمیایی همخوانی دارد.

جدول ۴ مقدار عنصر نقره بر حسب گرم بر تن در کانی‌های کالکوپیریت، گالن و بورنیت تعدادی از ذخایر مس پورفیری

نام ذخیره	کالکوپیریت	گالن	بورنیت	مرجع
Valea Morii	۲۲۰	۱۵۶۳		[30]
Bucium-Tarni ța	۸۳			[30]
Bolcana	۱۲۹		۱۵۱۰	[30]
Rovina	۲۷۷			[30]
Roșia Poien	۱۲۵	۲۹۷	۱۴۷۷	[30]
Colnic	۱۵۱	۲۴۹۷		[30]
Elatsite Bulgaria		۶۱۸		[5]

برداشت

روش‌های آمار انفصال، تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی و تحلیل عاملی برای شناسایی رفتار زمین‌شیمیایی عنصر نقره در ذخیره مس-مولیبدن پورفیری واقع در منطقه حراران استفاده شدند. مقادیر حد آستانه عنصر نقره و عناصر همراه با استفاده از روش آمار انفصال محاسبه شدند و بر اساس این مقادیر نقشه بی-هنجاری عناصر نقره، مس، سرب و روی رسم شدند. نواحی بی-هنجاری عنصر نقره بیشترین هم‌پوشی را نخست با نواحی دارای بی-هنجاری عنصر مس و در مرحله بعد با نواحی سرب و روی دار نشان دادند. این نتیجه با رفتار دوگانه‌ای که عنصر نقره در سیستم‌های مس-مولیبدن پورفیری نشان می‌دهد، همخوانی دارد. نتایج تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی نشان داد که عناصر نقره و مس بالاترین همبستگی را با هم داشته و در یک گروه مستقل قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن، عناصر سرب، روی و آنتیموان نیز در یک گروه جداگانه قرار گرفته‌اند که همبستگی بالای این عناصر را با هم نشان می‌دهد. این دو گروه از عناصر در مرحله بعد یک گروه بزرگ‌تر را تشکیل دادند که نشان‌دهنده وجود همبستگی بین نقره و سرب و روی اما به میزان کمتر نسبت به مس و نقره است. از میان چهار عامل به‌دست‌آمده با استفاده از تحلیل عاملی، عامل سوم، عناصر نقره و مس بالاترین ویژه مقادیر را نشان دادند که علت آن همراهی این دو عنصر با یکدیگر است و هم‌چنین رسم نقشه این عامل نشان داد که این دو عنصر در مرکز کانی‌زایی قرار دارند. بنابراین، بررسی‌های آماری ارائه‌شده رفتار دوگانه عنصر نقره را در سیستم‌های مس-مولیبدن پورفیری نشان دادند. به‌طوری‌که هاله‌های این عنصر از یک‌طرف با هاله مس به علت قرار گرفتن در ساختار کانی‌های مس‌دار مانند کالکوپیریت و بورنیت در

ارتباط بوده و از سوی دیگر نیز در ارتباط با هاله‌های سرب و روی به علت قرار گرفتن در ساختار گالن به صورت محلول جامد است [۳۱]. این عنصر به همراه مس در مرکز کانی‌زایی و در همراهی با سرب و روی در لبه کانی‌زایی قرار گرفته‌است. علاوه بر آن، نتایج کانی‌شناسی نیز وجود کانی‌های کالکوپیریت، بورنیت و کوولیت را در منطقه مورد بررسی نشان دادند که با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های آماری همخوانی دارد.

مراجع

- [1] Pohl W. L., "Economic geology: Principles and practice", John Wiley & Sons, (2011).
- [2] Buttermann W.H. E. Hilliard, "Mineral commodity profiles: Silver", (2005).
- [3] Huston D., W. Jablonski S. Sie, "The distribution and mineral hosts of silver in eastern Australian volcanogenic massive sulfide deposits", The Canadian Mineralogist 34(3)(1996) 529-546.
- [4] Blackburn W. H.J. F. Schwendeman, "Trace-element substitution in galena", Canadian Mineralogist 15(3)(1977) 365.
- [5] George L., N. J. Cook, L. Cristiana B. P. Wade, "Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study", American Mineralogist 100(2-3)(2015) 548-569.
- [6] Gammons C., J. Szarkowski R. Stevenson, "in the world-class porphyry-lode deposits of Butte, MT."
- [7] Kozub G. A. "Distribution of Ag in Cu-sulfides in Kupferschiefer deposit, SW Poland". EGU General Assembly Conference Abstracts, (2014).
- [8] Cox D. P.D. Singer, "Gold-Distribution of gold in porphyry copper deposits", Contributions to commodity geology research: US Geological Survey Bulletin (1988) C1-C14.

- Egypt", *Natural Resources Research* 20(3)(2011) 157-176.
- [19] Yaylali-Abanuz G., N. TüysüzE. Akaryalı, "Soil geochemical prospection for gold deposit in the Arzular area (NE Turkey)", *Journal of Geochemical Exploration* 112(0)(2012) 107-117.
- [20] Embui V. F., B. O. Omang, V. B. Che, M. T. NforbaE. C. Suh, "Gold grade variation and stream sediment geochemistry of the Vaimba-Lidi drainage system, northern Cameroon (West Africa)", *Natural Science* 5(2013) 282.
- [21] Gazley M., K. Collins, J. Roberston, B. Hines, L. FisherA. McFarlane. "Application of principal component analysis and cluster analysis to mineral exploration and mine geology". AusIMM New Zealand Branch Annual Conference: (2015).
- [22] Afzal P., M. Mirzaei, M. Yousefi, A. Adib, M. Khalajmasoumi, A. Z. Zarifi, P. FosterA. B. Yasrebi, "Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis", *Journal of African Earth Sciences* 119(2016) 139-149.
- [23] Liu Y., Q. Cheng, K. Zhou, Q. XiaX. Wang, "Multivariate analysis for geochemical process identification using stream sediment geochemical data: A perspective from compositional data", *Geochemical Journal* 50(2016).
- [24] Khakzad A., Jafari H. "Mineralogy, paragenesis and economic geology of Cu deposits in Hararan area, Kerman". 10 th Symposium of Crystallography and mineralogy of Iran (2003).
- [25] Kavoshgaran Gostaresh Kavir Consultant Engineers Company, "Geochemical Assessment Report of lithogeochemical and drainge Trace Elements, Qhale Askar Region"(2009).
- [26] Alikhani A., geological map of Hararan area (1:5000), (2005).
- [27] Miesch A. T., "Estimation of the geochemical threshold and its statistical significance", *Journal of Geochemical Exploration* 16(1)(1981) 49-76.
- [28] Carranza E. J. M., "Chapter 6: Analysis of Geologic Controls on Mineral Occurrence". *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*. M. C. Emmanuel John, Elsevier Science B.V. Volume 11 (2009) 147-187.
- [29] Sfidari E., A. Kadkhodaie-IlkhchiS. Najjari, "Comparison of intelligent and statistical clustering approaches to predicting total organic carbon using intelligent systems", *Journal of*
- [9] Sinclair W. D., "Porphyry deposits, in Goodfellow, W.D", *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication* 5(2007) 223-243.
- [10] Gustafson L. B.J. P. Hunt, "The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile", *Economic Geology* 70(5)(1975) 857-912.
- [11] Corbett G. "Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralised systems: Some exploration implications". Australian Institute of Geoscientists North Queensland Exploration Conference, (2009).
- [12] Hasani pak A., Sharafadin M., "exploration data analysis", third edition, Tehran University Press (2011), 473p.
- [13] Adisa A.J. Adekoya, "Statistical analysis of stream sediment geochemical data from Oyi drainage systems, Western Nigeria", *Ife Journal of Science* 18(1)(2016) 1-17.
- [14] Nude P. M., "Identifying Pathfinder Elements for Gold in Multi-Element Soil Geochemical Data from the Wa-Lawra Belt, Northwest Ghana: A Multivariate Statistical Approach", *International Journal of Geosciences* 03(01)(2012) 62-70.
- [15] Khorasanipour M., M. TangestaniR. Naseh, "Application of multivariate statistical methods to indicate the origin and geochemical behavior of potentially hazardous elements in sediment around the Sarcheshmeh copper mine, SE Iran", *Environmental Earth Sciences* 66(2)(2012) 589-605.
- [16] Idris A. M., "Combining multivariate analysis and geochemical approaches for assessing heavy metal level in sediments from Sudanese harbors along the Red Sea coast", *Microchemical Journal* 90(2)(2008) 159-163.
- [17] Huang L.-M., C.-B. Deng, N. HuangX.-J. Huang, "Multivariate statistical approach to identify heavy metal sources in agricultural soil around an abandoned Pb-Zn mine in Guangxi Zhuang Autonomous Region, China", *Environmental Earth Sciences* 68(5)(2013) 1331-1348.
- [18] El-Makky A. M., "Statistical Analyses of La, Ce, Nd, Y, Nb, Ti, P, and Zr in Bedrocks and Their Significance in Geochemical Exploration at the Um Garayat Gold Mine Area, Eastern Desert,

[31] kurdiasef a., "*application of lithochemical methods in detection and exploration and estimation of porphyry copper deposits*", Institute of mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Trace elements, Academy of Russian sciences (in Russian), (1989).

Petroleum Science and Engineering 86(2012) 190-205.

[30] Cioacă M. E., M. Munteanu, L. QiG. Costin, "*Trace element concentrations in porphyry copper deposits from Metaliferi Mountains, Romania: A reconnaissance study*", Ore Geology Reviews 63(2014) 22-39.